

ректировки режима работы СКВ и поддержания стабильного теплового режима помещения.

**Выводы.** Определены основные требования к системам контроля температуры и расхода воздуха подземных сооружений.

Выбор количества термодатчиков и мест их установки для получения средней температуры воздуха зависит от топологии помещения и воздухораспределения и должен осуществляться в зависимости от конкретных условий путем зонирования помещения и определения характерных точек.

В системах контроля параметров микроклимата подземных сооружений целесообразно применять термодатчики DS1820, которые позволяют измерять температуру воздуха в пределах от от -55 до +125оС с шагом 0,1оС при влажности воздуха до 100%.

#### Список литературы

1. Тепловой режим подземных сооружений Севера: Научное издание / Галкин А. Ф.— М: Наука, 2000. - 304 С.
2. Кувшинов Ю.Я. Исследование теплового режима тоннеля / Современные системы теплогазоснабжения и вентиляции. Труды МГСУ/ Кувшинов Ю.Я., Рымаров А.Г. — М.: Изд-во МГСУ, 2003.
3. Рубинэ М. Кондиционирование воздуха в подземных сооружениях/ Рубинэ М. — М.: Госстройиздат, 1963.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Голінком В.І.  
Надійшла до редакції 07.04.2013*

УДК 622.453

© Г.П. Кривцун, Е.В. Столбченко

## **РАСЧЕТ ДЕПРЕССИИ ТРУБОПРОВОДОВ МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ И ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ НАЛИЧИИ УТЕЧЕК ВОЗДУХА**

В работе уточнены закономерности выделения газа из пластов угля и выработанного пространства в подготовительные выработки, разработана математическая модель расчета вентиляционного трубопровода, учитывающая распределенные утечки из труб в подготовительную выработку и позволяющая снизить энергозатраты на местное проветривание.

У роботі уточнені закономірності виділення газу з пластів вугілля і виробленого простору в підготовчі виробки, розроблена математична модель розрахунку вентиляційного трубопроводу, що враховує розподілені витоки з труб в підготовчу виробку і дозволяє знизити енерговитрати на місцевий опір.

In refined patterns of gas evolution from the seams of coal and gob in advance working, developed a mathematical model for calculating the ventilation pipe, which takes into account the distributed leakage from pipes in the preparatory development while minimizing the energy consumption for local airing.

Угольные шахты Украины, особенно Донбасса, характеризуются сложными горно-геологическими условиями в сравнении с другими странами. Средняя глубина разработки пластов превышает 720 м, а 33 шахты работают на глубине 1000–1400 м. Из 190 действующих шахт 90 % опасны по содержанию газа метана, 60 % – по выбросам угольной пыли, 45 % – по случайным выбросам и горным ударам, 22 % – по самовоспламенению угля. Среди ведущих стран мира Украина занимает десятое место по добыче угля, а по количеству погибших в шахтах – одно из первых. Несмотря на существенное сокращение на протяжении последних пятнадцати лет объемов добычи угля и численности шахтеров, уровень аварийности и смертельного травматизма не уменьшился. На протяжении последнего десятилетия в подземных выработках произошло 38 взрывов газа и пыли, 78 вспышек метана, 1512 газодинамических явлений, 1376 завалов горных выработок, 702 подземных пожаров, вследствие чего погибло 3401 человек. [1]

Общеизвестно, что эффективное и надёжное проветривание мест ведения горных работ является основой безопасности подземных работ на угольных шахтах, при этом важное значение имеет и экономический фактор вентиляции. Такой комплексный подход, основанный на системных принципах разработки и внедрение новых методов проектирования систем вентиляции угольных шахт, является перспективным направлением аэрологии горных предприятий, как в Украине, так и за рубежом. Особую актуальность в современных экономических условиях приобретает проблема совершенствования вентиляции подготовительных выработок, так как, именно, высокая производительность проходческих участков при полном соблюдении требований безопасности обеспечит высокие темпы поддержания очистного фронта в угольной промышленности Украины.

Вопросы безопасности являются важнейшим критерием эффективности процесса угледобычи, причем вопрос, газовой безопасности в связи с крупнейшими авариями с многочисленными человеческими жертвами на шахтах СНГ в 1996–2010 г.г. остается по-прежнему особо актуальным.

До настоящего времени одной из основных причин травматизма, является загазирование горных выработок. Действующее руководство по проектированию вентиляции угольных шахт [2] предусматривает расчет количества воздуха, необходимого для проветривания подготовительных выработок, из условия статического разжижения газа. При этом прогноз газообильности основан на эмпирических формулах, удовлетворительно описывающих средний газовый фон, но не учитывающих динамики экстренных газовыделений вследствие колебаний статического давления воздуха в шахте.

Анализ фактической аварийности на угольных шахтах Донбасса показывает, что газовыделения в подготовительные выработки, в период падения атмосферного давления, является одной из основных причин несчастных случаев со смертельным исходом при нарушении состава рудничной атмосферы.

Актуальность вопроса обусловлена еще и тем, что, несмотря на сокращение числа угледобывающих предприятий за последние десятилетия, удельный вес этого вида аварий остается достаточно стабильным (5,4 % в 70-х годах, 14,0 % в 80-х годах, 8,3 % в 90-е годы).

Особое значение имеет решение вопросов вентиляции подготовительных выработок на стадии проектирования, так как ошибки при проектировании могут привести к снижению уровня безопасности труда, ограничению нагрузки на забой, увеличению затрат труда, ремонт и модернизацию оборудования.

Следовательно, дальнейшее совершенствование методики проектирования вентиляции подготовительных выработок шахт Донбасса является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является определение депрессии шахтных воздухопроводов с переменным по длине расходом воздуха, как наиболее актуального вопроса.

Шахтные воздухопроводы отличаются различной степенью негерметичности. К воздухопроводам с переменным по длине расходом воздуха в шахте относятся трубопроводы местного проветривания и штреки, прилегающие к выработанному пространству.

Депрессия металлического трубопровода  $h$  определяется по формуле В.Н. Воронина [2]:

$$h = RpQ_3^2, \quad (1)$$

где  $R$  – аэродинамическое сопротивление трубопровода,  $\frac{H}{c \cdot m^8}$ ,

$$R = 6,5 \frac{\alpha l}{d^5};$$

$\alpha$  – коэффициент аэродинамического сопротивления трубопровода,  $\frac{H}{c \cdot m^4}$ ,

$l$  – длина трубопровода, м;  $d$  – диаметр трубопровода, м;  $p$  – коэффициент утечек воздуха (расходный коэффициент);  $Q_3$  – расход воздуха на конце трубопровода (количество воздуха, поступающего в забой),  $m^3/c$ .

Для металлического трубопровода

$$p = \left( \frac{1}{3} k_y d \frac{l}{m} \sqrt{R} + 1 \right)^2, \quad (2)$$

где  $k_y$  – удельный стыковой коэффициент условного трубопровода диаметром 1м, принимаемый согласно [2];  $m$  – длина звена трубопровода, м.

Расчет по формуле (2) даёт приближенный результат, так как в неё входит средний геометрический расход воздуха в трубопроводе.

Проведём расчет трубопровода местного проветривания с учетом изменения расхода воздуха по длине трубопровода с помощью коэффициента утечек воздуха, определяемого по формуле (2).

Формулу (3) для трубопровода длиной  $x$  можно записать

$$p = \left( ax^{3/2} + 1 \right)^2,$$

где  $a = \frac{1}{3} \cdot \frac{k_y}{m} d \sqrt{r}$ ,  $r$  – удельное аэродинамическое сопротивление металличе-

ского трубопровода,  $\frac{H}{c \cdot m^9}$ .

Депрессия элементарного участка трубопровода  $dH$  длиной  $dx$ , расположенного на расстоянии  $x$  от конца трубопровода, определяется выражением

$$dH = rdx(pQ_3)^2 = rQ_3^2(ax^{3/2} + 1)^4 dx.$$

Депрессия трубопровода длиной  $l$

$$\int_0^h dH = h = \int_0^l rQ_3^2(ax^{3/2} + 1)^4 dx = rQ_3^2(0,14a^4l^7 + 0,73a^3l^{5,5} + 1,5a^2l^4 + 1,6al^{2,5} + l)$$

Для металлического трубопровода депрессия определяется формулой

$$h = RkQ_3^2,$$

где  $k$  – напорный коэффициент,

$$k = 0,14L^6 + 0,73L^{4,5} + 1,5L^3 + 1,6L^{1,5} + 1.$$

$$L = a^{2/3}l.$$

В таблице 1 приведены значения расходного коэффициента  $p$  и напорного коэффициента  $k$  для металлического трубопровода при различных длинах и диаметрах и  $m = 2$ ,  $k_y = 0,001$ . Данные таблицы подтверждают известный в горно-технической литературе вывод о допустимости расчета депрессии трубопровода местного проветривания по формуле (1) только для условий с относительно низким значением коэффициента  $p$ . При большой длине и малом диаметре трубопровода формула (1) даёт значительную ошибку.

Таблица 1

Значения расходного коэффициента

Диаметр, $m$	$l = 100$ м		$l = 500$ м		$l = 1000$ м		$l = 1500$ м		$l = 2000$ м	
	$p$	$k$	$p$	$k$	$p$	$k$	$p$	$k$	$p$	$k$
0,5	1,065	1,052	1,833	1,794	3,992	5,009	8,043	13,313	14,638	42,704
0,7	1,030	1,025	1,374	1,326	2,211	2,228	3,591	4,232	5,650	8,453
1,0	1,013	1,011	1,124	1,129	1,469	1,414	1,929	1,902	2,557	2,664

Решение аэродинамических задач применительно к негерметичным трубопроводам вентиляционных систем местного проветривания является также весьма актуальным и для горных выработок, (чаще штреков) примыкающих к выработанному пространству, т.е. при наличии равномерно распределенных утечек воздуха по их длине. Здесь можно записать

$$Q_b = p_v Q_m,$$

где  $Q_b$ ,  $Q_m$  – соответственно, больший и меньший расходы воздуха в конечных точках участка штрека, где имеют место утечки за счет выработанного пространства;  $p_v$  – коэффициент утечки (притока) воздуха по длине штрека.

Для откаточного штрека:  $Q_b$  – расход воздуха в начале указанного участка штрека по ходу струи;  $Q_m$  – в конце участка.

Для вентиляционного штрека:  $Q_b$  – расход воздуха в конечной точке участка;  $Q_m$  – в начале участка. Точка примыкания к лаве для откаточного штрека находится в конце участка, для вентиляционного – в начале его.

В результате многочисленных натуральных исследований утечек воздуха через выработанное пространство, можно утверждать, что зависимость  $p_v$  от расстояния от лавы  $l_{ш}$  с достаточной точностью аппроксимируется полиномом 2-й степени:

$$p_v = 1 + b_1 l_{ш} - b_2 l_{ш}^2,$$

где  $l_{ш}$  – длина участка штрека, находящегося в пределах зоны утечек воздуха через выработанное пространство, м;  $b_1, b_2$  – постоянные коэффициенты эмпирической формулы, описывающей зависимость  $p_v$  от  $l_{ш}$ .

Значения  $b_1, b_2$  определяются путём обработки материалов анемометрической съемки вдоль штрека. Величины коэффициентов  $b_1, b_2$  зависят от утечек через выработанное пространство и длины утечек.

Депрессия элементарного участка длиной  $dx$ , находящегося на расстоянии  $x$  от лавы (в сторону выработанного пространства), определяется выражением

$$dH = r_{ш} (p_v Q_l)^2 dx = r_{ш} Q_l^2 (1 + b_1 x - b_2 x^2)^2 dx,$$

где  $r_{ш}$  – удельное аэродинамическое сопротивление штрека,  $\frac{H}{с \cdot м^9}$ ,  $Q_l$  – расход воздуха по лаве,  $м^3/с$ .

Обозначим длину зоны утечек воздуха  $l_{ш}$ , тогда депрессия штрека определится выражением

$$\int_0^h dH = h = \int_0^{l_{ш}} r_{ш} Q_l^2 (1 + b_1^2 x^2 + b_2 x^4 + 2b_1 x - 2b_2 x^2 - 2b_1 b_2 x^3 dx) =$$

$$= r_{ш} Q_l^2 \left[ l_{ш} + b_1 l_{ш}^2 + \frac{b_1^2 - 2b_2}{3} l_{ш}^3 - \frac{b_1 b_2}{2} l_{ш}^4 + \frac{b_2^2}{5} l_{ш}^5 \right] = R_{ш} k_{ш} Q_l^2, \quad (3)$$

где  $R_{ш}$  – аэродинамическое сопротивление штрека без учета утечек,  $\frac{H}{с \cdot м^8}$ ,

$k_{ш}$  – напорный коэффициент для штрека,

$$k_{ш} = 1 + b_1 l_{ш} + \frac{b_1^2 - 2b_2}{3} l_{ш}^2 - \frac{b_1 b_2}{2} l_{ш}^3 + \frac{b_2^2}{5} l_{ш}^4. \quad (4)$$

По данным А.Ф. Милетича [3] изменение расхода воздуха вдоль вентиляционного штрека 11-й восточной лавы шахты №2-2-бис (Донбасс) соответствует данным:

Таблица 2

Значения изменения расхода воздуха вентиляционного штрека

$l_{ш}, м$	2	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
$Q_{ш}, м^3/мин$	275	315	350	375	400	415	425	430	435	439	442	444	445

Путём точечного квадратичного аппроксимирования функции получена формула

$$k_{ш} = 1 + 2,2 \cdot 10^{-3} l_{ш} - 1,8 \cdot 10^{-6} l_{ш}^2. \quad (5)$$

Значит, напорный коэффициент для участка штрека  $l_{ш} = 600$  м по формуле (5) равен 2,458.

Расчет депрессии штрека по геометрическому расходу дает значительную ошибку в сравнении с расчетом по формуле (3).

Расход воздуха может также изменяться по длине лавы, например, при прямоточных схемах проветривания выемочного участка, в том числе при наличии подсвеживания. Тогда для определения депрессии лавы должна также использоваться формула (3). Все параметры, входящие в формулу, в этом случае берутся для рабочего пространства лавы.

Депрессия выемочного участка в пределах зоны утечек воздуха может определяться как сумма депрессий лавы и участков штреков, расположенных по направлению движения струи прилегающих к выработанному пространству.

При возвратноточной схеме проветривания и сплошной системе разработки депрессия выемочного участка в пределах зоны утечек определяется выражением

$$h_{уч} = (R_{о.ш.} k_{в.ш.} + R_{в.ш.} k_{в.ш.} + R_{л}) Q_{л}^2, \quad (6)$$

где  $R_{о.ш.}$ ,  $R_{в.ш.}$  – аэродинамические сопротивления откаточного и вентиляционного штреков в пределах зоны утечек,  $\frac{H}{с \cdot м^8}$ ;  $k_{о.ш.}$ ,  $k_{в.ш.}$  – напорные коэффициенты, соответственно, для откаточного и вентиляционного штреков, определяемые по формуле (4).

При прямоточных схемах проветривания выемочного участка депрессия его в пределах указанной зоны определяется по формуле

$$h_{уч} = (R_{ш} k_{ш} + R_{л} k_{л}) Q_{л}^2, \quad (7)$$

где  $R_{ш}$ ,  $k_{ш}$  – относятся к откаточному или вентиляционному штрекам;  $Q_{л}$  – расход воздуха в начальной или конечной точках лавы,  $м^3/с$ ;  $k_{л}$  – напорный коэффициент для лавы, определяемый по формуле (4).

При использовании метода напорный коэффициент (4), депрессия штрека (3) и депрессия выемочного участка (6), (7) определяются при любом режиме движения воздуха при просачивании через выработанное пространство.

#### Список литературы

1. Слесарев В.В., Коваленко А.Н., Алексеев А.М. Управление концентрацией метана в выработанном пространстве выемочного участка угольной шахты// Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2007.– № 29.– С. 235–246.
2. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Государственный нормативный акт по охране труда. – К.: Основа, 1994. – 311 с.
3. Милетич А.Ф. Утечки воздуха и их расчет при проветривании шахт/ А.Ф. Милетич. – М.: «Недра», 1968.– 146 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Голінком В.І.  
Надійшла до редакції 03.04.2013*