

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ РАСЧЕТЕ КОЭФФИЦИЕНТА УТЕЧЕК

Розроблено методи розрахунку основних параметрів провітрювання тупикових виробок місцевого провітрювання. Визначається витрата повітря, що надходить в привибійний простір і довжина трубопроводу.

## DEFINITION OF PARAMETERS VENTILATION SYSTEM DEADLOCK WORKING IN THE CALCULATION OF THE COEFFICIENT LEAKAGE

The methods calculating the basic parameters ventilation of deadlock workings of local ventilation. Determined by the flow air entering the space in the bottom hole and the length of the pipeline.

Основным способом проветривания тупиковых выработок является нагнетательный, при котором обычно применяются гибкие трубопроводы. При совместной работе двух вентиляторов установка их на трубопровод может производиться каскадом или параллельно. Для определения параметров совместной работы двух вентиляторов местного проветривания (ВМП) используют графические методы [1]. Предлагаются аналитические методы определения этих параметров.

При совместной работе двух вентиляторов с разной парциальной производительностью работа эффективна только в том случае, когда необходимая производительность вентиляторной установки не превышает производительность меньшего вентилятора. Если между двумя вентиляторами в вентиляционной сети существует противодействие, то парциальный режим меньшего вентилятора превращается в дополнительное сопротивление для большего вентилятора.

Математическая модель вентиляционной системы тупиковой выработки при гибком трубопроводе может описываться уравнением

$$\frac{6,48\alpha l_{mp}}{d_{тр}^5} Q_{зн}^2 k_{ум} = a_0 - a_1 k_{ум} Q_{зп}, \quad (1)$$

где  $Q_{зп}$  – расход воздуха, поступающего в призабойное пространство тупиковой выработки,  $\alpha$  – коэффициент аэродинамического сопротивления трубопровода,

$l_{тр}$  – длина трубопровода, м;  $d_{тр}$  – диаметр трубопровода, м;  $k_{ум}$  – коэффициент утечек воздуха в трубопроводе,  $a_0$ ,  $a_1$  – коэффициенты в формуле, описывающей характеристику вентилятора.

$$h_g = a_0 - a_1 Q_B^2,$$

где  $h_B$  – напорная депрессия вентилятора, Па,  $Q_B$  – подача вентилятора, м<sup>3</sup>/с.

Например, характеристика вентилятора местного проветривания (ВМП) ВМЦ-6 при угле наклона лопаток направляющего аппарата  $\theta = 30^\circ$

$$h_d = 750 + 9,375Q^2.$$

При решении уравнения (1) определяется расход воздуха  $Q_{3п}$

$$Q_{3п} = k_{ym} Q_d.$$

При определении расхода воздуха, поступающего в призабойное пространство по гибкому трубопроводу, коэффициент утечек воздуха в гибком трубопроводе по данным табл. 5.4 [1] может описываться уравнением

$$k_{ym} = a_{0y} + a_{1y} Q_{3п},$$

где  $a_{0y}$  и  $a_{1y}$  – коэффициенты апроксимационного уравнения.

Зависимость устанавливается при постоянном диаметре трубопровода и постоянной длине. Определяется две группы зависимости утечек воздуха.

Так, при диаметре трубопровода 0,8 м и длине трубопровода 500 м. Эти группы будут в виде

$$\begin{aligned} Q_{3п} &= 1,0+2,0+3,0+4,0 = 10 \text{ м}^3/\text{с}; \\ K_{ym} &= 0,19+1,22+1,24+1,27 = 4,92; \\ Q_{3п} &= 5,0+6,0+7,0+8,0 = 26 \text{ м}^3/\text{с}; \\ K_{ym} &= 1,30+1,33+1,36+1,39 = 5,38. \end{aligned}$$

Для данного численного примера коэффициенты  $a_{0y}$  и  $a_{1y}$  определяется при решении системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} 4,92 &= 4 + 10a_{1y} \\ 5,38 &= 4 + 26a_{1y} \end{aligned} \right\},$$

$$a_{0y} = 0,029,$$

$$a_{1y} = 1,16.$$

Уравнение, описывающее утечки воздуха будет иметь вид

$$k_{ym} = 1,16 + 0,029Q_{3п}.$$

Математическая модель вентиляционной сети тупиковой выработки при гибком трубопроводе

$$\frac{6,48\alpha l_{mp}}{d_{mp}^5} Q_{3n}^2 (a_{0y} + a_{1y} Q_{3n}) = a_0 - a_1 (a_{0y} + a_{1y} Q_{3n})^2 Q_{3n}^2. \quad (2)$$

Для определения  $Q_{3n}$  это уравнение можно записать в виде

$$A_{1y} Q_{3n}^4 + A_{2y} Q_{3n}^3 + A_{3y} Q_{3n}^2 + A_{4y} = 0,$$

где  $A_{1y} = a_{1y}^2$ ;  $A_{2y} = \frac{6,48\alpha l_{mp}}{d_{mp}^5} a_{1y} + 2a_{1y} a_{0y} a_{1y}$ ;  $A_{3y} = \frac{6,48\alpha l_{mp}}{d_{mp}^5} a_{0y} + a_{1y} a_{0y}^2$ ;  
 $A_{4y} = a_0$ .

После определения численных значений коэффициентов уравнения при  $a_1 = 9,375$ ;  $a_{1y} = 0,029$ ;  $l_{тр} = 500$  м;  $\alpha = 0,0003$ ;  $d = 0,8$  м.

$A_{0y} = 1,16$ ;  $a_0 = 750$  уравнение (2) будет в виде

$$0,272 Q_{3n}^4 + 0,717 Q_{3n}^3 + 16,056 Q_{3n}^2 - 750 = 0 \quad (3)$$

Уравнение (3) можно решить путём последовательного перебора корней.

$$f(6) = 352,5 + 154,9 + 578,0 - 750 = 335,4;$$

$$f(5) = 170 + 89,6 + 401,4 - 750 = -89;$$

$$f(5,5) = 248,7 + 119,3 + 458,7 - 750 = 103,9;$$

$$f(5,3) = 214,6 + 106,7 + 451 - 750 = 22,3;$$

$$f(5,2) = 198,9 + 100,8 + 434,2 - 750 = -16,1.$$

Как видно, расход воздуха, поступающий в призабойное пространство согласно уравнению (3) равен

$$Q_{3n} = 5,2 \text{ м}^3/\text{с}.$$

При определении длины гибкого трубопровода при постоянном диаметре и заданном расходе воздуха на выходе из трубопровода предварительно определяется зависимость коэффициента утечек воздуха в трубопроводе от длины.

Зависимость коэффициента утечек воздуха в трубопроводе от длины гибкого трубопровода определяется согласно табл. 5.4 [1], при постоянном диаметре трубопровода и заданного расхода воздуха, поступающего на выходе из трубопровода.

Эта зависимость можно описать экспонентой вида

$$k_{ym} = a_y l^{b_y l_{mp}}, \quad (4)$$

где  $a_y$  и  $b_y$  – коэффициенты уравнения.

Для определения величин коэффициентов используются материалы табл. 5.4 [1] зависимости коэффициента утечек воздуха от длины трубопровода при постоянных величинах диаметра трубопровода и расхода воздуха поступающего в призабойное пространство тупиковой выработки.

В табл. 1 выписаны расчетные значения коэффициента утечек воздуха при диаметре трубопровода  $d_{тр} = 0,8$  м и расхода воздуха в призабойном пространстве  $4 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Таблица 1 – Значения параметров вентиляции

$k_{ym}$	$\ln k_{ym}$	$l_{mp}$	$k_{ym.p}$
1,02	0,0198	100	0,946
1,06	0,0583	200	1,029
1,11	0,1044	300	1,119
1,18	0,1055	400	1,217
1,27	0,2390	500	1,324
$\Sigma$	0,587	1500	
1,38	0,3221	600	1,440
1,52	0,4187	700	1,566
1,67	0,5128	800	1,704
1,87	0,6259	900	1,853
2,09	0,7372	1000	2,015
$\Sigma$	2,6167	4000	

Уравнение (4) можно преобразовать к виду

$$\ln k_{ym} = \ln a_y + b_y \ln l_{mp}.$$

Для определения коэффициентов  $a_y$   $b_y$  с использованием данных табл. 1 решается система уравнений

$$\left. \begin{aligned} 0,587 &= 5 \ln a_y + b_y 1500 \\ 2,6167 &= 5 \ln a_y + b_y 4000 \end{aligned} \right\},$$

$$2,097 = 2500b_y, \quad b_y = \frac{2097}{2500} = 0,00084. \quad \ln a_y = \frac{0,587 - 0,00084 \cdot 1500}{5} = -0,1345,$$

$$a_y = 0,87.$$

Формула определения коэффициента утечек воздуха в гибком трубопроводе при  $d_{тр} = 0,8$  м и  $Q_{зн} = 4$  м<sup>3</sup>/с будет в виде

$$k_{ym} = 0,87l^{0,00084l_{тр}}.$$

Математическая модель вентиляционной системы тупиковой выработки при гибком трубопроводе и работе ВМП с квадратичной характеристикой, используемая для определения длины трубопровода будет в виде

$$\frac{6,48\alpha l_{mp} Q_{зн}^2}{d_{mp}^5} a_y l^{b_y l_{mp}} = a_0 - b_1 Q_{зн}^2 a_y l^{2b_y l_{mp}} = 0 \quad (5)$$

$$\text{или } \frac{6,48\alpha l_{mp} Q_{зн}^2}{d_{mp}^5} = \frac{a_0}{a_y l^{b_y l_{mp}}} - a_1 Q_{зн}^2 a_y l^{b_y l_{mp}} = 0 \quad (6)$$

$$\text{или } b_1 l_{mp} + b_2 l^{b_y l_{mp}} - b_3 l^{-b_y l_{mp}} = 0 \quad (7)$$

$$\text{где } b_1 = \frac{6,48\alpha Q_{зн}^2}{d_{mp}^5}; \quad b_2 = \frac{a_0}{a_y}; \quad b_3 = a_1 Q_{зн}^2 a_y.$$

При  $\alpha = 0,00047$ ,  $Q_{зн} = 4$  м/с,  $d = 0,8$  м,  $a_1 = 750$ ,  $a_y = 0,87$ ,  $b_y = 0,00084$ .

Уравнение (6) можно решить, используя один из приближенных методов, в частности метод половинного деления [2]. Последовательность расчетов следующая: определяется корень непрерывной функции  $f(x) = 0$  на отрезке  $[a, b]$  и  $f(a)f(b) < 0$ . Отрезок  $(a, b)$  делится пополам.

Если  $f\left(\frac{a+b}{2}\right) = 0$ , то  $f = \left(\frac{a+b}{2}\right)$  является корнем уравнения, если  $f\left(\frac{a+b}{2}\right) \neq 0$ , то выбирают ту из половин  $[a, \frac{a+b}{2}]$  или  $[\frac{a+b}{2}, b]$ , на концах которых функция  $f(x)$  имеет противоположные знаки.

Новый суженный отрезок  $(a_1, b_1)$  снова делится пополам и производится то же рассмотрение.

В результате будет или точный корень уравнения  $f(x)$  или корень на одном из отрезков  $(a_n, b_n)$  таких, что  $f(a_n)f(b_n) < 0$  ( $n = 1, 2, \dots$ ), обеспечивающий решение уравнения с необходимой точностью.

Уравнение (7) при использовании числовых значений ранее указанных параметров будет в виде

$$f(l_{mp}) = 0,149l_{mp} + 130,5l_{mp}^{0,00084} - 862,069l_{mp}^{-0,00084} = 0.$$

Решение уравнения будет в виде

$$f(1000) = 149 + 302,286 - 372,164 = 79,122;$$

$$f(900) = 134,1 + 277,931 - 404,477 = 7,884;$$

$$f(840) = 125,16 + 264,271 - 425,7 = -36,264;$$

$$f(880) = 131,12 + 273,301 - 411,634 = -7,213.$$

С достаточной точностью искомая длина трубопровода согласно приведенному решению будет равна

$$l_{mp} = \frac{900 - 880}{2} = 890 \text{ м.}$$

При использовании гибкого трубопровода коэффициент утечек воздуха в трубопроводе при  $Q_{зп} = \text{const}$  и  $d_{тр} = \text{const}$  можно также описать уравнением

$$k_{ym} = a_m l_{mp}^{b_m} + 1. \quad (8)$$

Для определения величин коэффициентов  $a_m$  и  $b_m$  можно также использовать данные табл. 5.4 [1].

Уравнение (8) можно преобразовать к следующему виду

$$\ln(k_{ym} - 1) = \ln a_m + b_m \ln l_{mp}.$$

В табл. 2 приведены значения величины коэффициента утечек воздуха в гибком трубопроводе согласно табл. 5.4 [1] при  $Q_{зп} = \text{const}$  и  $d_{тр} = \text{const}$ .

Таблица 2 – Значения используемых параметров

$k_{ym}$	$k_{ym}-1$	$\ln(k_{ym}-1)$	$l_{тр}$	$\ln l_{тр}$	$k_{ym.p}$
1,02	0,02	-3,912	100	4,605	1,02
1,05	0,05	-2,996	200	5,298	1,05
1,10	0,10	-2,303	300	5,704	1,10
1,17	0,17	-1,772	400	5,921	1,17
1,24	0,24	1,427	500	6,215	1,24
		-12,41	1500	27,813	
1,34	0,34	-1,079	600	6,397	1,34
1,45	0,45	-0,799	700	6,551	1,45
1,59	0,59	-0,528	800	6,685	1,56
1,74	0,74	-0,301	900	6,802	1,69
1,93	0,93	-0,073	1000	6,908	1,83
		-2,78	4000	33,343	

Для определения коэффициентов  $a_m$  и  $b_m$  решается система уравнений. Согласно табл. 2

$$\left. \begin{aligned} -12,41 &= 5 \ln a_m + 27,813b_m \\ -2,78 &= 5 \ln a_m + 33,343b_m \end{aligned} \right\}$$

$$-9,63 = -5,53b_m$$

$$b_m = \frac{9,63}{5,53} = 1,74;$$

$$\ln a_m = \frac{-12,41 - 27,813 \cdot 1,74}{5} = -12,41,$$

$$a_m = 0,000005.$$

Согласно результату решения системы утечки воздуха в гибком трубопроводе согласно табл. 5.4 [1] при  $Q_{зп} = 3 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $d_{тр} = 0,8 \text{ м}$  определяются формулой

$$k_{ym} = 1 + 0,000005 l_{тр}^{1,74}. \quad (9)$$

Величины коэффициента утечек воздуха согласно формуле (9) приведены в табл. 2.

Формула (9) может быть использована при определении математической длины трубопровода при  $Q_{зп} = \text{const}$  и  $d_{тр} = \text{const}$ .

Математическая модель вентиляционной системы тупиковой выработки при гибком трубопроводе и линейной характеристики вентилятора будет в виде

$$\frac{6,48\alpha l_{mp} Q_{3n}^2}{d_{mp}^5} (a_m l_{mp}^{b_m} + 1) Q_{3n}^2 = a_0 - a_1 (a_m l_{mp}^{b_m} + 1) Q_{3n}. \quad (10)$$

Уравнение (10) можно записать в виде

$$A_1 l_{mp}^{1+b_m} + A_2 l_{mp} + A_3 l_{mp}^{b_m} + A_4 = 0,$$

где  $A_1 = \frac{6,48\alpha a_m Q_{3n}^2}{d_{mp}^5}$ ;  $A_2 = \frac{6,48\alpha Q_{3n}^2}{d_{mp}^5}$ ;  $A_3 = a_1 a_m Q_{3n}$ ,  $A_4 = -a_0 + a_1 Q_{3n}$ .

Линейную характеристику имеет, например, ВМП – ВМ-5. При угле поворота лопаток  $\theta = 20^\circ$ .

$$h = 492,39 - 95,24Q.$$

При  $\alpha = 0,00047$ ,  $a_m = 0,000005$ ;  $Q_{3n} = 3 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $d_{тр} = 0,8 \text{ м}$ ;  $a_1 = 95,24$ ,  $a_0 = 492,39$ ,  $b_m = 1,74$ .

$$L_{mp} = 690 \text{ м}.$$

Коэффициент утечек воздуха в гибком трубопроводе из труб типа 1А и 1Б при длине звена 20 м при известных величинах расхода воздуха в конце трубопровода  $Q_{3n}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) и длине трубопровода  $l$  (м) можно описать уравнением:

$$k_{ym} = a_2 d_{mp}^{-b_2}. \quad (11)$$

где  $a_2$  и  $b_2$  – коэффициенты уравнения. Для определения которых используются таблицы (табл. 5.4 [1]) для труб диаметром 0,6 м, 0,8 м и 1,0 м.

Например, при  $Q_{3n} = 2 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $l = 500 \text{ м}$  составляется табл. 3

Таблица 3 – Исходные данные для расчета

$k_{ym}$	$\ln k_{ym}$	$d_{mp}$	$\ln d_{mp}$
1,46	0,3784	0,6	-0,511
1,22	0,1989	0,8	-0,2231
1,14	0,1310	1,0	0

Для определения коэффициентов  $a_2$  и  $b_2$  решается система уравнений

$$0,3784 = \ln a_2 - 0,511 b_2, \quad 0,3299 = 2 \ln a_2 - 0,2231 b_2$$

или  $0,7568 = 2 \ln a_2 - 1,022 b_2$ ,  $0,3299 = 2 \ln a_2 - 0,2231 b_2$ ,  $0,4269 = -0,7989 b_2$

$$b_2 = -\frac{0,4269}{0,7989} = -0,534;$$

$$\ln a_2 = \frac{0,7568 - 1,022 \cdot 0,534}{2} = 0,1055;$$

$$a = 1,111.$$

С достаточной точностью коэффициент утечек воздуха в трубопроводе определяется уравнением

$$k_{ym} = 1,111 d_{mp}^{-0,534}.$$

С учетом уравнения (11) математическая модель вентиляционной системы тупиковой выработки будет в виде

$$\frac{6,48 a l_{mp} Q_{3n}^2 a_2 d_{mp}^{-b_2}}{d_{mp}^5} = a_0 - a_1 a_2 d_{mp}^{-b_2} Q_{3n}.$$

Она записывается в виде

$$A_1 d_{mp}^{-(5+b_2)} + A_2 d_{mp}^{-b_2} - a_0 = 0,$$

где  $A_1 = 6,48 \cdot a l_{mp} Q_{3n}^2 a_2$ ,  $A_2 = a_1 a_2 Q_{3n}$ .

Выводы:

1. Описаны математические модели вентиляционной системы тупиковой выработки при гибком трубопроводе.
2. На базе данных табл. 5.4 [1] разработаны формулы для определения утечек воздуха в гибком трубопроводе, входящие в математические модели.
3. С использованием формул для утечек воздуха определяется расход воздуха, поступающего в призабойное пространство и длина трубопровода.
4. В математические модели входят уравнения, описывающие характеристики вентиляторов как в линейном виде, так и в квадратичном.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – К., 1994. – 311 с.
2. Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике/ Выгодский М.Я. – Москва: «Наука», 1977. – 214с.

Е.С. Тужикова, инж. II кат.  
(Приднепровский научный центр НАН Украины и МОН Украины)  
**ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МИГРАЦИИ  
ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ**

В статті розглянуто проблему забруднення підземних вод. Розглянуто основні методи моделювання і прогнозування розповсюдження забруднення в підземних водах. Показано, що існуючі методи моделювання міграції забруднень потребують суттєвої модернізації.

**MODELING OF MIGRATION ISSUES CONTAMINATION  
IN GROUNDWATER**

The article deals with the problem of groundwater pollution. The main methods of modeling and predicting spread of contamination in groundwater. It is shown that the existing methods for modeling migration of contaminants need substantial upgrading.

Вода является наиболее распространённым и универсальным природным ресурсом. Водные ресурсы, как и полезные ископаемые, – часть нашего национального богатства. Тяжело найти область народного хозяйства или отдельные производства, которые могли бы обойтись без воды.

Взаимодействие человека и гидросферы имеет различные аспекты. Среди отрицательных последствий этого взаимодействия наиболее серьезными являются загрязнение и истощение поверхностных и подземных вод вследствие бурного развития всех отраслей промышленности, сельского хозяйства, роста численности населения в отдельных странах и т.д.

Проблема загрязнения гидросферы является одной из наиболее актуальных и вместе с тем важных вопросов в охране окружающей среды. Острота этой проблемы возрастает в связи с загрязнением крупных рек и озер и стремлением к переходу на водоснабжение подземными водами, обладающими, по сравнению с поверхностными, более высоким качеством и стабильностью.

Например, в Днепропетровской области, которая хорошо снабжена поверхностными водными ресурсами, водоснабжение восточной ее части и частично центральной осуществляется за счет подземного водозабора (рис. 1).

При этом, эти же части области характеризуются значительной техногенной и антропогенной нагрузкой (рис.2).

Загрязнение подземных вод вызывает ухудшение их свойств и состава, ограничивающее или даже не допускающее использование подземных вод (для питьевых, хозяйственных, ирригационных и других целей). Загрязнение подземных вод происходит под влиянием как техногенных, так и естественных природных процессов. Это воздействие на подземную гидросферу может иметь как региональный, так и локальный характер.