Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова
т. XXXVI, вып. 1, 1958 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ВОЗДУХА И ПОДСЧЕТ ДЕПРЕССИИ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ

М. А. ПАТРУШЕВ

Для обеспечения очистных и подготовительных забоев достаточным количеством воздуха необходимо правильно определить потери воздуха как на действующих шахтах, так и при их проектировании.

Во многих шахтах Донбасса, как и других угольных бассейнах страны, значительный удельный вес (нередко достигающий 50—70%) в общешахтных подземных утечках приходится на потери воздуха в параллельных выработках.

Переход на столбовые системы разработки и обратный порядок отработки шахтных полей будет сопровождаться увеличением количества проходимых длинных (2000—2500 *м*) параллельных выработок в период подготовки. Большое значение здесь приобретает вопрос правильного определения потерь воздуха и подсчета депрессии, особенно на газовых шахтах, где по подсчетам некоторых авторов при проходке парным забоем депрессия может достигать нескольких сот миллиметров водяного столба [2].

В результате проведенных нами исследований потерь в параллельных выработках, режимов просачивания воздуха через вентиляционные перемычки и их воздухопроницаемости на 55 шахтах 17 трестов Донбасса установлено следующее.

1. Просачивание воздуха через вентиляционные перемычки в шахтных условиях подчиняется в основном квадратичному закону, при этом потери воздуха прямо пропорциональны периметру перемычки P

$$q = \frac{9{,}30}{\psi} K \sqrt{\frac{h}{b}}, \qquad (1)$$

где K — коэффициент воздухопроницаемости перемычки (количество воздуха, просачивающееся через 1 *пог. м* периметра этой перемычки толщиной в 1 *м* при депрессии в 1 *мм*);

b — толщина перемычки, *м*;

h — перепад давления через перемычку, *мм* вод. ст.;

ψ — коэффициент приведения, который определяется выражением

$$\psi = \frac{9{,}30}{P} \qquad (2)$$

при известной величине периметра перемычки или берется по графику (рис. 1), если известна только площадь перемычки.

2. Потери воздуха в параллельных выработках прямо пропорциональны числу просеков (перемычек) в изоляторе, т. е. с увеличением числа просеков на определенном участке выработок, например, вдвое, потери возрастут также в два раза.

3. Расчетная депрессия, т. е. средний перепад давлений через целики (бутовые полосы) и перемычки на данном участке параллельных выработок, за счет которых происходят потери воздуха, может быть определена по формуле

$$h_р = \frac{h_н + h_к}{2}\left(1 - \frac{4m}{L}\right), \tag{3}$$

где $h_н$ и $h_к$ — перепады давления через изолятор соответственно в начале и конце параллельных выработок;

m — число просеков (перемычек) на участке параллельных выработок длиной L *м*.

1. Определение потерь воздуха в параллельных выработках

На основании проведенных исследований потерь воздуха в 92 параллельных выработках на шахтах Донбасса были получены графики $Q = f(x)$ изменения количества воздуха по длине выработок. Часть этих кривых представлена на рис. 2.

Начало координат расположено в конце параллельных выработок, положительное направление оси абсцисс — против движения свежей струи (по направлению исходящей). В большинстве случаев экспериментальные точки удовлетворительно ложатся на плавные кривые.

Для получения кривых были подобраны эмпирические формулы. Оказалось, что наиболее точно функции $Q(x)$ описываются уравнениями типа

$$Q = Me^{Nx} + F, \tag{4}$$

где M, N, F — постоянные параметры для данной кривой, определяемые экспериментальными данными;

x — расстояние от конца параллельных выработок, *м*.

Проверка пригодности и точности уравнения (4) производилась методом [4] выравнивания кривых (рис. 3). Параметры M и N определялись по способу минимальной средней ошибки [5]. Колебания параметров M, N и F оказались настолько велики, что даже при весьма тщательном изучении не удалось установить их зависимости от факторов, влияющих на потери воздуха в параллельных выработках, а следовательно, и получить общее для всех уравнение.

Функции $Q(x)$ могут быть также удовлетворительно описаны уравнениями типа

$$Q = b + ax^{\tau}, \tag{5}$$

где a, b, τ — постоянные параметры для данной кривой, определяемые на основании экспериментальных данных.

Если $Q = f(x)$ действительно выражаются уравнением (5), то, положив $x = 0$, найдем $Q_к = b$, так как b лежит в пересечении этой кривой с осью Q.

Замеры $Q_к$ производились в 8—15 *м* от конца параллельных выработок в целиках угля, а значения b по графику получаются при $x = 0$. Так как потери воздуха через ненарушенные целики угля

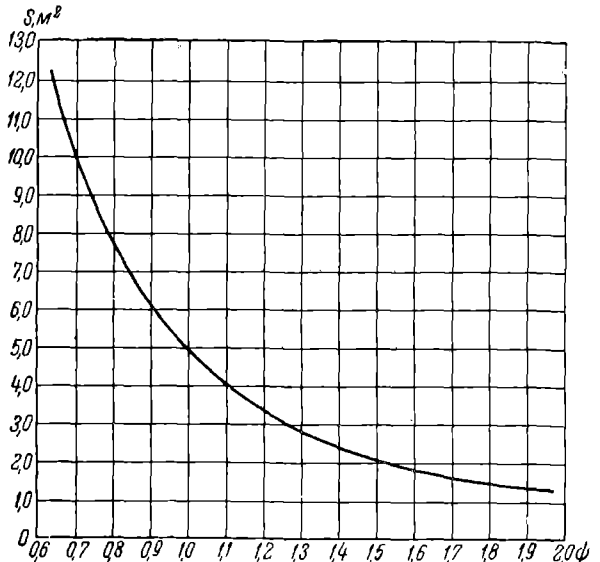


Рис. 1. Зависимость коэффициента ψ от площади перемычки

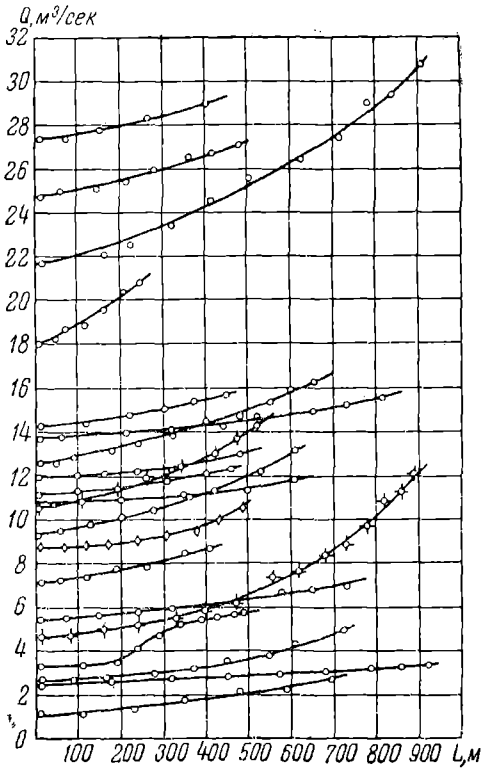


Рис. 2. Изменение количества воздуха при движении по параллелньым выработкам

ничтожны, то в действительности $Q_к = b$. Количества воздуха в конце параллельных выработок во всех случаях являются известными величинами, заменяя b через $Q_к$, получим

$$Q = Q_к + ax^\tau. \tag{6}$$

Проверка пригодности уравнения (6) производилась также методом выравнивания кривых (рис. 4).

По методу минимальной средней ошибки определялись значения параметров a и τ и затем подсчитывалось на сколько результаты, вычисленные по формуле (6), расходятся с опытными данными. Отклонения колебались в среднем в пределах 3%.

Значения параметра τ изменялись от 1,26 до 1,39. Если принять для всех кривых в среднем значения $\tau = 1{,}33 = 4/3$, то формула (6) будет более проста и удобна

$$Q = Q_к + a\sqrt[3]{x^4}. \tag{7}$$

Для более точного определения параметра a в уравнение (7) был применен следующий метод. В координатной сетке, на оси абсцисс которой строилась степенная шкала $\sqrt[3]{x^4}$, а на оси ординат — равномерная, наносились значения Q по длине выработки (рис. 5). Почти во всех случаях экспериментальные точки легли на прямые линии и параметр a определить просто. Действительно, взяв две наиболее удаленные друг от друга, но точно лежащие на прямой, точки с координатами Q_1, x_1 и Q_2, x_2, значение a определяем по формуле

$$a = \frac{Q_2 - Q_1}{\sqrt[3]{x_2^4} - \sqrt[3]{x_1^4}}$$

Расхождение опытных данных с результатами, полученными по формуле (7), не превышает для параллельных выработок с хорошим состоянием перемычек в среднем 3—4%.

Если в формуле (7) положить $x = 1$, то $Q_1 = Q_к + a$, отсюда $a = Q_1 - Q_к$, т. е. параметр a численно равен количеству воздуха, просачивающегося через 1 *пог. м* изолятора, и является, следовательно, функцией депрессии и сопротивления

$$a = f(h,\ R).$$

При квадратичном законе, который имеет место при просачивании воздуха через изолятор,

$$a = \sqrt{\frac{h_р}{R_ф}}, \tag{8}$$

где $h_р$ — расчетная депрессия, за счет которой происходит просачивание воздуха через изолятор;

$R_ф$ — расчетное, фиктивное (так как a является эмпирическим коэффициентом), сопротивление изолятора.

Для сравнения потерь воздуха через отдельные перемычки с различной площадью, но при прочих равных условиях, эти потери удобнее приводить к перемычкам с определенной «стандартной» площадью, например, 5 *м*² (периметром $P = 9{,}30$ *м*)

$$q' = \psi q, \tag{9}$$

где q' — потери воздуха через перемычку площадью 5 *м*²;

q — потери воздуха через перемычку площадью S_i *м*².

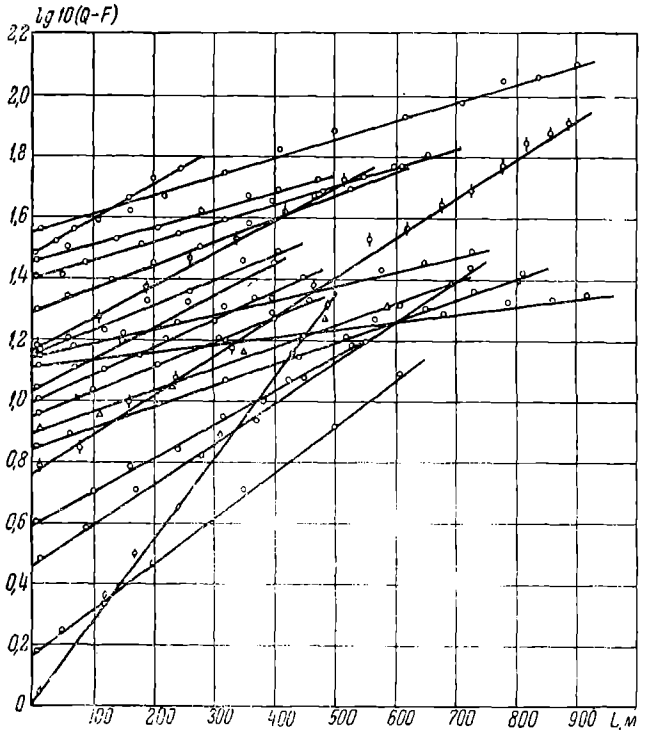


Рис. 3. Проверка пригодности формулы $Q = Me^{Nx} + F$

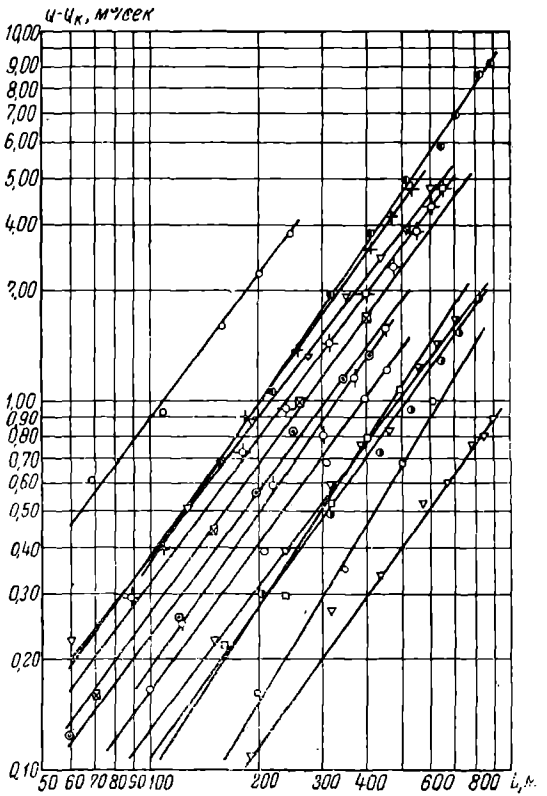


Рис. 4. Проверка пригодности формулы $Q = Q_к + ax^τ$

Так как основные потери воздуха в параллельных выработках происходят через перемычки в просеках, независимо от типа изолятора (бутовые полосы, нарушенные или ненарушенные целики), то сопротивление последнего зависит от типа перемычек и их параметров, от расстояния между просеками и состояния боковых пород.

По аналогии с приведением потерь воздуха через перемычки можно написать

$$a_{пр} = \psi a. \tag{10}$$

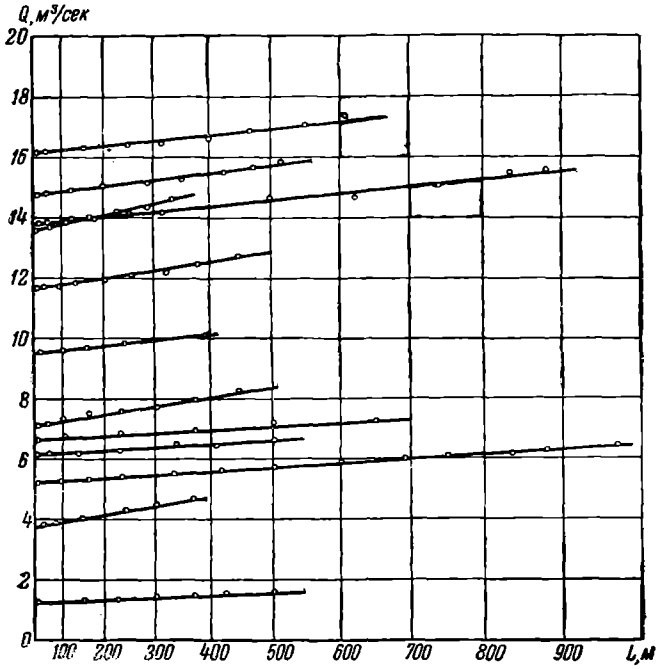


Рис. 5. График зависимости Q от $\sqrt[3]{x^4}$

Расстояние между просеками будем учитывать величиной

$$z = \frac{m}{L} \tag{11}$$

т. е. числом просеков (перемычек) m, приходящихся на единицу длины параллельных выработок.

Таким образом, все полученные значения параметра a приводим к типовому изолятору (с площадью перемычек 5 $м^2$ и одним просеком на единицу длины параллельных выработок, принимая во внимание линейную зависимость потерь воздуха от числа просеков)

$$a_{пр} = \frac{\psi a}{z} \tag{12}$$

Расчетное фиктивное сопротивление изолятора

$$R_ф = \frac{h_р}{a_{пр}^2}. \tag{13}$$

Средние значения $R_ф$, подсчитанные для каждого типа изолятора, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Среднее расчетное (фиктивное) сопротивление изолятора $R_ф 10^{-2}$

Тип изолятора	Характеристика боковых пород	
	монолитных	трещиноватых
Шлако- и бутобетонные перемычки и ненарушенные целики угля	3900	1200
Каменные перемычки и ненарушенные целики угля	2900	900
Шлакоблоковые и кирпичные перемычки и ненарушенные целики угля .	2200	700
Чураковые перемычки и ненарушенные целики угля	1200	400
Дощатые перемычки и ненарушенные целики угля	700	220
Чураковые перемычки и бутовые полосы	400	100

При установке в просеках и штреках по две одинаковых по качеству перемычки сопротивление изолятора возрастает в два раза.

Подставляя в формулу (6) вместо a и z их значения из выражений (11), (12) и (13), получим

$$Q = Q_к + \frac{m}{\psi L}\sqrt{\frac{h_р}{R_ф}}\sqrt[3]{x^4}. \qquad (14)$$

Депрессия, затрачиваемая на преодоление движения воздуха по параллельным выработкам,

$$h = (r_1 + r_2)\, x Q_к Q, \qquad (15)$$

где r_1 и r_2 — удельные сопротивления (1 *пог. м*) воздухоподающей и вентиляционной выработок.

Расчетное количество воздуха определяем по формуле В. Н. Воронина [1].

Так как $h_н = h_к + h$, то, подставляя ее значения в формулу (3), получим

$$h_р = \frac{h_к + h_к + h}{2}\left(1 - \frac{4m}{L}\right) = h_к + 0{,}5h\left(1 - \frac{4m}{L}\right).$$

Заменяя в этом выражении значение h из формулы (15), имеем

$$h_р = [h_к + 0{,}5\,(r_1 + r_2)\, x Q_к Q]\left(1 - \frac{4m}{L}\right). \qquad (16)$$

Выражение (14) с учетом последней зависимости

$$Q = Q_к + \frac{m}{\psi L}\sqrt[3]{x^4}\sqrt{\frac{\left(1 - \frac{4m}{L}\right)[h_к + 0{,}5\,(r_1 + r_2)\, x Q_к Q]}{R_ф}}$$

или

$$Q = Q_к + \frac{m\sqrt{1 - \frac{4m}{L}}}{\psi L\sqrt{R_ф}}\sqrt[3]{x^4}\sqrt{h_к + 0{,}5\,(r_1 + r_2)\, x Q_к Q}.$$

Сделаем небольшие преобразования

$$(Q-Q_к)^2=\left(\frac{m\sqrt[3]{x^4}\sqrt{1-\frac{4m}{L}}}{\psi L\sqrt{R_ф}}\right)^2[h_к+0{,}5(r_1+r_2)xQ_кQ]=$$

$$=\left(\frac{m\sqrt[3]{x^4}\sqrt{1-\frac{4m}{L}}}{\psi L\sqrt{R_ф}}\right)^2 h_к+\left(\frac{m\sqrt[3]{x^4}\sqrt{1-\frac{4m}{L}}}{\psi L\sqrt{R_ф}}\right)^2 0{,}5(r_1+r_2)xQ_кQ.$$

Введем обозначения

$$\left(\frac{m\sqrt[3]{x^4}\sqrt{1-\frac{4m}{L}}}{\psi L\sqrt{R_ф}}\right)^2=A;\quad 0{,}5(r_1+r_2)xQ_к=B.$$

С учетом принятых обозначений последнее равенство

$$(Q-Q_к)^2=Ah_к+ABQ.$$

Возводя левую часть равенства в квадрат, после простых преобразований получим полное приведенное квадратное уравнение

$$Q^2-(2Q_к+AB)Q+(Q_к^2-Ah_к)=0.$$

Решение уравнения дает

$$Q=\frac{2Q_к+AB\pm\sqrt{(2Q_к+AB)^2-4(Q_к-Ah_к)}}{2}$$

или после небольших преобразований

$$Q=Q_к+0{,}5AB\pm0{,}5\sqrt{(AB)^2+4ABQ_к+4Ah_к}.$$

Как видно из уравнения, действительным будет только одно положительное решение, т. е.

$$Q=Q_к+0{,}5AB+0{,}5\sqrt{(AB)^2+4ABQ_к+4Ah_к}. \qquad (17)$$

Уравнение (17) представляет собой общее уравнение изменения количества воздуха по длине параллельных (вентиляционных) выработок.

При расчетах обычно приходится определять количество воздуха, которое нужно подавать на начало параллельных выработок, чтобы до конца доходило заданное $Q_к$. В этом случае $x=L$. Тогда

$$Q_н=Q_к+0{,}5AB+0{,}5\sqrt{(AB)^2+4ABQ_к+4Ah_к}, \qquad (18)$$

где значения A и B принимают вид

$$A=\left(\frac{m\sqrt[3]{L}\sqrt{1-\frac{4m}{L}}}{\psi\sqrt{R_ф}}\right)^2 \qquad B=0{,}5(r_1+r_2)LQ_к.$$

При расстояниях между просеками l больше 35—40 *м* пренебрежение величинами $(AB)^2$ и $\sqrt{1-\frac{4m}{L}}$ дает погрешность, не превышающую 3%. Исключая из формулы (18) величины $(AB)^2$ и $\sqrt{1-\frac{4m}{L}}$, имеем

$$Q_н = Q_к + 0{,}5AB + \sqrt{ABQ_к + Ah_к}, \qquad (19)$$

где

$$A = \left(\frac{m\sqrt[3]{L}}{\psi\sqrt{R_ф}}\right)^2 \qquad B = 0{,}5(r_1 + r_2)\,LQ_к.$$

Пример 1. Определить количество воздуха, которое нужно подавать на начало уклона, чтобы в конце его доходило $Q = 20$ *м*³/*сек*. Перепад давления через изолятор в конце параллельных выработок $h_к = 30$ *мм* вод. ст. Длина уклона и людского ходка при нем $L = 1000$ *м*. Поступающая и исходящая струи разделены ненарушенными целиками угля и шлакобетонными перемычками в просеках. Расстояние между просеками $l = 50$ *м*. Число перемычек в изоляторе $m = \frac{L}{l} = \frac{1000}{50} = 20$. Средняя площадь перемычки $S = 6{,}5$ *м*². Удельное сопротивление уклона и людского ходка

$$r_1 + r_2 = 2{,}5 \quad 10^{-5} k\mu.$$

Боковые породы — неустойчивые глинистые сланцы.

Решение. Находим по графику рис. 1 значение коэффициента ψ, соответствующее $S = 6{,}5$ *м*²,

$$\psi = 0{,}877.$$

Значение параметра $R_ф$ по табл. 1 равно 120 000.

Определяем для этих условий величины A и B

$$A = \left(\frac{m\sqrt[3]{L}}{\psi\sqrt{R_ф}}\right)^2 = \left(\frac{20\sqrt[3]{1000}}{0{,}877\sqrt{120\,000}}\right)^2 = 0{,}436;$$

$$B = 0{,}5(r_1 + r_2)\,LQ_к = 0{,}5 \cdot 2{,}5 \quad 10^{-5} \quad 1000 \cdot 20 = 2{,}5;$$

$$AB = 0{,}436 \quad 2{,}5 = 1{,}088.$$

По формуле (19)

$$Q_н = Q_к + 0{,}5AB + \sqrt{ABQ_к + Ah_к} = 20 + 0{,}5 \quad 1{,}088 + \\ + \sqrt{1{,}088 \quad 20 + 0{,}436 \cdot 30} = 26{,}45 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Потери воздуха составляют 6,45 *м*³/*сек* или

$$\frac{26{,}45 - 20}{20} 100 = 32{,}2\%.$$

Пример 2. Определить количество воздуха, которое необходимо подавать на начало системы параллельных выработок, при следующих условиях: длина параллельных выработок $L = 2500$ *м*, расстояние между просеками 100 *м*, в последних возведены чураковые перемычки площадью по 4,0 *м*² ($P = 8{,}32$ *м*), боковые породы — устойчивые песчаники, сечение этажного откаточного штрека 8 *м*² ($P = 11{,}75$ *м*), вентиляционного просека — 3,7 *м*² ($P = 8{,}0$ *м*), коэффициенты аэродинамического сопротивления выработок, соответственно 0,0016 и 0,0014; $Q_к = 5{,}0$ *м*³/*сек*, $h_к = 2{,}0$ *мм* вод. ст.

Решение. Число перемычек в изоляторе $m = \frac{2500}{100} = 25$.

Коэффициент ψ для $P = 8{,}32$ [см. формулу (2)]

$$\psi = \frac{9{,}30}{P} = \frac{9{,}30}{8{,}32} = 1{,}11.$$

По табл. 1 $R_ф = 120\,000$.

Определяем для этих условий величины A и B

$$A = \left(\frac{m\sqrt[3]{L}}{\psi\sqrt{R_ф}}\right)^2 = \left(\frac{25\sqrt[3]{2500}}{\sqrt{120\,000}}\right)^2 = 0{,}78;$$

$$B = 0{,}5\,(r_1 + r_2)\,LQ_к = 0{,}5\left(\alpha_0\frac{P_0}{S_0{}^3} + \alpha_в\frac{P_в}{S_в{}^3}\right)LQ_к =$$

$$= 0{,}5\left(0{,}0016\,\frac{11{,}75}{8^3} + 0{,}0014\,\frac{8}{3{,}7^3}\right)2500\quad 5 = 1{,}61;$$

$$AB = 0{,}78\quad 1{,}61 = 1{,}258.$$

По формуле (19)

$$Q_н = Q_к + 0{,}5AB + \sqrt{ABQ_к + Ah_к} = 5 + 0{,}5 \cdot 1{,}258 + \\ + 1{,}258 \cdot 5 + 0{,}78\quad 2 = 8{,}43\ м^3/сек.$$

Потери воздуха составляют 3,43 $м^3/сек$, или $\frac{3{,}43}{5{,}00}\,100 = 68{,}6\%$.

Пример 3. Определить потери воздуха на участке параллельных выработок для условий примера 2, но с возведением в каждой просеке двух перемычек, т. е.

$$R_ф = 2 \cdot 120\,000 = 240\,000.$$

Решение. Для этих условий

$$A = \left(\frac{m\sqrt[3]{L}}{\psi\sqrt{R_ф}}\right)^2 = \left(\frac{25\sqrt[3]{2500}}{1{,}11\sqrt{240\,000}}\right)^2 = 0{,}39.$$

Очевидно, $B = 1{,}61$ (см. пример 2).

$$AB = 0{,}39 - 1{,}51 = 0{,}629.$$

По формуле (19)

$$Q_н = Q_к + 0{,}5AB + \sqrt{ABQ_к + Ah_к} = 5 + 0{,}5 \cdot 0{,}629 + \\ + \sqrt{0{,}629\quad 5 + 0{,}39\quad 2} = 7{,}30\ м^3/сек.$$

Потери составляют 2,30 $м^3/сек$ или $\frac{2{,}30}{5{,}00}\,100 = 46\%$.

2. Подсчет депрессии в параллельных выработках

При наличии утечек воздуха подсчет депрессии производится по формуле

$$h = rLQ_р{}^2, \qquad (20)$$

где r — аэродинамическое сопротивление 1 *пог. м* выработки для параллельных выработок [см. формулу (15)];

L — длина выработки, *м*;

$Q_р$ — расчетное количество воздуха, $м^3/сек$.

Расчетное количество воздуха определяется, как известно, в зависимости от рода утечек и закона изменения последних по длине выработки, т. е. $Q = f(x)$.

Депрессия участка штрека длиной

$$dh = rdxQ^2 = r\,[f(x)]^2\,dx. \qquad (21)$$

Депрессия всего штрека или всего участка параллельных выработок

$$h = \int_0^L rQ^2 dx = r\int_0^L Q^2 dx = r\int_0^L [f(x)]^2 dx. \qquad (22)$$

Приравнивая правые части уравнений (21), (22) и решая равенство относительно $Q_р$, имеем

$$Q_р = \sqrt{\frac{\int_0^L Q dx}{L}} = \sqrt{\frac{\int_0^L [f(x)]^2 dx}{L}} \qquad (23)$$

Полученная ранее зависимость $Q = f(x)$ (рис. 2) вполне удовлетворительно описывается уравнением (7)

$$Q = Q_к + a\sqrt[3]{x^4}.$$

Определяем значение a из начальных условий. При $x = L$

$$Q = Q_н.$$

Следовательно,

$$Q_н = Q_к + aL^{4/3},$$

откуда

$$a = \frac{Q_н - Q_к}{L^{4/3}}.$$

Уравнение (7) принимает вид

$$Q = Q_к + \frac{Q_н - Q_к}{L^{4/3}} x^{4/3} \qquad (24)$$

Для получения расчетного количества воздуха определяем интеграл подкоренного выражения уравнения (23)

$$\int_0^L Q^2 dx = \int_0^L \left[Q_к + \frac{Q_н - Q_к}{L^{4/3}} x^{4/3}\right]^2 dx =$$

$$= \int_0^L \left[Q_к^2 + 2Q_к \frac{Q_н - Q_к}{L^{4/3}} x^{4/3} + \frac{Q_н - Q_к}{L^{8/3}} x^{8/3}\right] dx =$$

$$= Q_к^2 x + 2Q_к \frac{Q_н - Q_к}{L^{4/3}} \frac{x^{7/3}}{7/3} + \frac{(Q_н - Q_к)^2}{L^{8/3}} \frac{x^{11/3}}{11/3}\Bigg|_0^L =$$

$$= Q_к^2 L + 0{,}858 Q_к (Q_н - Q_к) L + 0{,}27 (Q_н - Q_к)^2 L =$$

$$= L[Q_к^2 + 0{,}858 Q_к (Q_н - Q_к) + 0{,}27 (Q_н - Q_к)^2].$$

После небольших преобразований

$$\int_0^L Q^2 dx = L(0{,}42 Q_к^2 + 0{,}31 Q_н Q_к + 0{,}27 Q_н^2).$$

Расчетное количество воздуха

$$Q_р = \sqrt{\frac{\int_0^L Q^2 dx}{L}} = \sqrt{0{,}42Q_к^2 + 0{,}31Q_нQ_к + 0{,}27Q_н^2}. \quad (25)$$

Округлив коэффициенты перед $Q_н$ и $Q_к$ до первого знака после запятой, получим приближенную формулу

$$Q_р = \sqrt{0{,}4Q_к^2 + 0{,}3Q_нQ_к + 0{,}3Q_н^2}. \quad (26)$$

Для определения расчетного количества воздуха в зависимости от закона изменения сопротивления воздухопровода предложены следующие формулы:

1) В. Н. Воронина [1]

$$Q_р = \sqrt{Q_нQ_к}; \quad (27)$$

2) формула среднего арифметического количества воздуха

$$Q_р = \frac{Q_н - Q_к}{2}; \quad (28)$$

3) Х. Бриггса [8]

$$Q_р = \sqrt{\frac{Q_н^2 + Q_нQ_к + Q_к^2}{3}}. \quad (29)$$

Каждой формуле (25), (27), (28), (29) соответствует следующий закон изменения количества воздуха по длине выработки:

1) $Q = Q_к \quad (Q_н - Q_к)\sqrt[3]{\left(\frac{x}{L}\right)^4}$; (30)

2) $Q = \frac{Q_кQ_нL}{Q_нL - x(Q_н - Q_к)}$; (31)*

3) $\frac{Ax^3}{L^3} = (3Q^2 - 2QQ_к - Q_к^2)\left[\frac{3(Q_к - Q)}{Q_к + 3Q}\right]^2$, (32)

где

$$A = (3Q_н^2 - 2Q_кQ_н - Q_к^2)\left[\frac{3(Q_к - Q_н)}{Q_к + 3Q_н}\right]^2;$$

4) $Q = Q_к + \frac{Q_н - Q_к}{L}x$. (33)

По этим формулам построены кривые изменения количества воздуха по длине выработки при величине потерь 25% (рис. 6) для определенных значений Q и L. Кроме того, для более наглядного сравнения формул (27)—(29) с формулой (25) нами построены графики погрешностей при вычислении депрессии в зависимости от величины утечек воздуха. На графике рис. 7 по оси абсцисс откладывались величины утечек воздуха в процентах от $Q_к$, а по оси ординат — величина λ', которая показывает на сколько процентов депрессия, вычисленная по одной из

* Формулы (31) и (32) получены В. Д. Карпухиным соответственно из формул (27) и (28).

формул, отличается от депрессии, подсчитанной по $Q_{р(25)}$ по формуле (25), т. е.

$$= \frac{rLQ_р - rLQ_{р(25)}}{rLQ_{р(25)}} 100\%.$$

Как видно из графиков, при определении депрессии в параллельных выработках максимальную погрешность дают формулы Х. Бриггса

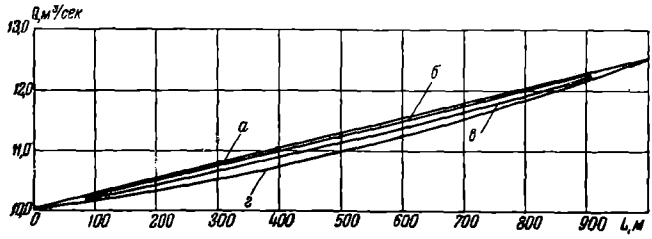


Рис. 6. Изменение количества воздуха по длине выработки при величине потерь 25%:
а — по Х. Бриггсу; *б* — по среднему арифметическому; *в* — по В. Н. Воронину; *г* — по формуле (18)

и среднего арифметического закона. Кривые изменения количества воздуха по длине выработки, соответствующие этим формулам, имеют наибольшее отклонение от действительной картины. С ростом утечек воз-

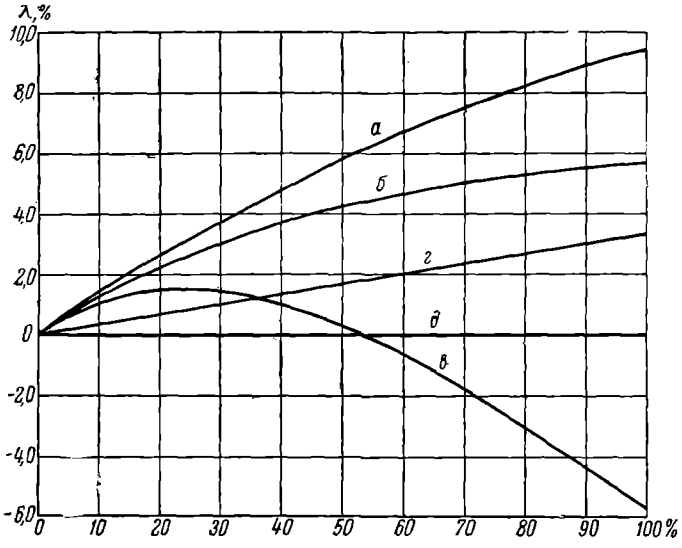


Рис. 7. Погрешности вычисления депрессии в параллельных выработках по различным формулам в зависимости от величины потерь воздуха:
а — по Х. Бриггсу; *б* — по среднему арифметическому; *в* — по В. Н. Воронину; *г* — по формуле (25); *д* — по формуле (26)

духа эти отклонения, а следовательно, и погрешности вычисления депрессии возрастают.

При подсчете депрессии в параллельных выработках по формуле В. Н. Воронина погрешность не превышает 1,5%, при величине утечек до 60%, а затем начинает резко возрастать. При подсчете депрессии

по упрощенной формуле (26) погрешность медленно возрастает с ростом утечек, при величине потерь до 30% она не превышает 1%.

Как установлено нашими исследованиями, при удовлетворительном состоянии перемычек потери воздуха в параллельных выработках длиной до 1000 *м* не превышают в среднем 30—40%, поэтому формулу В. Н. Воронина можно считать равноценной формуле (25), хотя первая и получена для трубопроводов с постоянным аэродинамическим сопротивлением утечкам воздуха. Для подсчета депрессии в параллельных выработках можно рекомендовать для практического пользования формулу В. Н. Воронина как наиболее простую. При значительных потерях воздуха в параллельных выработках, а также при необходимости более точного подсчета следует пользоваться формулой (25).

3. Аэродинамическое сопротивление изоляторов

Величина сопротивления изолятора, через который происходят утечки воздуха в параллельных выработках, как отмечалось выше, зависит от типа перемычек, их параметров, тщательности выполнения и расстояния между просеками (перемычками), а также от состояния и размеров целиков угля (бутовых полос) и состояния боковых пород.

Просачивания воздуха через ненарушенные целики, как показали наши исследования, практически не происходит, поэтому ширина целиков не оказывает влияния на величину сопротивления изолятора. При нарушенных целиках угля или бутовых полосах количество просачивающегося воздуха зависит как от степени нарушенности целиков и качества возведения бутовых полос, так и от размеров последних. Основные же потери воздуха в параллельных выработках происходят через перемычки независимо от того, возведены ли последние в ненарушенных или нарушенных целиках, или в бутовых полосах.

Возведение перемычек в просеках производится обычно по мере проходки выработок, а на штреках между уклонами (бремсбергами) и людскими ходками, между главными и вспомогательными наклонными стволами — по мере отработки лав, этажей и переходе на нижние горизонты. Разница в возрасте соседних перемычек может быть от нескольких недель до 1—2 и более лет. С течением времени в результате горного давления и процессов выветривания образуются трещины в боковых породах и целиках угля, нарушается герметичность по периметру перемычек, увеличивается воздухопроницаемость и самих перемычек (растрескивание чураков в сухих выработках, гниение дерева, высыхание глины в чураковых и каменных перемычках, растрескивание бутои шлакобетонных перемычек и т. д.).

Такое постепенное увеличение воздухопроницаемости перемычек как вентиляционных сооружений происходит непрерывно. Периодическая обмазка глиной или цементным раствором только до некоторой степени компенсирует их общее постепенное снижение сопротивления. Следовательно, чем позднее перемычка возведена, т. е. чем дальше она находится от начала выработки (например, от околоствольного двора), тем сопротивление ее больше при прочих равных условиях.

Изменение количества воздуха по длине параллельных выработок, как показано выше, происходит по плавным вогнутым кривым, поэтому для характеристики аэродинамических свойств изолятора могут быть приняты два показателя: 1) удельное сопротивление r' (сопротивление полосы изолятора шириной 1 *пог. м*, расположенной перпендикулярно выработкам), если рассматривать потери воздуха непрерывно

распределенными по длине изолятора; 2) сопротивление перемычек R, если рассматривать потери сосредоточенными только в перемычках.

Для определения величины удельного сопротивления r' необходимо знать количество воздуха ρ, просачивающегося через 1 *пог. м* изолятора и депрессию h, за счет которой происходит это просачивание. При известных значениях ρ и h

$$r' = \frac{h}{\rho^2} \qquad (34)$$

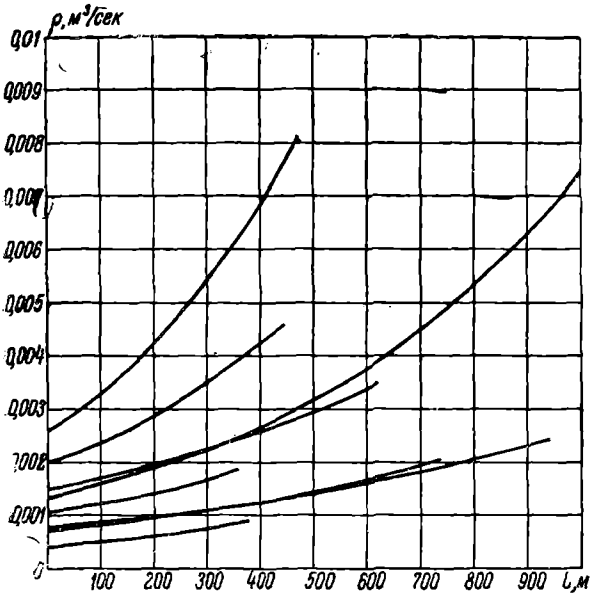


Рис. 8. Изменение количества просачивающегося воздуха через 1 *пог. м* изолятора по длине параллельных выработок

Чтобы определить вид функции $r'(x)$, надо знать функции $\rho(x)$ и $h(x)$.

Как установлено ранее, наиболее точно закон изменения количества воздуха по длине параллельных выработок отражает формула (4).

Если потери воздуха через изолятор на длине dx равны dQ, то количество просачивающегося воздуха через 1 *пог. м* изолятора

$$\rho = \frac{dQ}{dx} = \frac{d(Me^{Nx} + F)}{dx} = MNe^{Nx} \qquad (35)$$

Подставив в формулу (35) значения параметров M и N для данных выработок и задаваясь значениями x, получим соответствующие этим расстояниям (от конца параллельных выработок) количества просачивающегося воздуха ρ через 1 *пог. м* изолятора. По значениям ρ для данных x строились графики $\rho = f(x)$ (рис. 8) Изменение перепада давления через изолятор по длине параллельных выработок получено непосредственными замерами.

Взяв для данных выработок из соответствующих графиков значения ρ и h при определенных x, по формуле (34) находим величину r'. Таким образом получаем несколько пар значений $r'x - x$, по которым и строились графики $r' = f(x)$ (рис. 9).

Пусть на расстоянии x от конца выработок изолятором является целик угля, удельное сопротивление равно r' На расстоянии же $x + 1$ *м* изолятором служит уже перемычка и удельное сопротивление равно r_1' Очевидно r_1' отличается от r' на весьма малую величину, хотя аэродинамические свойства целика и перемычки довольно различны.

Следовательно, хотя удельное сопротивление является показателем несколько условным, но можно считать, что оно вполне объективно характеризует общие аэродинамические свойства данного изолятора.

Для определения зависимости $R = f(x)$, т. е. изменения сопротивления перемычек по длине параллельных выработок, необходимо знать количество воздуха, просачивающееся через каждую перемычку и депрессию, за счет которой происходит это просачивание.

Количество воздуха, просачивающееся через 1 *пог. м* изолятора на расстоянии x от конца параллельных выработок, определится по формуле (35). Очевидно, потери воздуха на участке параллельных выработок длиной Δx будут равны определенному интегралу от функции $\rho(x)$ в пределах от x_1 до x_2, причем $\Delta x = x_2 - x_1$

$$q = \int_{x_1}^{x_2} \rho(x)\, dx = \int_{x_1}^{x_2} MNe^{Nx} = Me^{Nx_2} - Me^{Nx_1}. \qquad (36)$$

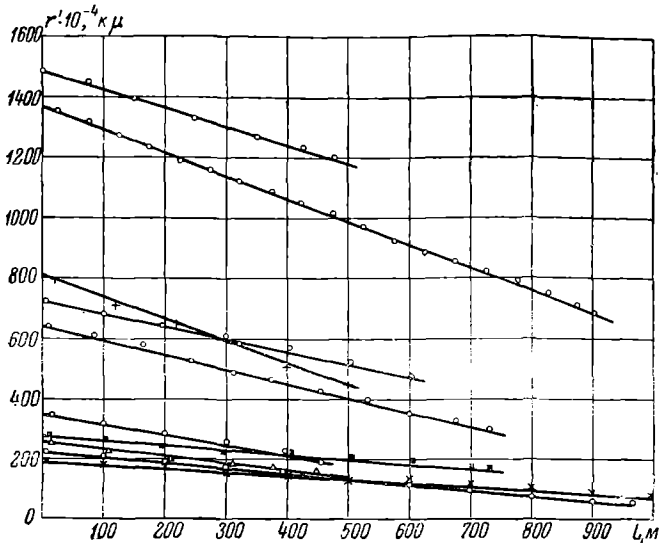


Рис. 9. Изменение величины удельного сопротивления изолятора по длине параллельных выработок

Так, потери воздуха на участке выработок длиной l_1, т. е. потери через перемычку *1* (рис. 10)

$$q_1 = M - Me^{NL_1}.$$

Потери воздуха на участке $L_2 - L_1 = l_2$, т. е. через перемычку *2*

$$q_2 = Me^{NL_2} - Me^{NL_1}.$$

Потери на участке $L_3 - L_2 = l_3$, т. е. через перемычку *3*

$$q_3 = Me^{NL_3} - Me^{NL_2} \text{ и т. д.}$$

Депрессия h_1, за счет которой происходит просачивание воздуха через перемычку *1*, находится по соответствующей кривой $h = f(x)$ при $x_1 = \frac{l_1}{2}$

Депрессия h_2, за счет которой происходит просачивание воздуха через перемычку *2*, берется из того же графика $h = f(x)$ при $x_2 = L_1 + \frac{l_2}{2}$, а депрессия h_3 при $x_3 = L_2 + \frac{l_3}{2}$ и т. д.

Сопротивление перемычки *1* $R_1 = \frac{h_1}{q_1^2}$ перемычки *2* $R_2 = \frac{h_2}{q_2^2}$, перемычки *3* $R_3 = \frac{h_3}{q_3^2}$ и т. д. По полученным значениям $R(x) - x$ построены графики $R = f(x)$ (рис. 11).

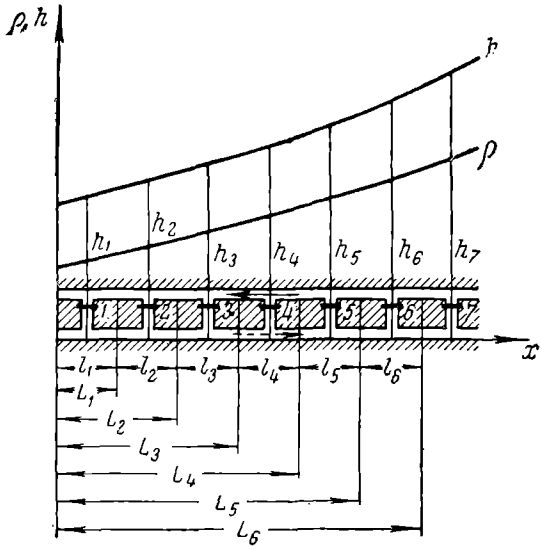


Рис. 10. См. пояснение в тексте

Чтобы избежать погрешностей при вычислении удельных сопротивлений перемычек, графики $r' = f(x)$ и $R = f(x)$ строятся в основном только для тех исследованных нами параллельных выработок, сечения которых более или менее постоянны на всем протяжении и закреплены одним видом крепи ($\alpha = \text{const}$).

Из приведенного графического материала видно, что как изменение удельного сопротивления, так и изменение сопротивления перемычек по длине параллельных выработок, подчиняются в основном линейному закону, уменьшаясь по мере удаления от конца выработки (т. е. по мере приближения к стволу) или увеличения их возраста.

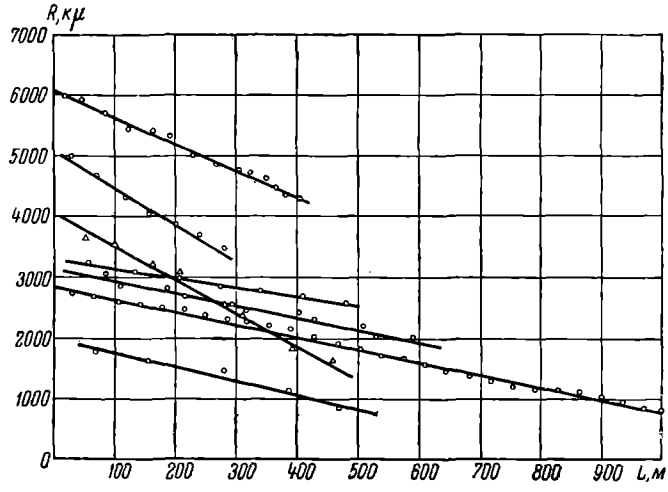


Рис. Изменение сопротивления перемычек по длине параллельных выработок

4. Основное уравнение распределения потерь воздуха по длине параллельных выработок

Все работы, посвященные потерям воздуха в параллельных выработках как отечественные, так и зарубежные [9], носят теоретический характер. Не подкрепленные экспериментальными данными полученные

в них выводы не могли быть использованы на практике. Так, для определения величины потерь воздуха по полученным формулам необходимо было во многих случаях опытным путем определять некоторые исходные данные.

Большинством авторов недостаточно обоснованно принимался ламинарный закон просачивания воздуха через перемычки [6, 7].

К. З. Ушаков рассматривает также и случай, когда просачивание воздуха через целики и перемычки происходит по квадратичному закону, а аэродинамическое сопротивление изолятора постоянно по всей длине. При этом он исходит из предположения, что данный случай может иметь место только при сильно нарушенных целиках и весьма плохих перемычках.

Таким образом, проводившиеся до сих пор теоретические исследования утечек воздуха в параллельных выработках не отражают истин-

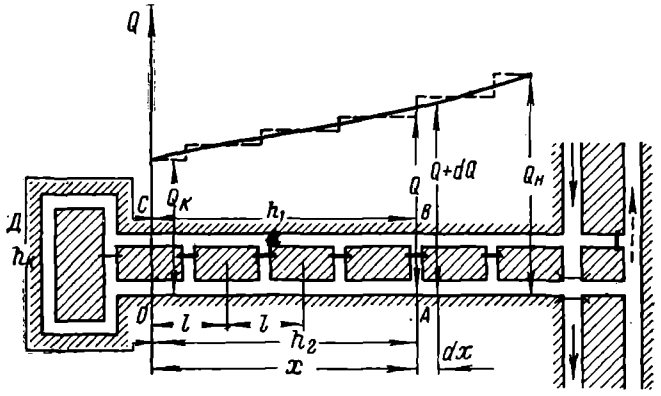


Рис. 12. См. пояснение в тексте

ного характера процесса, имеющего место в действительности, т. е. квадратичного закона просачивания воздуха через перемычки в шахтных условиях и линейного закона изменения сопротивления изолятора по длине выработок.

Потери воздуха в параллельных выработках, независимо от типа изолятора, как принимали это и ранее, будем считать сосредоточенными только в перемычках.

Количество воздуха, просачивающееся через одну перемычку

$$q = \sqrt{\frac{h}{R}}, \tag{37}$$

где h — перепад давления через перемычку;
R — сопротивление перемычки.

Потери воздуха, приходящиеся на 1 *пог. м* изолятора

$$p = \frac{q}{l} = \frac{1}{l}\sqrt{\frac{h}{R}}, \tag{38}$$

где l — длина одного целика и одной перемычки или расстояние между центрами соседних целиков, *м* (рис. 12).

При ненарушенных целиках угля утечки происходят только через перемычки. Несмотря на это, для подавляющего большинства

параллельных выработок зависимость $Q = f(x)$ изображается плавными вогнутыми кривыми. Поэтому можно написать

$$\rho = \frac{dQ}{dx}, \tag{39}$$

где dQ — изменение количества воздуха на длине выработки.

Отсюда

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{1}{l}\sqrt{\frac{h}{R}} \tag{40}$$

Перепад давления h через изолятор между точками A и B

$$h = h_1 + h_2 + h_3,$$

где h_1, h_2, h_3 — депрессии соответственно воздухоподающей, вентиляционной и СДО выработок длиной x;

$$h_3 = h_к.$$

Депрессию выработок подсчитываем по формуле (25)

$$h_1 = r_1 x\,(0{,}42Q_к^2 + 0{,}31Q_кQ_н + 0{,}27Q_н^2), \tag{41}$$

$$h_2 = r_2 x\,(0{,}42Q_к^2 + 0{,}31Q_кQ_н + 0{,}27Q_н^2), \tag{42}$$

где r_1 и r_2 — удельные сопротивления воздухоподающей и вентиляционной выработок.

Сопротивления перемычек по длине параллельных выработок изменяются по линейному закону

$$R = \gamma - \alpha x, \tag{43}$$

где γ и α — постоянные параметры.

Определяем γ и α из начальных условий.

При $x = 0$

$$R = R_к$$

и при $x = L$

$$R = R_н,$$

т. е.

$$\gamma = R_к, \quad \alpha = \frac{R_к - R_н}{L}.$$

Тогда

$$R = R_к - \frac{R_к - R_н}{L}x. \tag{44}$$

Подставляя значения h_1, h_2, $h_к$ и R в уравнение (40), получим

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{1}{l}\sqrt{\frac{(r_1 + r_2)\,x\,(0{,}42Q_к^2 + 0{,}31Q_кQ_н + 0{,}27Q_н^2 + h_к)}{R_к - \frac{R_к - R_н}{L}x}}. \tag{45}$$

Уравнение (45) представляет в дифференциальной форме зависимость количества проходящего по выработке воздуха Q от расстояния до конца выработок, т. е. забоя. Точное решение этого дифференциального уравнения в элементарных функциях невозможно. Если подсчитать депрессию выработок по формуле В. Н. Воронина, то уравнение (40) примет следующий вид

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{1}{l}\sqrt{\frac{(r_1 + r_2)\,xQ_кQ + h_к}{R_к - \frac{R_к - R_н}{L}x}}. \tag{46}$$

Хотя данное уравнение несколько проще уравнения (45), точное его решение в элементарных функциях также невозможно.

Для проверки качества формулы (18) произведено численное интегрирование дифференциальных уравнений (45) и (46) при определенных исходных данных. Затем для этих же данных по формуле (18) подсчитаны $Q_н$ и значения Q при нескольких значениях x.

Погрешности в вычислениях количества воздуха по формуле (18) по сравнению с уравнением (45) не превышают 1,5%, т. е. дифференциальное уравнение (45) и формулу (18) можно считать равноценными. Погрешности при вычислениях Q по приближенному уравнению (45) также незначительны (2,0—3,0%)

Выводы

1. Изменение количества воздуха по длине параллельных выработок, т. е. зависимость $Q = f(x)$ имеет вид вогнутой кривой и может быть представлена формулой (18), позволяющей рассчитать потери воздуха в параллельных выработках с учетом параметров вентиляционной сети и изолятора.

При расстояниях между просеками более 35—40 *м* с точностью 2—3% можно рекомендовать формулу (19) как наиболее простую.

2. Расчетное количество воздуха, а следовательно, и депрессия в параллельных выработках определяются экспериментально полученной формулой (25).

3. Как удельное аэродинамическое сопротивление изолятора, так и сопротивление перемычек по длине выработок изменяются по линейному закону, уменьшаясь от конца к началу выработок.

4. Дифференциальное уравнение (45), отражающее действительную картину распределения потерь воздуха по длине изолятора в элементарных функциях не разрешимо. Формула (18) и дифференциальное уравнение (45) равноценны, поэтому формулой (18) можно пользоваться при любых расчетах потерь воздуха в параллельных выработках.

Результаты шахтных исследований показали, что при проводившихся до сих пор теоретических исследованиях утечек воздуха в параллельных выработках некоторые исходные данные принимались необоснованно и являются ошибочными, следовательно, предлагаемые в них формулы не могут быть использованы при расчетах.

Использованная литература

1. Воронин В. Н. Основы рудничной аэро-газодинамики. Углетехиздат, 1951.
2. Ксенофонтова А. И. К вопросу о проветривании глухих выработок большого протяжения и выемочных участков в шахтах Донбасса при отработке шахтных полей от границ к стволам. Уголь, 1953, № 6.
3. Патрушев М. А. Исследование потерь воздуха в параллельных выработках. Сб. научных работ Молотовского горного ин-та, 1957, № 2.
4. Уорсинг А. и Геффнер Дж. Методы обработки экспериментальных данных. ИЛ, 1949.
5. Цуккерман М. Л. Эмпирические формулы. Энергоиздат, 1951.
6. Швырков А. И. О потерях воздуха при вентиляции рудников «Безопасность труда в горной промышленности», 1933, № 10.
7. Шекалев Г. Е. Сравнение схем вентиляции шахт Подмосковного бассейна. Изд. Центр. ин-та техн. информации, 1954.
8. Briggs H. Coll. Engineering, 1931, March.
9. Mancha R. The Coll. Guardian, 1941, № 4176.