Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXVIII, вып. 1, 1959 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КРУГЛЫХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

П. И. Мустель

В шахтных стволах, в отличие от других горных выработок, вентиляционное сопротивление которых обусловлено шероховатостью стенок, сопротивление создается не только стенками ствола, но и армировкой, расположенной непосредственно в живом сечении воздушного потока, движущегося по стволу.

Длительное экспериментальное изучение коэффициентов вентиляционного сопротивления α стволов, проводившееся отечественными исследователями в течение последних двадцати лет, вызвано стремлением наиболее полно изучить сложный вопрос сопротивления стволов с тем, чтобы дать угольным предприятиям и проектным организациям способ возможно более точного предварительного расчета депрессии, теряемой вентиляционной струей. В настоящее время, когда проходятся и проектируются стволы глубиной 1000—1200 *м*, вопрос о более точном расчете депрессии становится еще более актуальным, так как в стволах теряется значительная часть общешахтной депрессии.

Многочисленные опыты по определению коэффициентов α стволов были проведены в 1938 г. В. Б. Комаровым, А. А. Гескиным и П. И. Мустелем. Исследование производилось в круглой аэродинамической трубе Ленинградского горного института диаметром 1,2 *м* при числах Рейнольдса 600 000—1 000 000. Модели расстрела представляли собой брусья прямоугольного профиля.

В 1945—1948 гг. Ф. А. Абрамов в Днепропетровском горном институте в трубе диаметром 0,8 *м* также произвел исследование сопротивления шахтных стволов при прямоугольном профиле расстрелов и числах Рейнольдса 300 000—1 000 000.

В 1946—1953 гг. нами в Ленинградском горном институте были проведены опыты по определению коэффициентов α стволов в малых моделях (диаметром 0,05 *м*) при числах Рейнольдса 2000—80 000, длине начального участка равной $8d$ и рабочем участке $10d$. Были взяты расстрелы прямоугольного сечения. Несколько опытов было, кроме того, проведено в трубе диаметром 0,2 *м*, армированной расстрелами прямоугольного и двутаврового профиля при числах Рейнольдса 40 000—160 000.

В 1950—1951 гг. А. А. Скочинский, А. И. Ксенофонтова, А. А. Харев и И. Е. Идельчик [1] в Московском горном институте в трубе диаметром 0,5 *м* определяли коэффициент α стволов при максимальном приближе-

нии моделей к натуре. Расстрелы применялись двутаврового профиля, числа Рейнольдса изменялись в пределах 200 000—650 000.

В настоящей работе дается обобщение результатов всех известных опытов по определению α стволов и предлагаются эмпирические формулы, значительно более простые, чем существующие теоретические методы; приводится также методика подсчета коэффициентов α по теоретическим формулам, разработанная автором и проверенная сравнением результатов подсчета с замерами.

1. Эмпирические формулы

На рис. 1 изображены результаты некоторых опытов, проведенных нами (при $\lg Re$ от 0,3 до 5,5), Ф. А. Абрамовым, В. Б. Комаровым и др. (при $\lg Re$ от 5,5 до 6) при армировании стволов расстрелами прямоугольного профиля. На этом же рисунке схематически показано расположение расстрелов в изучавшихся стволах. Коэффициент α, как видно

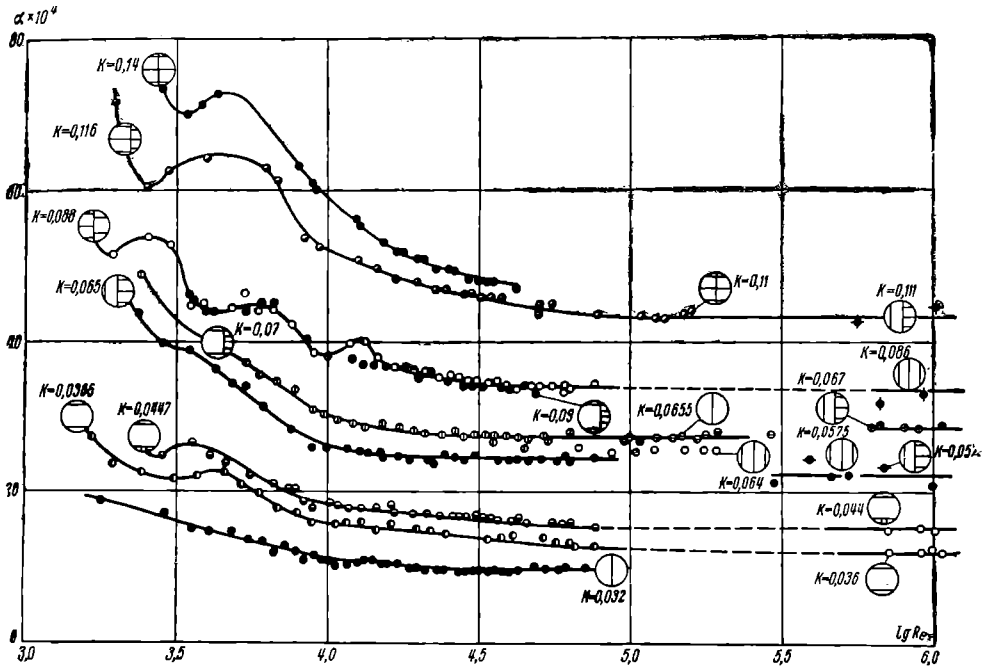


Рис. 1. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления стволов от числа Рейнольдса в круглых армированных шахтных стволах

по характеру кривых, зависит от числа Рейнольдса приблизительно лишь до $Re = 30\,000$, область же больших чисел Re автомодельна. Это приводит к заключению о возможности использования для вывода эмпирических формул не только исследований, проведенных при высоких значениях Re, но также и при Re, лежащих в пределах от 30 000 до 80 000. Кроме того, из приведенного графика следует, что во многих случаях стволы, имеющие различную армировку, обладают равным коэффициентом вентиляционного сопротивления α.

Таким образом, следует предположить, что для армированных стволов можно найти параметр K, включающий некоторые характерные величины, определяющие значение коэффициента α (величина K при разных армировках приведена на рис. 1).

Анализ существующих опытных данных позволил принять в качестве искомого безразмерного параметра выражение

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{i} S_м \left(1 - \frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{lD^3}} \frac{S^3}{S_1^3}, \qquad (1)$$

где $S_м$ — миделево сечение, $м^2$;

y — расстояние от центра ствола до центра тяжести расстрела, $м$;

S — площадь поперечного сечения ствола в свету крепи, $м^2$;

$S_1 = S - S_{л.о}$ ($S_{л.о}$ — площадь, занимаемая лестничным отделением), $м^2$;

l — расстояние между расстрелами по оси ствола, $м$;

D — диаметр ствола, $м$.

Выражение $\left(1 - \frac{y}{R}\right)^n$ было введено впервые И. Е. Идельчиком [1] и Ф. А. Абрамовым [2] для учета влияния на коэффициент α местоположения расстрелов в поперечном сечении ствола. Показатель n принят нами, по И. Е. Идельчику, равным $\frac{1}{3}$.

На рис. 2, *а* приведены результаты опытов по определению коэффициентов α круглых стволов в зависимости от значения параметра K при армировании их расстрелами прямоугольного профиля. Несмотря на то, что обычно применяемые расстрелы изготовляются из двутавровых балок, эти исследования представляют несомненный практический интерес, так как переход на армирование стволов расстрелами прямоугольного профиля за счет заделывания пространства между полками двутавров деревом или железом целесообразно, и его можно рассматривать как один из простых и действенных способов снижения коэффициентов α. Вследствие того, что все работы выполнены в аэродинамических трубах, стенки которых менее шероховаты, чем бетонные или бетонитовые стенки шахтных стволов, коэффициенты α, приведенные в графике, увеличены на разность

$$\Delta\alpha = \alpha_{бет} - \alpha_{гл},$$

где $\alpha_{бет}$ — коэффициент α бетонного ствола в натуре, принятый равным 0,0004;

$\alpha_{гл}$ — коэффициент α гладких аэродинамических труб, в которых производились исследования.

Как видно из графика, зависимость между α и K линейная и удовлетворяет уравнению

$$\alpha = 0{,}042 \frac{\sum_{i=1}^{i} S_м \left(1 - \frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{lD^3}} \frac{S^3}{S_1^3}. \qquad (2)$$

Этим же способом найдено выражение для подсчета коэффициентов α круглых бетонированных стволов при армировании их расстрелами двутаврового профиля. График зависимости $\alpha = f(K)$ построен на рис. 2, *б* по работам А. А. Скочинского и сотрудников кафедры вентиляции МГИ [1], проведенным в круглой аэродинамической трубе диаметром 0,5 $м$ и в натуре на шахтах Донбасса (точки, отмеченные крестиками). Здесь же отмечена опытная точка, полученная В. Б. Комаровым

и А. А. Гескиным в трубе диаметром 1,2 *м* (1938 г.). Показаны также результаты замеров α, произведенных нами в трубе диаметром 0,2 *м* и в шахтах Донбасса в 1956 г. Прямая, выражающая зависимость α от K, в этом случае удовлетворяет уравнению

$$\alpha = 0{,}051 \frac{\sum_{i=1}^{i} S_м \left(1 - \frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{lD^3}} \frac{S^3}{S_1^3} \qquad (3)$$

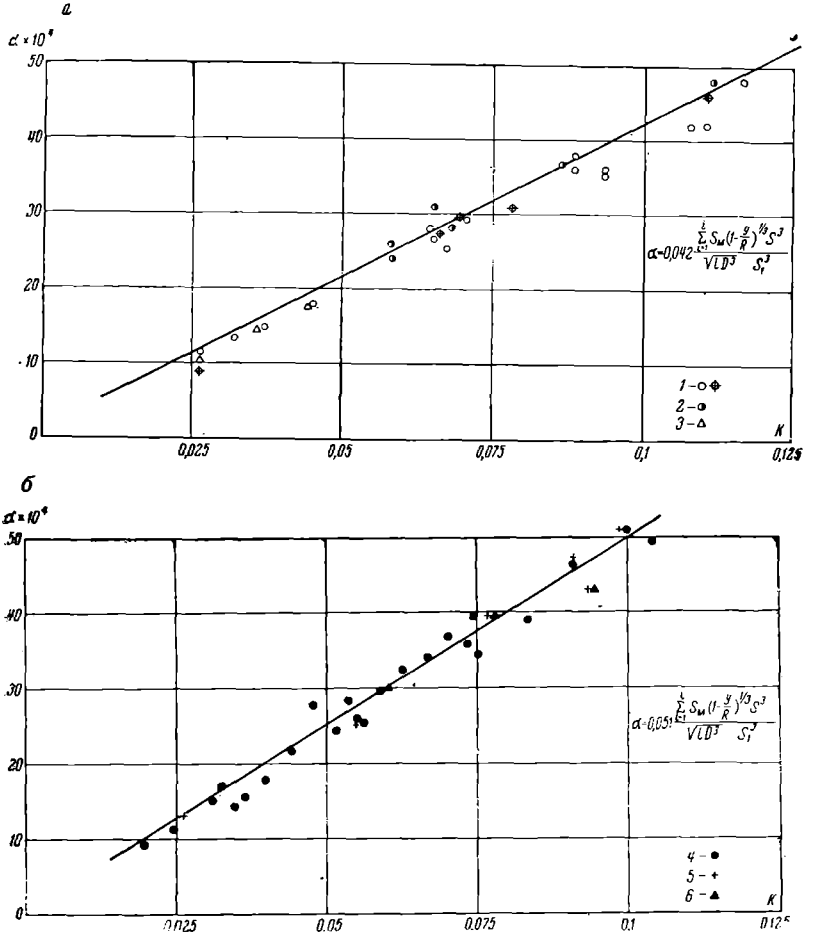


Рис. 2. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления стволов от K при профиле расстрела:

а — прямоугольном; *б* — двутавровом; *1* — по П. И. Мустелю; *2* — Ф. А. Абрамову; *3* — В. Б. Комарову; *4* — А. А. Скочинскому, А. И. Ксенофонтовой и др.; *5* — В. Б. Комарову, А. А. Гескину и др.; *6* — П. И. Мустелю

Поскольку в настоящее время расстрелы изготовляются, как правило, из балок двутаврового профиля, в качестве расчетной нами рекомендуется формула (3). Из сопоставления постоянных коэффициентов формул (2) и (3) видно, что при армировании стволов расстрелами прямоугольного профиля коэффициент α уменьшается в $\frac{0{,}051}{0{,}042} = 1{,}215$ раза, т. е. на 21,5%.

Подсчет коэффициентов α по формуле (3) несложен. Вначале вычисляется площадь миделева сечения каждого расстрела как произведение

его длины b на ширину полки расстрела d_0, а затем по чертежу определяется расстояние от центра тяжести расстрела до центра ствола y и решается выражение $\left(1-\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{3}}$ Полученное выражение умножается на $S_м$ расстрела и произведения суммируются.

Так как характер расположения расстрелов в шахтных стволах не отличается большим разнообразием, есть основание предположить, что величина $\left(1-\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{3}}$ меняется в нешироких пределах и, следовательно, формулы (2) и (3) для приближенных расчетов можно упростить, исключив из них выражение $\left(1-\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{3}}$ и заменив постоянные коэффициенты 0,042 и 0,051 другими. Тогда

$$\alpha = K\frac{\sum S_м}{\sqrt{lD^3}}\frac{S^3}{S_1^3} \tag{4}$$

Приравняв правые части равенств (3) и (4) и решив равенство относительно K, после сокращений получим

$$K = 0{,}051\frac{\sum_{i=1}^{i} S_м\left(1-\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{3}}}{\sum S_м}$$

Для всех типов стволов, предложенных Южгипрошахтом в 1956 г., нами были подсчитаны значения

$$\sum S_м \text{ и } \sum_{i=1}^{i} S_м\left(1-\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{3}}$$

и взяты отношения

$$\frac{\sum_{i=1}^{i} S_м\left(1-\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{3}}}{\sum S_м}. \tag{5}$$

Величина этого отношения изменяется от 0,75 до 0,83 и в среднем для 24 типовых стволов равна 0,79. Следовательно,

$$K = 0{,}051 \cdot 0{,}79 = 0{,}04.$$

Тогда упрощенная формула для подсчета коэффициента α круглых шахтных стволов с бетонными стенками, армированных расстрелами двутаврового профиля,

$$\alpha = 0{,}04\frac{\sum S_м}{\sqrt{lD^3}}\frac{S^3}{S_1^3}. \tag{6}$$

При армировании стволов расстрелами прямоугольного профиля

$$K = 0{,}042 \cdot 0{,}79 = 0{,}033$$

и

$$\alpha = 0{,}033\frac{\sum S_м}{\sqrt{lD^3}}\frac{S^3}{S_1^3}. \tag{7}$$

Подсчет коэффициентов α по упрощенным формулам крайне несложен, а отклонения получаемых по ним результатов от значений α, подсчитанных по более точным формулам (2) и (3), не превышает 5%. Эти формулы позволяют не только подсчитать коэффициент α, но и с достаточной для практики точностью производить количественную оценку некоторых мероприятий, направленных на снижение коэффициентов α стволов, например, за счет увеличения расстояния между расстрелами l, уменьшения миделевых сечений расстрелов и др. Безразмерные выражения

$$\frac{\sum S_м}{\sqrt{lD^3}} \frac{S^3}{S_1^3} \quad \text{и} \quad \frac{\sum_{i=1}^{i} S_м \left(1-\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{lD^3}} \frac{S^3}{S_1^3}$$

можно назвать критериями геометрического подобия, так как при их равенстве в стволах, отличных по расположению расстрелов, коэффициенты α равны.

При креплении стенок шахтных стволов железобетонными тюбингами аэродинамическое сопротивление их, по нашим замерам, возрастает по сравнению с гладкими бетонными стенками с 0,0004 до 0,0012, т. е. на 0,0008. Поэтому при подсчете по формулам (3) или (6) коэффициентов α стволов, закрепленных железобетонными тюбингами, полученный результат необходимо увеличивать на 0,0008.

2. Теоретический метод подсчета

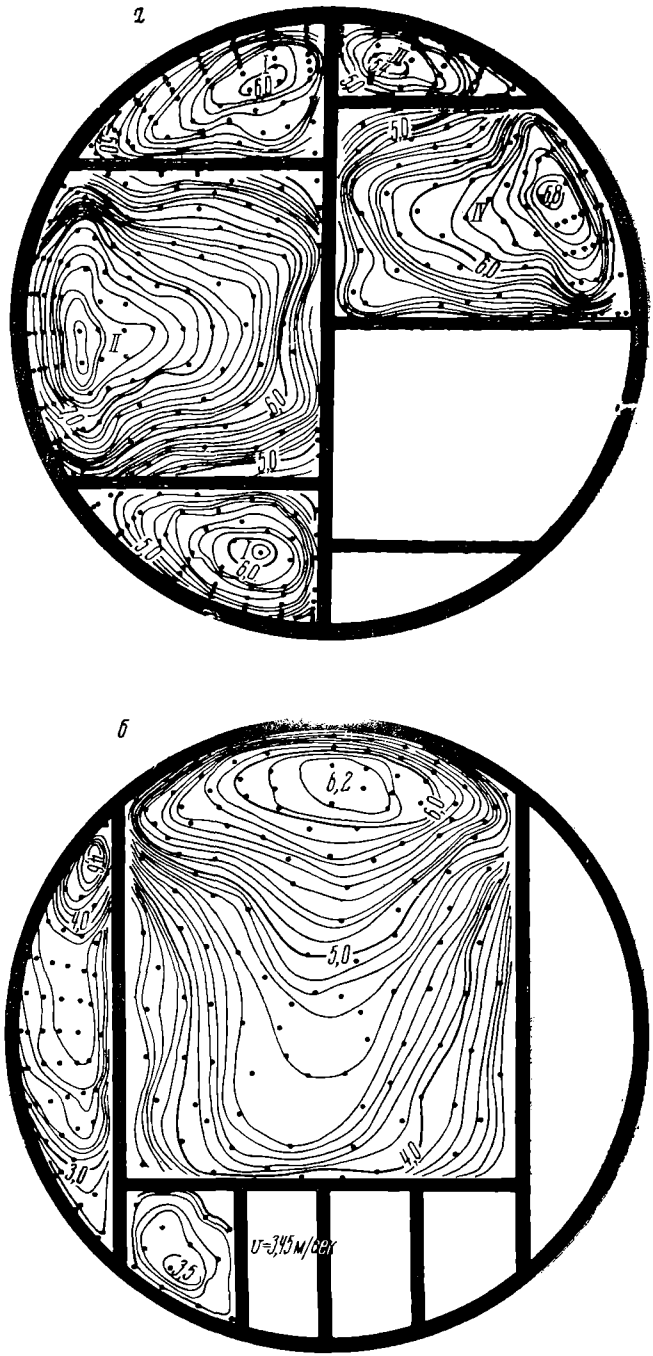
Величина коэффициентов α шахтных стволов определяется лобовым сопротивлением расстрелов, трением воздуха о стенки стволов и потерями за счет внезапного расширения воздушной струи при срыве ее с расстрелов. Влияние каждого из этих факторов на величину коэффициента α стволов различно. Так, по нашим подсчетам основное воздействие оказывает лобовое сопротивление, доля участия которого в формировании коэффициента α оценивается в 70—85%. Влияние сопротивления трения о стенки при бетонном креплении выражается в 5—20% от общего сопротивления и влияние сопротивления за счет внезапных расширений — 10%.

Способы подсчета каждого из этих сопротивлений известны, и мысль исследователей направлена на создание метода одновременного и наиболее полного учета всей совокупности сопротивлений в их взаимосвязи.

Первой по времени была в 1933 г. предложена формула И. А. Швыркова, состоящая из трех слагаемых, из которых каждое учитывает свой вид сопротивления (лобовое, расширение, трение) Эта формула не нашла широкого распространения.

В 1950 г. В. Д. Карпухин [4] вывел формулу, также состоящую из трех слагаемых, учитывающих три вида сопротивлений, но несколько отличную, так как он принимал площадь поперечного сечения ствола в свету бетонной крепи, а И. А. Швырков — в свету армировки.

Наконец, в 1953 г. была опубликована формула И. Е. Идельчика, состоящая из двух слагаемых [1]. Она учитывает лобовое сопротивление, сопротивление расширения, взаимное влияние расстрелов, влияние местоположения каждого расстрела в поперечном сечении ствола, влияние наличия лестничного отделения и сопротивления трению. Все формулы выведены для условия движения воздуха по стволу единым потоком. При этом, как и для случая движения воздуха в гладких трубопроводах, принимается параболический профиль скоростей.


г
6,0
5,0
II
IV
6,0
5,0
5,0
5,0
6,0
б
6,2
6,0
5,0
4,0
4,0
3,0
3,5
U=3,45 м/сек

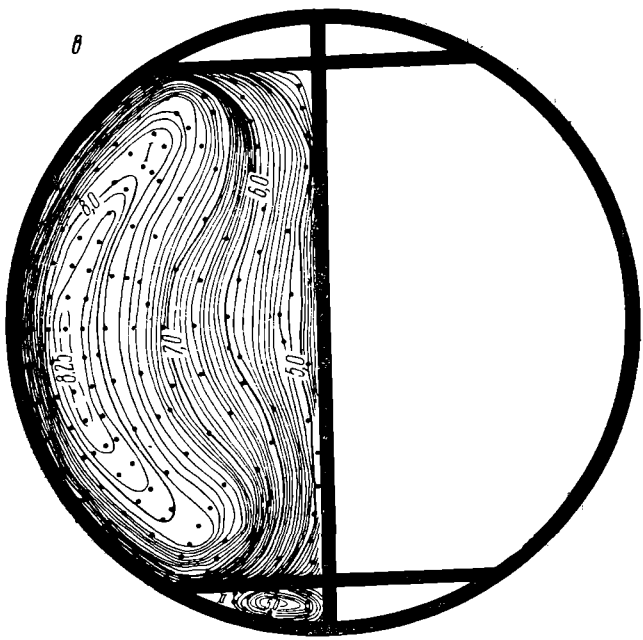


Рис. 3. Распределение скоростей воздушного потока в шахтных армированных стволах. Точками отмечены места замеров скоростей

Проведенные нами исследования потоков в моделях шахтных армированных стволов позволяют считать доказанным, что воздушные струи, идущие по отделениям, имеют характерные черты самостоятельных потоков. Следовательно, шахтный ствол с несколькими отделениями необходимо рассматривать как своеобразную систему выработок (отделений), соединенных параллельно, общее эквивалентное отверстие которых равно сумме эквивалентных отверстий всех отделений и определяет величину коэффициента α.

Самостоятельность воздушных потоков, идущих по отделениям, наглядно показана на рис. 3. Рисунок построен по замерам; линиями равных скоростей показаны потоки при трех различных типах армировки (*а, б, в*). Максимальные скорости наблюдаются в непосредственной близости к стенкам ствола, обладающим меньшим сопротивлением, чем расстрелы, оконтуривающие отделения.

Самостоятельность потоков подтверждается также тем, что воздух по отделениям распределяется в количествах, обратно пропорциональных корням квадратным из их сопротивлений, т. е. по законам параллельных соединений. Применительно к рис. 3, *а* нами подсчитаны сопротивления 1 *пог. м* каждого отделения, определено по известным для параллельных соединений формулам распределение количеств воздуха по отделениям и произведено сравнение полученных результатов с данными опыта (см. таблицу).

Таблица

Отделение	Площадь отделения S, $м^2$	Сопротивление 1 *пог. м* отделения, *кμ*	Средняя скорость движения воздуха, *м/сек* (по замеру)	Количество воздуха, $м^3/сек$		Отклонение расчетных данных от опытных, %	Примечание
				по замеру	по подсчету		
I	0,002812	7673	4,95	0,0139	0,0150	+7,5	рис. 3, *а*
II	0,01009	466	6,1	0,0615	0,0605	—1,5	
III	0,001179	81050	4,25	0,0050	0,0046	—9,0	
IV	0,006607	1400	5,4	0,0360	0,0350	—2,8	
I	0,0141	120	6,8	0,096	0,0955	—0,5	рис. 3, *в*
II	0,00037	436000	4,2	0,00155	0,00159	+2,5	

Данные таблицы подтверждают справедливость применения к шахтным отделениям закономерностей, установленных для параллельных соединений: чем меньше размеры отделения и чем, следовательно, больше его сопротивление, тем с меньшей скоростью идет по нему воздух.

Если считать потоки в отделениях самостоятельными, то в один и тот же момент времени в разных отделениях потокам будут соответствовать и разные числа Рейнольдса. Это обстоятельство должно проявляться при малых Re, в момент перехода от ламинарного движения к турбулентному, который хорошо заметен по возрастанию сопротивления. Опыты, проведенные в малых моделях, подтверждают это предположение. Кривая $K = 0{,}088$ зависимости $\alpha \cdot 10^4 = f(\lg Re)$ на рис. 1 получена в модели ствола, армировка которого изображена на рис. 3, *а*. Число Re подсчитано по обычной формуле

$$Re = \frac{4S}{P}\frac{v}{\nu},$$

где S и P — площадь поперечного сечения и периметр всей трубы;
v — средняя скорость движения воздуха в трубе;
ν — кинематический коэффициент вязкости.

Как видно из рис. 1, переходная область отмечена тремя моментами повышения величины коэффициента сопротивления при числах Re, равных 2500, 5600 и 13000. По-видимому, при постепенном нарастании скорости потока (увеличении числа Рейнольдса) первый скачок сопротивления произошел при возникновении турбулентного движения одновременно в отделении II и в двух отделениях IV (рис. 3, *а*), так как они близки по размерам и имеют наибольшую площадь сечения, при дальнейшем увеличении дебита — в отделениях I, а затем в отделениях III. Исходя из этого, на основе замеров скоростей по отделениям нами подсчитаны критические числа Рейнольдса для каждого отделения, по их площадям и периметрам. При этом критические числа Re, которые назовем частными, для отделений II и IV равны 1460, для отделения I — 1370 и для III — 1350. Таким образом, мы получили критические значения числа Рейнольдса $Re_{кр}$, которые нами неоднократно наблюдались при исследовании сопротивления штрекообразных выработок. Для гладких труб $Re_{кр}$ больше.

Самостоятельность воздушных потоков в отделениях позволяет осуществлять подсчет коэффициентов α следующим способом.

Обозначим общее сопротивление 1 *пог. м* ствола (в киломюргах) через R_0, площадь и периметр сечения через S и P. Тогда, пользуясь известными формулами, можно написать

$$R_0 = \alpha \frac{P}{S^3},$$

откуда

$$\alpha = \frac{R_0 S^3}{P}$$

или, выражая S и P для круглых стволов через диаметр D, получим

$$\alpha = 0{,}154 R_0 D^5. \qquad (8)$$

Общее сопротивление и экививалентное отверстие 1 *пог. м* ствола A_0 связаны соотношением

$$R_0 = \frac{0{,}144}{A_0^2}.$$

Подставляя в выражение (8) вместо R_0 найденное значение и произведя вычисления, будем иметь

$$\alpha = 0{,}0222 \frac{D^5}{A_0^2}. \qquad (9)$$

Вначале целесообразнее определить сопротивление R 1 *пог. м* каждого отделения, а затем, не подсчитывая R_0, вычислить эквивалентные отверстия 1 *пог. м* каждого отделения и, суммируя их, получить общее эквивалентное отверстие 1 *пог. м* ствола A_0.

Аэродинамическое сопротивление каждого отделения определяется лобовым сопротивлением, потерями на расширение и потерями от трения воздуха о стенки ствола.

Лобовое сопротивление расстрелов движущемуся воздуху определяется, как известно, выражением

$$N = cS_м v_1^2 \frac{\gamma}{2g}, \qquad (10)$$

где c — коэффициент лобового сопротивления, безразмерный:

v_1 — скорость движения воздуха в сечении, занятом расстрелами, *м/сек*;

γ — удельный вес воздуха, *кг/м*^{3};

g — ускорение силы тяжести, *м/сек*^{2}.

Миделево сечение расстрелов, приходящееся на I отделение, определяется длиной расстрелов и величиной e_1 и e_3, на которую расширяется поток, доходя до расстрела (рис. 4). Если длину расстрелов *1*, обозначить через b_1, а расстрелов *2* через b_2, то суммарное миделево сечение, приходящееся на данное отделение,

$$\sum S_м = b_1 e_в + b_2 e_1. \tag{11}$$

Учитывая, что коэффициенты лобового сопротивления c у расстрелов *1* и *2* могут быть неравны, произведение $cS_м$ в выражении (10) получит вид

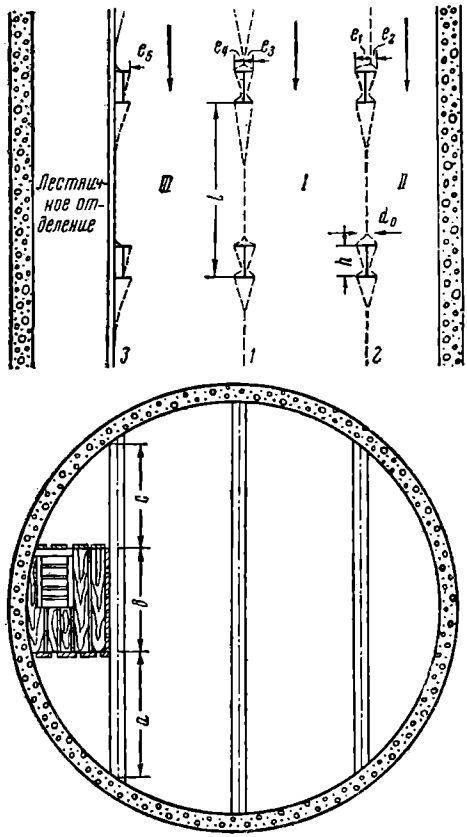


Рис. 4. Структура воздушного потока в армированном стволе:
I, II и III — отделения ствола

$$cS_м = c_1 b_1 e_3 + c_2 b_2 e_1 = \sum_{i=1}^{i} c_i b_i e_i. \tag{12}$$

Тогда формула (10) перепишется так:

$$N = \sum_{i=1}^{i} c_i b_i e_i v_1^2 \frac{\gamma}{2g}. \tag{13}$$

Величина расширения струи e_1, e_2 зависит от соотношения скоростей воздуха в смежных отделениях I и II. Когда же эти скорости равны, имеем равенства $e_1 = e_2$; $e_3 = e_4$. В остальных случаях значения e неравны. Скорость движения воздуха в отделении зависит, как это было доказано (см. таблицу), от его сопротивления, а последнее, как известно, находится в зависимости главным образом от площади поперечного сечения, которое входит в формулу сопротивления в кубе. Поэтому целесообразно в первом приближении считать величины e_1, e_2 пропорциональными площадям отделений S_1, S_2, подсчитанным по средним линиям расстрелов, оконтуривающих данное отделение.

Таким образом, величина

$$e_1 = \frac{d_0 S_1}{S_1 + S_2} \tag{14}$$

где d_0 — ширина полки расстрела, *м*.

Потеря механической энергии на поддержание движения воздуха со скоростью v_1

$$W = N v_1 = \sum_{i=1}^{i} c_i b_i e_i v_1^3 \frac{\gamma}{2g}, \ кгм/сек. \tag{15}$$

Средняя скорость v движения воздуха в свету основной крепи на длине l, между расстрелами, меньше скорости v_1 и связана с ней соотношением

$$\frac{v_1}{v} = \frac{S_i}{S_i - \sum S_м} \tag{16}$$

Введем обозначение

$$\frac{\sum S_м}{S_i} = \frac{\sum_{i=1}^{i} b_i e_i}{S_i} = \psi.$$

Подставив его в формулу (16) и произведя преобразования, получим

$$v_1 = \frac{v}{1-\psi}. \tag{17}$$

Заменив в выражении (15) скорость v_1 ее значением, будем иметь

$$W = \sum_{i=1}^{i} c_i b_i e_i \frac{v^3\gamma}{(1-\psi)^3 2g} \tag{18}$$

Для определения депрессии, теряемой в одном комплекте расстрелов, имеющих миделево сечение, равное $\Sigma b_i e_i$, отнесем мощность к 1 *м*³/*сек* воздуха. Тогда

$$h = \frac{W}{Q} = \frac{W}{S_i v} = \sum_{i=1}^{i} c_i b_i e_i \frac{v^2\gamma}{S_i (1-\psi)^3 2g} = \sum_{i=1}^{i} c_i b_i e_i \frac{Q^2\gamma}{S_i^3 (1-\psi)^3 2g} \tag{19}$$

При расстоянии между расстрелами по оси ствола l число расстрелов, приходящееся на 1 *пог. м* ствола, $n = \frac{1}{l}$, причем депрессия, затрачиваемая на преодоление сопротивления этих расстрелов,

$$h' = \sum_{i=1}^{i} c_i b_i e_i \frac{Q^2\gamma}{S_i^3 l (1-\psi)^3 2g} \tag{20}$$

Отсюда, исключив Q^2, получим выражение для подсчета лобового сопротивления 1 *пог. м* отделения

$$R'_{л.с} = 0{,}0611 \frac{\sum_{i=1}^{i} c_i b_i e_i}{l S_i^3 (1-\psi)^3}, \tag{21}$$

где числовой коэффициент 0,0611 — частное от деления γ на $2g$ после замены γ через 1,2 *кг*/*м*³, а g через 9,81 *м*/*сек*².

При обтекании потоком расстрелов двутаврового профиля воздушная струя, пройдя полку двутавра, расположенную с наветренной стороны, вновь испытывает лобовое сопротивление половины полки (рис. 4), расположенной с подветренной стороны (пренебрегая половиной толщины ножки двутавра).

Лобовое сопротивление подветренных полок определится тем же выражением (21), в котором произведение

$$\sum_{i=1}^{i} c_i b_i e_i \text{ примет вид } 0{,}18 \sum_{i=1}^{i} \frac{d_{0i}}{2} b_i,$$

где 0,18 — коэффициент лобового сопротивления для балок, обтекаемы в группе у стенки, принятый для всех расстрелов одинаковым, так ка продольный калибр этих балок постоянен. Он определяется отношение высоты расстрела h (рис. 4) к $\frac{d_0}{2}$, которое для всех номеров двутавр вых балок почти строго постоянно.

Величина относительного расширения струи ψ в формуле (21) заме няется величиной

$$\psi' = \frac{S_м'}{S_i} = \frac{\sum_{i=1}^{i} \frac{d_{0_i}}{2} b_i}{S_i}. \qquad (2$$

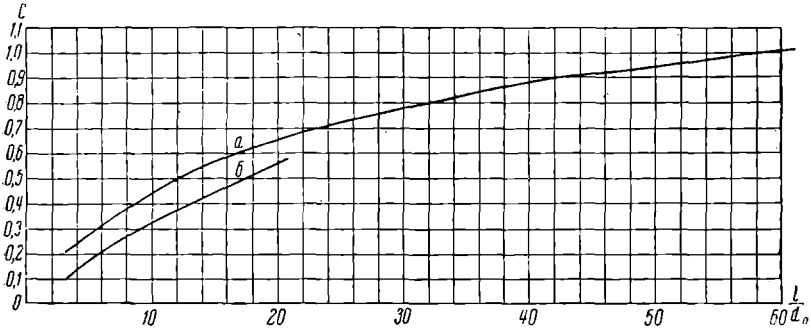


Рис. 5. Коэффициент лобового сопротивления шахтных расстрелов при обтекании в группе в живом сечении потока (*а*) и у стенки (*б*)

Заменив в формуле (21) $\sum_{i=1}^{i} c_i b_i e_i$ и ψ их значениями, получим вы ражение для определения добавочного лобового сопротивления, вы званного ударом струи о подветренные полки расстрелов,

$$R''_{л.с} = 0{,}0611 \frac{0{,}18 \sum_{i=1}^{i} \frac{d_{0_i}}{2} b_i}{l S_i^3 (1-\psi)^3}. \qquad (2$$

Суммируя правые части равенств (21) и (23), получим полное лобо вое сопротивление 1 *пог. м* отделения

$$R_{л.с} = R'_{л.с} + R''_{л.с} = 0{,}0611 \frac{\sum_{i=1}^{i} c_i b_i e_i}{l S_i^3 (1-\psi)^3} + 0{,}0611 \frac{0{,}18 \sum_{i=1}^{i} \frac{d_{0_i}}{2} b_i}{l S_i^3 (1-\psi')^3}. \qquad (2$$

Коэффициент лобового сопротивления c_i принимается по график рис. 5 в зависимости от отношения $\frac{l}{d_0}$ (кривая *а*).

При подсчете лобового сопротивления отделений, смежных с лест ничным, необходимо учитывать, что в части b (см. рис. 4) расстрела струя III отделения набегает на всю ширину полки, поэтому миделев сечение этого участка принимается равным bd_0. Коэффициент лобовог сопротивления для части b должен приниматься по рис. 5 для балок обтекаемых в группе у стенки, а не в свободном потоке (кривая *б*). До бавочное лобовое сопротивление подветренных полок определяется, ка обычно, по формуле (23).

Потеря депрессии от внезапного расширения струи при срыве ее с подветренной полки расстрела определяется по формуле Борда

$$h_{\text{р}} = (v_1 - v)^2 \frac{\gamma}{2g}. \tag{25}$$

Заменяя в формуле (25) скорость v_1 ее значением по выражению (17) и вычисляя отношение $\frac{\gamma}{2g}$, получим

$$h_{\text{р}} = (v_1 - v)^2 \frac{\gamma}{2g} = 0{,}0611 \left(v \frac{1}{1-\psi} - v\right)^2 = 0{,}0611 \frac{v^2\psi^2}{(1-\psi)^2}$$

Подставив вместо v^2 отношение $\frac{Q^2}{S_l^2}$ и введя в знаменатель l с целью определения депрессии 1 *пог. м* отделения, имеем

$$h_{\text{р}} = 0{,}0611 \frac{Q^2\psi^2}{lS_l^2(1-\psi)^2}$$

Отсюда сопротивление 1 *пог. м* отделения, вызванное расширением,

$$R_{\text{р}}' = 0{,}0611 \frac{\psi^2}{lS_l^2(1-\psi)^2}. \tag{26}$$

При проходе струи между полками двутавров (по длине h, см. рис. 4) происходит добавочное расширение. Формула для подсчета сопротивления этого расширения выводится аналогично предыдущей и имеет вид

$$R_{\text{р}}'' = 0{,}0611 \frac{\psi'^2}{lS_l^2(1-\psi')^2} \tag{27}$$

Полное сопротивление от расширения при двутавровой форме расстрелов получается суммированием правых частей выражений (26) и (27) и имет вид

$$R_{\text{р}} = R_{\text{р}}' + R_{\text{р}}'' = 0{,}0611 \frac{\psi^2}{lS_l^2(1-\psi)^2} + 0{,}0611 \frac{\psi'^2}{lS_l^2(1-\psi')^2}. \tag{28}$$

Сопротивление, вызванное трением вздуха о стенки ствола, а также об обшивку лестничного отделения на длине ствола в 1 *пог. м*, определяется по обычной формуле

$$R_{\text{тр}} = \alpha \frac{P_l}{S_l^3}, \tag{29}$$

где P_l — часть периметра ствола, приходящаяся на данное отделение, *м*. В некоторых типовых стволах часть подъемных отделений не соприкасается со стенками ствола. В этом случае $P = 0$, а следовательно, и $R_{\text{тр}} = 0$;

S_l — площадь отделения в свету армировки в сумме с половиной площади расстрелов, оконтуривающих отделение;

α — коэффициент трения, который принимается равным 0,0004 для бетона и бетонита; 0,0007 для отшивки лестничного отделения; 0,0012 для железобетонных тюбингов.

Когда одна часть периметра трения P_1 представлена бетоном, а другая P_2 стенками лестничного отделения, сопротивление трению

$$R_{\text{тр}} = \alpha_1 \frac{P_1}{S^3} + \alpha_2 \frac{P_2}{S^3}. \tag{30}$$

Общая формула для подсчета полного аэродинамического сопротивления одного отделения получается суммированием правых частей выражений (24), (28), (29) и после выноса за скобки $\frac{0{,}0611}{lS_i^2}$ имеет вид

$$R_i = \alpha \frac{P_i}{S_i^3} + \frac{0{,}0611}{lS_i^2}\left[\frac{\sum_{i=1}^{i} c_i b_i e_i}{S_i(1-\psi)^3} + \frac{0{,}18\sum_{i=1}^{i}\frac{d_{0_i}}{2} b_i}{S_i(1-\psi')^3} + \right.$$

$$\left. + \frac{\psi^2}{(1-\psi)^2} + \frac{\psi'^2}{(1-\psi')^2}\right]. \qquad (31)$$

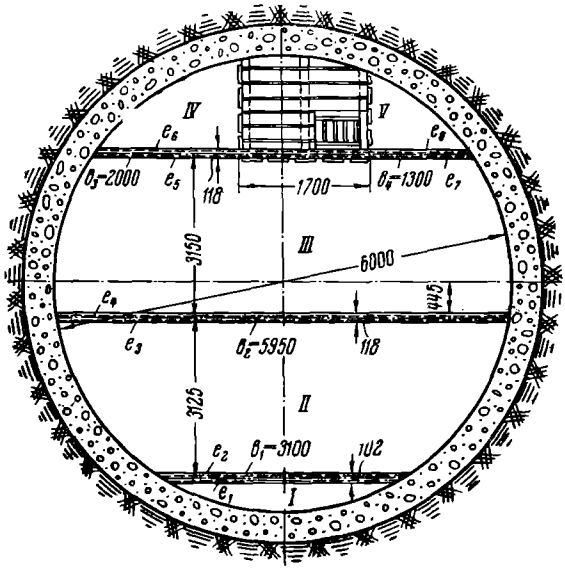


Рис. 6. Армировка ствола типа Н-126-67Т-4 (Южгипрошахт)

Если ствол армирован расстрелами прямоугольного профиля, сопротивление 1 *пог. м* отделения также подсчитывается по формуле (31), но второе и четвертое слагаемые, стоящие в прямых скобках, принимаются равными нулю.

После того, как подсчитаны сопротивления 1 *пог. м* каждого отделения, определяется суммарное эквивалентное отверстие

$$A_0 = 0{,}38\left(\frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \quad + \frac{1}{\sqrt{R_i}}\right)$$

или определяется общее сопротивление 1 *пог. м* ствола

$$R_0 = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \ldots + \frac{1}{\sqrt{R_i}}\right)^2}$$

Полученные значения A_0 или R_0 подставляются в формулы (9) или (8) и находится коэффициент α.

При подсчете принимается, что воздух в лестничном отделении неподвижен и сопротивление этого отделения бесконечно велико, а эквивалентное отверстие равно нулю.

Подсчет коэффициентов α стволов этим методом и сравнение полученных результатов с опытными замерами дает хорошее совпадение.

В качестве примера произведем подсчет этим методом коэффициента α ствола типа Н-126-67Т-4 (Южгипрошахт) диаметром 6 *м*. Крепление стенок железобетонными тюбингами, расстояние между расстрелами $l = 4{,}168$ *м*. Ствол имеет 5 воздушных отделений и лестничное (рис. 6), которое отшито досками со стороны подъемного.

Данные для расчета следующие. Площади отделений: $S_1 = 0{,}83$ *м*^{2}, $S_2 = 10{,}67$ *м*^{2}, $S_3 = 12{,}07$ *м*^{2}, $S_4 = 1{,}75$ *м*^{2}, $S_5 = 0{,}85$ *м*^{2}. Периметры: $P_1 = 3{,}14$ *м*, $P_2 = 5{,}2$ *м*, $P_3 = 4{,}5$ *м* (стенка) и 1,7 *м* (лестничное отделение), $P_4 = 2{,}45$ *м* (стенка) и 1,3 *м* (лестничное отделение), $P_5 = 1{,}7$ *м* (стенка) и 1,1 *м* (лестничное отделение).

Находим величины e, обозначенные на рис. 6,

$$e_1 = \frac{0{,}102 S_1}{S_1 + S_2} = \frac{0{,}102 \cdot 0{,}83}{11{,}5} = 0{,}007 \text{ м};$$

аналогично находим

$$e_2 = 0{,}095 \text{ м}; \quad e_3 = 0{,}055 \text{ м}; \quad e_4 = 0{,}063 \text{ м}; \quad e_5 = 0{,}103 \text{ м};$$

$$e_6 = 0{,}015 \text{ м}; \quad e_7 = 0{,}110 \text{ м}; \quad e_8 = 0{,}008 \text{ м}.$$

Суммарное миделево сечение наветренных полок двутавров, приходящееся на каждое отделение,

$$\sum S_{м1} = b_1 e_1 = 3{,}1 \quad 0{,}007 = 0{,}0217 \text{ м}^2;$$

$$\sum S_{м2} = b_1 e_2 + b_2 e_3 = 3{,}1 \quad 0{,}095 + 5{,}95 \quad 0{,}055 =$$

$$= 0{,}295 + 0{,}327 = 0{,}622 \text{ м}^2.$$

Аналогично находим

$$\sum S_{м3} = 0{,}724 \text{ м}^2; \quad \sum S_{м4} = 0{,}030 \text{ м}^2;$$

$$\sum S_{м5} = 0{,}0104 \text{ м}^2.$$

Определяем величины ψ

$$\psi_1 = \frac{\sum S_{м1}}{S_1} = \frac{0{,}0217}{0{,}83} = 0{,}0262.$$

Аналогично находим $\psi_2 = 0{,}0583$; $\psi_3 = 0{,}06$; $\psi_4 = 0{,}0171$; $\psi_5 = 0{,}0122$.

Миделево сечение подветренных полок двутавров, приходящееся на каждое отделение,

$$S'_{м_1} = b_1 \frac{d_{01}}{2} = 3{,}1 \cdot 0{,}051 = 0{,}158 \text{ м}^2; \quad S'_{м_2} = 0{,}509 \text{ м}^2;$$

$$S'_{м_3} = 0{,}545 \text{ м}^2; \quad S'_{м_4} = 0{,}118 \text{ м}^2; \quad S'_{м_5} = 0{,}0767 \text{ м}^2.$$

Находим величины ψ'

$$\psi_1' = \frac{S'_{м_1}}{S_1} = \frac{0{,}158}{0{,}83} = 0{,}19; \quad \psi_2' = 0{,}0477; \quad \psi_3' = 0{,}0452;$$

$$\psi_4' = 0{,}0675; \quad \psi_5' = 0{,}0902.$$

Коэффициенты лобового сопротивления расстрелов (рис. 5, *а*)

$$d_0 = 0{,}102\ м;\quad c_1 = 0{,}89;\quad d_0 = 0{,}118\ м,$$

$$c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = 0{,}83.$$

Полное сопротивление I отделения по формуле (31)

$$R_1 = 0{,}0012\,\frac{3{,}14}{0{,}83^3} + \frac{0{,}0611}{4{,}168\ \ 0{,}83^2}\left[\frac{0{,}89\ \ 0{,}0217}{0{,}83\ \ (1-0{,}0262)^3} + \frac{0{,}18\cdot 0{,}158}{0{,}83\,(1-0{,}19)^3} + \right.$$

$$\left. + \frac{0{,}0262^2}{(1-0{,}0262)^2} + \frac{0{,}19^2}{(1-0{,}19)^2}\right] = 0{,}00969\ кμ.$$

По аналогии, с учетом выражения (30) для III, IV и V отделений (рис. 6), определяем сопротивление остальных отделений:

$$R_2 = 0{,}00001518\ кμ;\quad R_3 = 0{,}00001142\ кμ;$$

$$R_4 = 0{,}00105\ кμ;\quad R_5 = 0{,}00552\ кμ.$$

Эквивалентное отверстие 1 *пог. м* каждого отделения определяется как

$$A_1 = \frac{0{,}38}{\sqrt{R_1}} = \frac{0{,}38}{\sqrt{0{,}00969}} = 3{,}87\ м^2;\quad A_2 = 98\ м^2;\quad A_3 = 112{,}5\ м^2;$$

$$A_4 = 11{,}7\ м^2;\quad A_5 = 5{,}1\ м^2;\quad A_0 = A_1 + A_2 +$$

$$+ A_3 + A_4 + A_5 = 231{,}0\ м^2.$$

Находим по формуле (9) коэффициент α

$$\alpha = 0{,}0222\cdot\frac{D^5}{A_0^2} = 0{,}0222\cdot\frac{6^5}{231{,}0^2} = 0{,}00326 = 32{,}6\cdot 10^{-4}.$$

По опыту коэффициент α равен $34\cdot 10^{-4}$, т. е. погрешность равна — 4%, что вполне удовлетворительно.

Заключение

В работе даны эмпирические и аналитические формулы для подсчета коэффициентов аэродинамического сопротивления α круглых шахтных стволов.

Эмпирические формулы (2), (3), (6), (7) получены по результатам опытных исследований, проведенных различными авторами в шахтах и аэродинамических трубах. В них установлена зависимость между коэффициентом α и безразмерным параметром (K), определяющим величину α.

Аналитическая формула (31) выведена из условия формирования коэффициента α за счет лобового сопротивления расстрелов, потерь от внезапного расширения при срыве воздушной струи с расстрелов и потерь от трения воздуха о стенки ствола и отшивку лестничного отделения.

Поскольку при выводе формулы принимались в расчет истинные скорости движения воздуха в отделениях (так как подсчитывались действительные сопротивления отделений), то формула учитывает влияние местоположения расстрелов, а форма профиля учитывается введением добавочных лобовых сопротивлений и сопротивлений от расширения. Шахтный ствол при этом рассматривается как сложное параллельное

соединение, параллельными ветвями в котором служат отделения, а общее эквивалентное отверстие равно сумме эквивалентных отверстий всех отделений. Результаты подсчета коэффициентов α стволов по аналитической формуле (31) хорошо совпадают с опытными данными.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Скочинский А. А., Ксенофонтова А. И., Харев А. А., Идельчик И. Е. Аэродинамическое сопротивление шахтных стволов и способы его снижения. Углетехиздат, 1953.
2. Абрамов Ф. А. Определение вентиляционного сопротивления круглых бетонированных шахтных стволов. «Уголь», 1953, № 1.
3. Скочинский А. А., Комаров В. Б. Вентиляция рудников. Углетехиздат, 1933.
4. Ксенофонтова А. И., Карпухин В. Д., Харев А. А. Вентиляционное сопротивление горных выработок. Углетехиздат, 1950.