

УДК 622. 453

И.Б. ОШМЯНСКИЙ, канд. техн. наук, доц., Л.И. ЕВСТРАТЕНКО, аспирант,
Криворожский национальный университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ РУДНИКОВ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ФИЛЬТРАЦИИ ЧЕРЕЗ ЗОНУ ОБРУШЕНИЯ

Выполнены расчеты, которые свидетельствуют о неточности при выборе показателя режима движения воздуха через обрушенные зоны, которые приводят к значительным ошибкам при расчетах значений основных аэродинамических параметров вентиляционных сетей рудников с активными обрушениями. Приведенная методика определения общего показателя режима движения в вентиляционных сетях рудников с обрушениями позволяет уточнить закон сопротивления в сети, более надежно определять характеристики сетей рудников, режимы работы ГВУ и показатели эффективности их эксплуатации.

При движении через пористую среду зоны обрушения, газ испытывает два вида сопротивления: от внутреннего трения между частицами газа и от внешнего трения частиц газа о стенки частиц материала слагающих пористую среду. Вследствие бесконечной малости первого вида сопротивления им можно пренебречь. При малых скоростях движения газа в пористой среде сила сопротивления выражает действие лишь вязкостных сил и пропорциональна первой степени скорости, т.е. имеет место линейный закон сопротивления. Если же скорость движения газа высокая, то в потоке газа возникают инерционные силы в результате действия которых, сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости газа.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Движение вентиляционного потока по горным выработкам шахт и рудников осуществляется при значительных числах Рейнольдса, что обуславливает турбулентный режим течения и квадратичный закон сопротивления движению воздуха.

Анализ исследований и публикаций. При разработке мощных залежей системами обрушений, в вентиляционной сети появляются ветви с линейными, промежуточными и квадратичными законами сопротивления движению воздуха в них [1,13]. Такими ветвями являются зоны обрушений, имеющие аэродинамическую связь с горными выработками и поверхностью.

Наличие активной аэродинамической связи вентиляционной сети с поверхностью через зону обрушения, предопределяет наличие утечек (притечек) воздуха, которые являются частью общешахтного дебита и на перемещение их через зону обрушения бесполезно затрачивается значительная мощность вентилятора [2]. Существует также, опасность попадания в вентиляционную сеть вредных и ядовитых веществ. При реконструкции вентиляции и оперативном управлении проветриванием, в частности при изменении общешахтного дебита или дебитов отдельных струй, приводит иногда к нежелательным результатам [3,11]. Так, например, при увеличении общего дебита двух параллельных струй больше возрастает дебит струи с ламинарным течением, т.е. прирост утечек превысит прирост дебита вентиляционных струй. Кроме того, в расчетах сетей рудников с активными обрушениями и различными законами движения воздуха в ветвях допускаются значительные ошибки, если за основу при определении R_{ec} принимается квадратичный закон сопротивления. Ошибки в выборе показателя режима движения в сетях шахт приводят к увеличению несоответствия проектных и фактических вентиляционных параметров, режимов работы ГВУ, коэффициентов аэродинамического сопротивления выработок, искажают результаты ВДС и др.

Постановка задачи. В связи с указанным, определение режима движения воздуха в вентиляционных системах рудников с учетом режима фильтрации через зону обрушения является актуальной задачей.

Изложение материала и результаты. При движении через пористую среду зоны обрушения газ испытывает два вида сопротивления [1,4,14]: от внутреннего трения между частицами газа и внешнего трения частиц газа о стенки частиц материала слагающих пористую среду. Вследствие бесконечной малости первого вида сопротивления им можно пренебречь. При малых скоростях движения в пористой среде сила сопротивления выражает действие лишь вязкостных сил и пропорциональна первой степени скорости, т.е. имеет место линейный закон сопротивления. Если же скорость движения газа высокая, то в потоке газа возникают инерционные силы, в результате действия которых сила сопротивления пропорциональна квадрату ско-

рости газа. АВ этом случае проявляетя квадратичный закон сопротивления. Поэтому для описания движения потоков в зонах обрушения, которые являются воздухопроводящими ветвями сетей, может быть применена универсальная двучленная форма закона сопротивления

$$h_{3.o.} = R_l Q + R_T Q^2, \tag{1}$$

где R_l и R_T - соответственно линейное и турбулентное сопротивления

В случае малых скоростей фильтрации, а следовательно, проявления больших вязкостных сил формулу (1) можно использовать в следующем виде

$$h_{3.o.} = R_l Q$$

При вполне сформированном турбулентном потоке, когда линейный член мал и им обычно пренебрегают, расчет можно вести по той же формуле (1), но без первого члена в правой части

$$h_{3.o.} = R_T Q^2.$$

В переходной области режима фильтрации, когда показатель степени при Q может изменяться в пределах $1 < n < 2$, без ущерба для точности может быть использована также степенная формула

$$h_{3.o.} = R_{ком} Q^n, \tag{2}$$

где $R_{ком}$ - общее сопротивление вентиляционной сети при комбинированном режиме, $H \cdot c^2 / m^{2+3n}$; n - показатель степени, определяющий этот комбинированный режим.

Анализ формул (1) и (2), свидетельствует о том, что они по степени точности примерно равноценны и расчет вентиляционных сетей при различных законах движения в ветвях, можно вести по любой из этих формул.

Вопросам расчета вентиляционных сетей при различных соединениях выработок и использовании двучленного закона сопротивления посвящены работы таких видных ученых, как Ф.А. Абрамов [1], В.А. Ярцев [5,6] и других.

В настоящей работе поставлена задача определения общих показателей степени в формуле (1) степенного закона сопротивления при движении воздушных потоков с различными режимами для последовательного, параллельного и смешанного соединения ветвей.

Общая депрессия последовательного соединения выработок (рис. 1а) равна сумме депрессий всех входящих в него выработок

$$h_{3.o.} = h_1 + h_2 + \dots + h_k = R_1 Q^{n_1} + R_2 Q^{n_2} + \dots + R_k Q^{n_k} = \sum_{i=1}^k R_i Q^{n_i}, \tag{3}$$

где K - число последовательно соединенных ветвей в последовательном соединении.

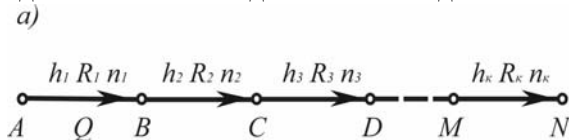
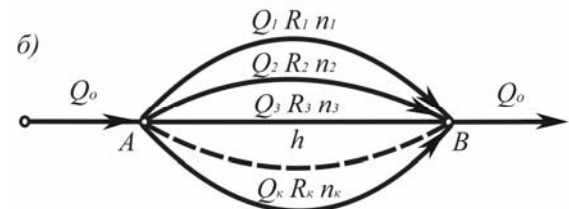


Рис. 1. Схема к расчету последовательного а и параллельного б соединения выработок сети при различных законах движения воздуха в ветвях



Решая уравнение (2) относительно n , получим

$$n = \frac{\lg h_{3.o.} - \lg R_{ком}}{\lg Q}.$$

Продифференцировав логарифмическую функцию (4), найдем

$$n = \frac{d \lg h_{3.o.}}{d \lg Q} = \frac{Q dh_{3.o.}}{h_{3.o.} dQ}. \tag{4}$$

В связи с однозначностью уравнений (2) и (3) значение производной dh_o/dQ найдем из (3)

$$\frac{dh_{3.o.}}{dQ} = n_1 R_1 Q^{n_1-1} + n_2 R_2 Q^{n_2-1} + \dots + n_k R_k Q^{n_k-1} = \sum_{i=1}^n n_i R_i Q^{n_i-1} \tag{5}$$

После подстановки dh_o/dQ из формулы (5) в (4) получим выражение для определения общего показателя комбинированного режима движения воздуха в сети при последовательном соединении ветвей с неоднородными сопротивлениями

$$n = Q \frac{n_1 R_1 Q^{n_1-1} + n_2 R_2 Q^{n_2-1} + \dots + n_k R_k Q^{n_k-1}}{h_{3.o.}} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i h_i}{h_{3.o.}}, \quad (7)$$

откуда общая депрессия последовательного соединения

$$h_{3.o.} = \sum_{i=1}^k n_i h_i / n.$$

При использовании двучленного закона сопротивления общее сопротивление последовательного соединения равно [1]

$$h_{3.o.} = \sum_{i=1}^k R_{ли} Q + \sum_{i=1}^k R_{ки} Q^2 = \sum_{i=1}^k h_{ли} + \sum_{i=1}^k h_{ки},$$

где $R_{ли}$ и $R_{ки}$ - линейная и квадратичная составляющие аэродинамического сопротивления i -й ветви.

Для параллельного соединения, состоящего из K ветвей (рис. 1б), можно записать на основании его свойств

$$Q_{3.o.} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_k = \sum_{i=1}^k Q_i, \quad (8)$$

$$h = h_1 = h_2 = \dots = h_k = R_i Q_i^{n_i}, \quad (9)$$

Продифференцировав уравнения (8) и (9), получим

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 + \dots + dQ_k = \sum_{i=1}^k dQ_i, \quad (10)$$

$$dh_1 = n_1 R_1 Q_1^{n_1-1} dQ_1; \quad dh_2 = n_2 R_2 Q_2^{n_2-1} dQ_2; \quad dh_k = n_k R_k Q_k^{n_k-1} dQ_k. \quad (11)$$

Подставив значения dQ_1, dQ_2, \dots, dQ_k из (11) в (10), получаем

$$dQ = \frac{dh}{n_1 R_1 Q_1^{n_1-1}} + \frac{dh}{n_2 R_2 Q_2^{n_2-1}} + \dots + \frac{dh}{n_k R_k Q_k^{n_k-1}}$$

откуда

$$\frac{dh}{dQ} = 1 / \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i R_i Q_i^{n_i-1}} \quad (12)$$

Подставив dh/dQ из (10) в (4) с учетом выражения (3) получим выражение для определения общего показателя комбинированного режима движения в сети при параллельном соединении ветвей с различными режимами движения воздушных потоков в них

$$n = \frac{Q_{3.o.} dh}{hdQ_{3.o.}} = \frac{Q_{3.o.}}{\sum_{i=1}^k \frac{Q_i}{n_i}}, \quad (13)$$

откуда

$$Q_{3.o.} = n \sum_{i=1}^k \frac{Q_i}{n_i}.$$

Общее аэродинамическое сопротивление сети при комбинированном режиме движения $R_{ком}$ при найденных значениях общего показателя режима движения n находится из формулы (2).

Рассмотрим случай сложного последовательно-параллельного соединения вентиляционного участка шахты с аэродинамически активным обрушением и при наличии утечек воздуха на ГВУ при всасывающем способе проветривания.

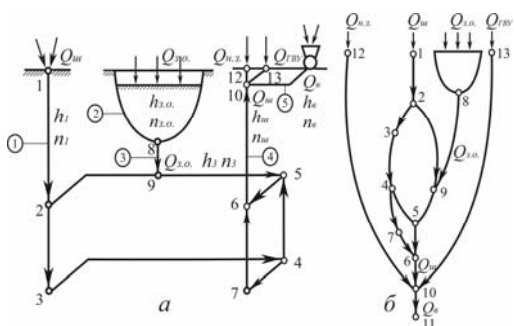


Рис. 2. Принципиальная схема вентиляции сложного последовательно-параллельного соединения участка шахтной сети с аэродинамически активным обрушением и при наличии утечек воздуха на ГВУ при всасывающем способе проветривания *a* и схема вентиляционных соединений этого же участка сети *б*

На рис. 2а и б приводится принципиальная схема вентиляции и схема вентиляционных соединений такого участка сети рудника.

Из схемы видно, что участок зоны обрушения (ветвь 2) находится в последовательном соединении с

участком вентиляционного горизонта (ветвь 3). В то же время, вентиляционная ветвь шахты (ветвь I) до узла 3 находится в параллельном соединении с ветвью (2-3), включающую в себя зону обрушения и участок вентиляционного горизонта.

Исходя из формулы (6) и (13), можно записать

$$n_{2-3} = \frac{n_2 h_2 + n_3 h_3}{n_2 + n_3}. \quad (14)$$

$$n_4 = \frac{Q_4}{\frac{Q_1}{n_1} + \frac{Q_2}{n_{2-3}}} = \frac{Q'_u}{\frac{Q_u}{n_1} + \frac{Q_{3.o.}}{n_{2-3}}}, \quad (15)$$

где $Q_1=Q_u$ - количество воздуха, поступающего в шахту и затем направляющееся на вентиляционный горизонт; $Q_2=Q_{3.o.}$ - величина фильтрационных утечек с поверхности через зону обрушения для отдельного участка шахты; $Q_4=Q'_u$ - количество воздуха, исходящее из шахты по вентиляционному стволу.

Подставив (14) в (15), получим общий вид формулы для определения общего показателя режима движения воздушных потоков в шахтной сети

$$n_{u.c.} = \frac{Q'_u n_1 (n_{3.o.} h_{3.o.} + n_{BG} h_{BG})}{Q_u (n_{3.o.} h_{3.o.} + n_{BG} h_{BG}) + Q_{3.o.} n_1 (h_{3.o.} + h_{BG})}, \quad (16)$$

где $h_2 = h_{3.o.}$ - средняя депрессия зоны обрушения; $h_3 = h_{6.z.}$ - депрессия участка вентиляционного горизонта; $n_2 = n_{3.o.}$ - показатель режима движения при фильтрации через обрушения; $n_{6.z.}$ - показатель режима движения воздушного потока на участке вентиляционного горизонта.

Так как ветви утечек воздуха с поверхности через надшахтное здание (ветвь 12-10) и утечки через неплотности канала вентилятора (ветвь 13-10) находятся в параллельном соединении с шахтной вентиляционной сетью, то тогда на основании формулы (16) общий показатель режима движения воздуха в вентиляционной сети рудника определится из выражения

$$n_{BC} = \frac{Q_B}{\frac{Q'_u}{n_{u.c.}} + \frac{Q_{n.z.}}{n_{n.z.}} + \frac{Q_{кан}}{n_{кан}}} = \frac{Q_B}{\frac{Q_u}{n_u} + \frac{Q_{3.o.} (h_{3.o.} + h_{BG})}{n_{3.o.} h_{3.o.} + n_{BG} h_{BG}} + \frac{Q_{n.z.}}{n_{n.z.}} + \frac{Q_{кан}}{n_{кан}}}, \quad (17)$$

где $Q_{n.z.}$ и $n_{n.z.}$ - величина утечек и показатель режима движения при утечках через герметизирующие устройства надшахтного здания вентиляционного ствола; $Q_{кан}$ и $n_{кан}$ - величина утечек и показатель режима движения при утечках через неплотности канала вентилятора и резервный вентилятор.

По формулам (6), (13), (16) и (17) с использованием вычисленных по результатам воздушно-депрессионных съемок шахт и аэродинамических испытаний ГВУ значений величин n_i , h_i , Q_i , могут быть определены значения общих показателей режимов движения воздуха в шахтных и вентиляционных сетях рудников.

С другой стороны, общий показатель режима движения в вентиляционной сети рудника $n_{6.c.}$ может быть определен на основании результатов измерений с достаточно высокой степенью точности и Q_6 и h_6 в канале ГВУ при различных, но не сильно отличающихся режимах его работы и логарифмирования уравнения (2) для двух значений расходов воздуха Q'_6 и Q''_6 , и депрессий h'_6 и h''_6

$$n_{BC} = \frac{\lg h''_6 - \lg h'_6}{\lg Q''_6 - \lg Q'_6}.$$

Для оценки влияния неточности при выборе показателя режима движения воздуха на величину ошибки при расчетах параметров вентиляционных сетей, найдем относительную погрешность при определении $R_{вс}$ в случае использования квадратичного и комбинированного режимов движения воздуха в вентиляционных сетях рудников.

Согласно результатам комплексного обследования вентиляционных систем рудников Кривбасса [2,8], значения основных аэродинамических параметров действующих рудников находятся в следующих пределах: $Q_в$ - 107,1-339,2 м³/с и соответственно, $h_в$ - 166,4-443,9 даПа.

Если принять, что $n_{вс} = 2$, то $R_{вс}$ находится в пределах 0,0145-0,0039 Н·с²/м⁸ а при $n_{вс} = 1,8$ [7] $R_{вс}$ - 0,037-0,0124 Н·с²/м^{7,43}. Таким образом, погрешность δ при расчетах $R_{вс}$ может составлять 60,8-68,6 %.

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что неточности при выборе показателя режима движения воздуха через обрушенные зоны приводят к значительным ошибкам при расчетах значений основных аэродинамических параметров вентиляционных сетей рудников с активными обрушениями.

Приведенная методика определения общего показателя режима движения в вентиляционных сетях рудников с обрушениями позволяет уточнить закон сопротивления в сети, более надежно определять характеристики сетей рудников, режимы работы ГВУ и показатели эффективности их эксплуатации.

Список литературы

1. **Абрамов Ф. А.** Рудничная аэрогазодинамика / **Ф. А. Абрамов** // М.: Недра, 1972. – 272с.
2. **Ошмянский И. Б., Евстратенко Л. И.** Проблемы повышения эффективности функционирования вентиляционных систем при добыче руды с глубоких горнорудных шахт / **Ошмянский И. Б., Евстратенко Л. И.** . – Проблемы недропользования. Сборник научных трудов. Часть I.- Санкт-Петербург, 2013.—С. 99-101
3. **Шашмури Ю. А., Луковский В. Д.** Исследование влияния зоны обрушения на общешахтный режим движения воздуха. - В к н.: Физика и технология разработки недр/ **Шашмури Ю. А., Луковский В. Д.**// М.-Л.: Наука, 1965. - С. 35-33.
4. **Маскет М.** Течение однородных жидкостей в пористой среде. **М. Маскет** – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 628 с.
5. **Ярцев В. А.** Экспериментальное определение аэродинамического сопротивления общего комплекса обрушений шахты "Южная" Гороблагодатского рудника. **В. А. Ярцев**// - Горный журнал, 1962, №6. - С. 43-45.
6. **Ярцев В. А.** Аэродинамическое сопротивление обрушений. **В. А. Ярцев**// - Горный журнал, 1966, №2. – С. 23-30.
7. **Ошмянский И. Б., Лапшин А. Е.** Исследование на аэродинамической модели проницаемости обрушенных пород рудников. **Ошмянский И. Б., Лапшин А. Е.** - Изв. вузов. Горный журнал, 1978, №8. - С. 68-72.
8. **Ошмянский И. Б.** Распределение аэродинамических параметров фильтрации в обрушениях рудников Кривбасса / **И. Б. Ошмянский, А. Е. Лапшин** // Вентиляция шахт и рудников. – Л.:ЛГИ, 1980. – вып. 7. – С. 46-49.
9. **Engelund F.** On the Laminar and Turbulent Flows of Ground Water through Homogeneous Sand / **F. Engelund** // – Transactions of the Danish: Academy of Technical Sciences – 1953. – № 3. – P. 356 – 361.
10. **Darcy H.** Les fontaines publiques de la ville de Dijon / **H. Darcy.** – Paris: 1856. – 647 p.
11. **Шашмури Ю. А.** Фильтрационные утечки рудничного воздуха / **Ю. А. Шашмури.** – Ленинград: Наука, 1970. – 130 с.
12. **Гершун О.С.** Движение воздуха через обрушения шахт Кривбасса / **О. С. Гершун** // Известия ДГИ. – т. 40. – 1961. С. 26-29.
13. **Савенко С. К.** Аэрогазодинамика массовых взрывов в рудниках / **С. К. Савенко, Е. Г. Морозов, В. И. Бережной.** – М.: Недра, 1976. – 184 с.
14. **Алборов И.Д.** Аэродинамическое сопротивление зон обрушения / **И. Д. Алборов, Ч. М. Худиев** // Безопасность труда в промышленности. – № 3.–1995. – С. 23-27.
15. **Boussinesq J. V.** Theorie de l'intumescence liquide, appelee onde solitaire ou de translation, se propageant dans un canal rectangulaire / **J. V. Boussinesq** // Comptes Rendus Acad. Sci. Paris. 1871. - V. 72. - P. 755-759. (фр.)

Рукопись поступила в редакцию 28.03.15