

Кандидаты техн. наук Т.В. Бунько,
И.Е. Кокоулин,
инженеры Н.В. Безкровный, С.А. Головкин
(ИГТМ НАН Украины)

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ С УЧЕТОМ РАВНОМЕРНЫХ И НЕРАВНОМЕРНЫХ УТЕЧЕК

Охарактеризовано метод розрахунку втрат тиску повітря у гірничих виробках за наявності витоків (притоків), який може бути використано під час проектування системи провітрювання шахти з метою вибору засобів місцевого керування повітряних потоків, розрахунку конфігурації ліній витoku у виробленому просторі та при оцінці зміни витоків у аварійній ситуації і розробці методів керування ними.

CALCULATION LOSSES OF PRESSURE OF AIR IN MINING WORKINGS TAKING INTO ACCOUNT EVEN AND UNEVEN LEAKAGES

The method of calculation losses of pressure of air in the mining workings at presence of leakages (inflows), which can be used for planning of the ventilation system of mine with the purpose of choice facilities of the local control of air blast, calculation of configuration lines of leakages in the worked out goaf and at estimation change of leakages in an emergency situation and development methods of control by them.

Решение задач расчета воздухораспределения в горных выработках является основой для выбора как проектных, так и оперативных мероприятий по выбору нормальных и аварийных режимов проветривания горного предприятия. Вместе с тем шахтная вентиляционная система (ШВС) представляет собой не просто соединение горных выработок, как проводников воздуха; в ней имеются зоны, трудно описываемые аналитически, хотя и обладающие определенными аэродинамическими характеристиками. Речь идет о неявных аэродинамических связях между точками ШВС, основными из которых являются утечки воздуха, в том числе через выработанное пространство лав. Без их точного учета при проведении вентиляционных расчетов невозможно создать имитационную модель ШВС, адекватную реальному аналогу, а значит – эффективно решать задачи управления проветриванием. Поэтому решение вопроса о движении воздуха с изменением расхода вдоль горных выработок представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Ввиду отсутствия достаточно точных и проверенных теоретических и экспериментальных данных по этому вопросу, при решении практических задач обычно пользуются зависимостями, выведенными в гидравлике для движения жидкости с постоянной массой. Следует, правда, отметить, что в гидравлических сетях изменение количества движущейся по проводнику жидкости свидетельствует об аварийной ситуации, тогда как в воздухопроводящих сетях является явлением обычным вследствие невозможности обеспечения достаточной степени воздухопроницаемости стенок горных выработок.

Исследования движения воздуха по горным выработкам с утечками (притечками) в литературе освещены недостаточно глубоко и являются весьма не-

точными. Основная часть работ касается анализа распределения дебита в пределах выемочного участка и сводится к подсчету количества воздуха, который нужно подавать в лаву при наличии утечек [1,2]. Нормы утечек воздуха через выработанное пространство и различные вентиляционные сооружения приведены в [1].

В практических расчетах депрессии горных выработок при наличии распределенных утечек воздуха используется формула В.Н. Воронина [3].

Если количество утечек соответствует регламентируемой норме - справедлива формула

$$H(i,j) = R_l(i,j) L(i,j) Q_n(i,j) Q_k(i,j); \quad (1)$$

если утечки воздуха превышают указанные нормы, расчет производится по формуле

$$H(i,j) = R_l(i,j) L(i,j) Q_n^2(i,j) K_{ym}(i,j), \quad (2)$$

где $R_l(i,j)$ – удельное аэродинамическое сопротивление (сопротивление 1 пог.м) горной выработки (i,j) ; i – ее начальный, j – конечный узел; $H(i,j)$ – депрессия выработки; $L(i,j)$ – длина выработки; $Q_n(i,j), Q_k(i,j)$ – количество воздуха в начале и конце выработки; $K_{ym}(i,j)$ – коэффициент утечек воздуха

$$K_{ym}(i,j) = \frac{Q_n(i,j)}{Q_k(i,j)}. \quad (3)$$

Общая депрессия выработок для выемочного участка определяется по формуле:

$$h_{yч} = h_{уст} + h_l = R_{yд\ уст} L Q_k(i,j) Q_n(i,j) + R_l Q_k^2 \quad (4)$$

где $h_{уст}, R_{yд\ уст}$ – суммарные депрессия и удельное аэродинамическое сопротивление откаточного и вентиляционного штреков; L – суммарная длина откаточного и вентиляционного штреков; h_l, R_l – депрессия и удельное аэродинамическое сопротивление лавы.

Экспериментальные и теоретические исследования движения воздуха по горным выработкам с утечками, проведенные Г.Д. Лидиным, А.Э. Петросяном, Н.Г. Матвиенко, А.С. Цырульниковым, А.Т. Айруни, А.Ф. Милетичем, А.Л. Пучковым и др. позволили усовершенствовать существующую методику расчета количества воздуха, необходимого для проветривания участка; полученные результаты позволили определить роль утечек воздуха при проветривании шахт через различные вентиляционные устройства, зависимость утечек от перепада давления и площади устройства, определить нормы утечек воздуха для различных вентиляционных сооружений. Однако приведенные формулы (1), (2), (4) позволяют рассчитать потери депрессии только при равномерно

распределенных утечках воздуха вдоль пути его движения.

В расчетах ШВС предполагается, что стенки горных выработок воздухопроницаемы и воздух, движущийся по ним, несжимаем из-за малой скорости и установившегося движения. Такие допущения позволяют, как уже отмечалось, использовать законы гидравлики для аэродинамических расчетов. В реальных условиях некоторая часть движущегося воздуха по горным выработкам теряется в виде утечек или присоединяется в виде притечек. Поэтому, целью настоящих исследований является получение уравнений движения воздуха при равномерно и неравномерно распределенных утечках (притечках).

В самом общем виде, когда происходит одновременное присоединение (притечки) и отсоединение (утечки) воздушных масс к основному потоку в выработке, процесс может быть описан дифференциальным уравнением [4]

$$\frac{d(Mu)}{dt} = F + \frac{dM_1}{dt} \Theta_1 - \frac{dM_2}{dt} \Theta_2, \quad (5)$$

где M – масса потока; u – скорость на оси потока; F – проекция равнодействующей внешних сил на основное направление потока; Θ_1, Θ_2 – проекция на то же направление скоростей присоединяющихся и отсоединяющихся масс воздуха; M_1, M_2 – присоединяющиеся и отсоединяющиеся массы.

Уравнение (5) справедливо при условии, что движение потока является плавно меняющимся; поэтому центробежными силами, а также составляющими скоростей в плоскостях живых сечений струй можно пренебречь, т.е. в потоке отсутствуют вихревые течения.

Используя известные понятия прикладной аэродинамики и переходя от рассмотрения движения присоединяемых и отсоединяемых масс для отдельно взятой струи к целому потоку, можно получить выражение для потерь давления в выработке, в которой имеют место равномерно распределенные утечки и притечки:

$$dH_0 = \frac{Q(i,j)^2}{K^2(i,j)} dx + \frac{1}{gS(i,j)^2} Q(i,j) dQ_1 - \frac{1}{gS(i,j)^2} Q(i,j) dQ_2, \quad (6)$$

где $Q(i,j)$ – общий расход воздуха в любом сечении выработки; $S(i,j)$ – площадь поперечного сечения выработки; $K(i,j)$ – расходная характеристика горной выработки,

$$K^2(i,j) = \frac{\gamma}{R_1(i,j)}, \quad (7)$$

γ – объемный вес воздуха.

Пусть на каждом месте (единице длины) горной выработки присоединяется и/или отсоединяется расход, равный соответственно q_1 и q_2 . Тогда в любом промежуточном сечении выработки, отстоящем на расстоянии x от начала вы-

работки, притечки равны $Q_1 = q_1x$, утечки равны $Q_2 = q_2x$, а общий расход в любом сечении равен:

$$Q(i,j) = Q_n(i,j) + q_1x - q_2x. \quad (8)$$

Подставив $Q(i,j)$, Q_1 , Q_2 и их производные в выражение (6), после его интегрирования в пределах от 0 до l , где l – длина выработки, получим выражение для определения потерь давления при движении воздуха в горных выработках с равномерно распределенными утечками и притечками.

Для выработок с утечками ($q_1 = 0$) потери давления H по длине выражаются формулой:

$$H = \left[Q_n^2(i,j)R_1(i,j) - \frac{\gamma q_2 Q_n(i,j)}{gS^2(i,j)} \right] l + \left[\frac{\gamma q_2^2}{2gS^2(i,j)} - Q_n(i,j)q_2R_1(i,j) \right] + \frac{q_2^2 R_1(i,j)}{3} l^3 \quad (9)$$

Для выработок с притечками ($q_2 = 0$) потери давления выражаются формулой:

$$H = \left[Q_n^2(i,j)R_1(i,j) - \frac{\gamma q_1 Q_n(i,j)}{gS^2(i,j)} \right] l + \left[\frac{\gamma q_1^2}{2gS^2(i,j)} - Q_n(i,j)q_1R_1(i,j) \right] + \frac{q_1^2 R_1(i,j)}{3} l^3 \quad (10)$$

При рассмотрении случая неравномерно распределенных утечек (притечек) наибольший интерес представляет распределение потерь давления по вентиляционной штреку выемочного участка, где действуют притечки через выработанное пространство.

Для получения уравнения потерь давления необходимо знать выражение, описывающее изменение притечек вдоль вентиляционного штрека.

На основании обработки большого объема экспериментальных данных профессор А.Ф. Милетич получил эмпирическую формулу, описывающую притечки $Q_{прит}$ через выработанное пространство на вентиляционный штрек в виде:

$$Q_{прит} = Q_1 = \frac{mhc(1 - a^{-bx})}{60b \ln a} = \rho(1 - a^{-bx}), \quad (11)$$

где m - мощность пласта; h - ширина выработанного пространства (длина лавы $L(i,j)$); $b = 0,01$ – константа; x – расчетная длина выработки; a , c – постоянные величины, характерные для данного способа управления кровлей; значения их приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения a и c в формуле (11) для различных способов управления кровлей

Коэффициент	Частичная закладка	Полное обрушение
a	1,8	2,38
c	0,048	0,0081

Возвращаясь к уравнению (6) и учитывая, что третий член правой части равен нулю (на вентиляционном штреке штреке имеют место только притечки), подставим в него значения $Q(i,j)$ и dQ_1 .

$$Q(i, j) = Q_{\text{н}}(i, j) + \rho(1 - a^{-bx}); \quad dQ_1 = \rho b \ln \alpha a^{-bx} dx.$$

При этом получим уравнение для потерь давления на вентиляционном штреке dH_0 при наличии притечек, описываемых формулой А.Ф. Милетича:

$$dH_0 = \frac{Q_{\text{н}}^2(i, j)dx + 2Q_{\text{н}}(i, j)\rho(1 - a^{-bx})dx + \rho^2(1 - a^{-bx})dx}{K^2(i, j)} + \frac{1}{gS^2(i, j)} \left[Q_{\text{н}}^2(i, j)\rho b \ln \alpha a^{-bx} dx + \rho^2 b \ln \alpha a^{-bx} (1 - a^{-bx}) dx \right]. \quad (12)$$

Интегрируя уравнение (12) в пределах от 0 до l и подставив значение $K^2(i,j)$ получим выражение для потерь давления $H(i,j)$ на штреке:

$$H(i, j) = (Q_{\text{н}}(i, j) + \rho)^2 R_1(i, j)l - (a^{-bl} - 1) \times \left(\frac{2Q_{\text{н}}(i, j)\rho R_1(i, j)}{\ln \alpha} + \frac{2\rho^2 R_1(i, j)}{\ln \alpha} - \frac{Q_{\text{н}}(i, j)\rho b \gamma}{gS^2} - \frac{\rho^2 b \gamma}{gS^2} \right) + (a^{-2bl} - 1) \left(\frac{\rho^2 R_1(i, j)}{\ln \alpha} - \frac{\rho^2 b \gamma}{gS^2(i, j)} \right). \quad (13)$$

Полученные зависимости для подсчета потерь давления в горных выработках при наличии как равномерных (9,10), так и неравномерных (13) утечек и притечек, выведены на основе общих положений аэромеханики и представляют интерес при решении вопросов:

- проектирования ШВС, когда требуется предварительный расчет депрессии шахты или участка с утечками или притечками воздуха с целью выбора общешахтного или участкового вентилятора;

- расчета конфигурации линий тока утечек метановоздушной смеси через выработанное пространство. Собственно аналитический и графоаналитический методы таких расчетов, разработанные в ИГТМ НАН Украины, изложены в [5,6]; приведенные в настоящей публикации результаты позволят уточнить значения депрессии воздухоподающих и вентиляционных выработок выемочного участка, изменение соотношения которых именно и определяет конфигурацию поля линий тока утечек через выработанное пространство лавы;

- оценки изменения поля линий тока утечек при возникновении экзогенного

(в выработках выемочного участка) или эндогенного (непосредственно в пределах выработанного пространства) пожара с целью исключения попадания горящей метановоздушной смеси к средствам газоотсоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милетич А.Ф. Утечки воздуха при проветривании шахт / А.Ф. Милетич. – М.: Недра, 1968. – 128с.
2. Лидин Г.Д. Борьба со скоплениями метана в угольных шахтах / Г.Д. Лидин. – М.: Недра, 1961. – 264с.
3. Петров Г.А. Гидравлика переменной массы / Г.А. Петров. – Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1964. – 201с.
4. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика / Н.Я. Фабрикант. – М.: Наука, 1964. – 816с.
5. Торопчин О.С. Аналитический метод определения линий утечек воздуха через выработанное пространство / О.С. Торопчин, С.А. Головкин, Н.В. Безкровный // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / Ин-т геотехн. механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 69. – С. 277-288.
6. Торопчин О.С. Графоаналитический метод определения линий тока утечек воздуха через выработанное пространство / О.С. Торопчин // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / Ин-т геотехн. механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 68. – С. 245-258.

УДК 622.7:741.6:532.5:536.2

Канд. физ.-мат. наук В. И. Елисеев,
канд. техн. наук В. И. Луценко,
инженеры С. Г. Кравчина, А. В. Кривокорытов
(ИГТМ НАН Украины)

ВИБРАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ВО ВЛАЖНОМ СЫПУЧЕМ СЛОЕ

Описуються різні відомі і нові ефекти, які виникають в насиченою вологою моделі монодисперсної сипучого середовища при впливі вібрацій.

VIBRATION EFFECTS IN A WET LOOSE LAYER

Describes various known and new effects that arise in the model monodisperse granular media saturated with moisture when exposed to vibrations

Известно, что вибрационные воздействия способны оказывать различные, иногда парадоксальные, эффекты на материальные среды. Такие эффекты, возникающие при действии вибраций на системы твердых тел, на частицы и газовые пузырьки в жидкости, на сыпучие среды, описаны в [1-7]. Это устойчивость верхнего положения маятника с вибрирующей осью, изменение эффективной изгибной жесткости стержня, перемещение частиц на вибрирующей поверхности, в том числе подъем твердого тела в вибрирующей трубе с вертикальной осью, расслоение частиц сыпучей среды по удельному весу и плотности (сегрегация), аномальное поведение сыпучей среды в сообщающихся сосудах, интенсивное перемешивание компонент вибрирующей среды, вибротранспортирование сыпучих сред. Для систем многофазных сред экспериментально обнаружено резкое снижение распространения скорости звука в газожидкостной среде, всплытие в жидкости частиц с плотностью большей плотности жидкости и погружение частиц с плотностью меньшей плотности жидкости, в том числе газовых пузырьков, запираение отверстий в баках с жидкостью и вибрационная инжекция газа в жидкость.

Вышеуказанные эффекты оказывают значительное, а иногда и решающее значение на процессы переноса тепла и массы в пористых и сыпучих средах,