

- зарождение трещин происходило со дна нагнетательной камеры экспериментальных скважин, при этом трещина приобретала форму, близкую к овальной, с плоскостью ориентированной под некоторым углом к продольной оси скважины;

- площадь раскрытия образовавшихся трещин изменялась в широких пределах, а именно от  $S = 9,0 \text{ см}^2$  до  $S = 154,0 \text{ см}^2$  в зависимости от диаметра и длины нагнетательной камеры, а также формы ее дна и величины критического давления, приводящего к гидроразрыву.

**УДК 622.411.332:533.17**

Доктора техн. наук, проф.  
Г.А. Шевелев, В.Г. Перепелица  
(ИГТМ НАН Украины)

### **ВЫТЕСНЕНИЕ КИСЛОРОДА МЕТАНОМ В ШАХТНОЙ АТМОСФЕРЕ**

Приведено значення і фізичний смисл парціального тиску кисню і азоту в атмосферному повітрі, а також співвідношення концентрації кисню та метану в шахтній атмосфері, що дозволяє глибше зрозуміти природу їх заміщення та підвищити безпеку праці гірників.

### **REPLACEMENT OF OXYGEN METHANE IN A MINE ATMOSPHERE**

The meanings and physical sense of parciale pressure of oxygen and nitrogen in atmospheric air are given, and also the parity of concentration of oxygen and methane in a mine atmosphere, that allows more deeply to understand a nature their replacement and to increase safety miners.

Чистый сухой атмосферный воздух, как известно, состоит в основном из азота (78%) и кислорода (21%). Содержание остальных газов не превышает 1%. Концентрация углекислого газа, например, составляет всего 0,03%. Относительная влажность атмосферного воздуха в зависимости от температуры и давления может колебаться от 0 до 4%.

Входящие в состав атмосферного воздуха примеси, в большинстве случаев не вступают в химическое взаимодействие между собой, а представляют смесь, отдельные компоненты которой по разному могут влиять на организм человека.

Процентное соотношение азота и кислорода не зависит ни от давления, ни от температуры воздушной атмосферы. На Эвересте (высота более 8000 м) оно будет таким же, как и на уровне моря, хотя общее количество окажется меньше из-за падения атмосферного давления. Это связано с диффузией газов, которая обусловлена разностью их парциальных давлений в единой смеси. Процесс диффузии длительный, но непрерывный и по своей физической природе не имеет ничего общего с фильтрацией, которая происходит в пористых средах за счет разности статических давлений.

Плотность воздуха при нормальных условиях составляет  $1,29 \text{ кг/м}^3$ , а на высоте 6,5 км всего  $0,625 \text{ кг/м}^3$ , то есть в 2 раза меньше. В тропосфере падение ба-

рометрического давления с высотой происходит практически по линейной зависимости и на границе со стратосферой составляет примерно 100 мм. рт.столба.

В любой смеси различных газов каждый из них следует своему уравнению состояния, как если бы не было других газов (закон независимости состояния) и производит такое парциальное (частичное) давление, какой бы имел данный газ при температуре смеси, заполняя один весь объем. Данный вывод известен как закон Дальтона.

Газовая постоянная воздуха ( $R$ ) в уравнении состояния  $Pv = RT$  зависит от газовых постоянных отдельных газов и массового состава смеси. Если газовую постоянную отнести к одному киломолю, ее величина окажется равной  $R^* = 8314$  Дж/(кмоль·град). Тогда для определения величины  $R$  для любого газа можно воспользоваться выражением:

$$R = 8314/\mu,$$

где  $\mu$  - молекулярный вес данного газа.

Молекулярный вес кислорода равен 32, азота – 28. Соответственно газовая постоянная этих газов будет равна  $R_{O_2} = 260$  Дж/(кг·град),  $R_{N_2} = 297$  Дж/(кг·град). Тогда при барометрическом давлении 760 мм рт. ст. и соответствующем процентном отношении этих газов в атмосфере их парциальное давление будет равно:  $R_{O_2} = 0,21 \cdot 760$  мм рт. ст. = 160 мм рт. ст.;  $R_{N_2} = 0,78 \cdot 760$  мм рт.ст. = 593 мм рт. ст.

Запыленность и другие вредные или ядовитые примеси, которые могут оказаться в атмосферном воздухе, безусловно, отрицательно воздействуют на человека, но их процентное содержание по массе и по объему обычно невелико и на соотношение между азотом и кислородом они практически не оказывают влияния. Существуют санитарные предельно-допустимые нормы, которые регламентируют их содержание в атмосфере.

Метан, также как и азот, не имеет ни запаха, ни цвета и для организма человека он по своей природе нейтрален. Однако его присутствие в угольных шахтах таит многие угрозы: опасность вспышек, взрывов, прорывов метана, суффляжных выделений, слоевых скоплений, вытеснение из шахтной атмосферы кислорода, а также участие в возникновении внезапных выбросов угля, породы и газа.

Природная метаноносность угольных пластов не превышает 25 м<sup>3</sup>/т. Давление газа в нетронутом массиве на глубине тысячи метров составляет около 10 МПа. Вместе с тем относительная метанообильность шахт может в 5-10 раз превышать газоносность разрабатываемых пластов, что связано с выделением метана из вмещающей углепородной толщи в зоне влияния горных работ.

Согласно правилам безопасности допустимое содержание метана в исходящей воздушной струе не должно превышать 1,0-1,5 %. Для статического разбавления метана до таких концентраций требуется 70-100 кратное превышение подаваемого в шахту свежего воздуха. Если для примера взять шахту с относительной метанообильностью 150 м<sup>3</sup>/т суточной добычи и уровнем добычи угля

5000 тонн в сутки, то для ее проветривания потребуется количество воздуха, соизмеримое с массой добываемого угля. Причем здесь взяты не крайние, а средние значения исходных параметров. В целом на проветривание шахт затрачивается около 50 % всей потребляемой электроэнергии.

Для снижения газообильности шахт используются дегазация разрабатываемых пластов, выработанных пространств и углевмещающей толщи. Но и дегазация совместно со средствами вентиляции не исключают опасности возникновения локальных скоплений метана.

Взрывоопасной концентрацией метана в атмосферном воздухе являются пределы от 5 до 16 %.

При содержании метана в атмосферном воздухе до 5% он не горит, но поддерживает горение. Если метана более 16 %, подобная смесь может гореть, но не взрываться. Взрывоопасная концентрация находится внутри этих пределов. Причиной тому является определенное соотношение между окислителем (кислородом) и горючим (метаном). Химическая реакция процессов горения и взрыва метановоздушной смеси остается неизменной:  $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$ . Принципиальное отличие заключается в том, что горение происходит по поверхности тела, а взрыв охватывает весь его объем. Для того, чтобы любой из этих процессов произошел, необходимо еще источник воспламенения. В противном случае будет изменяться лишь состав атмосферного воздуха в шахте. Однако, подобные изменения несут не меньшую опасность для человека, чем опасность вспышек или взрыва метана.

Суммарное содержание по объему всех компонентов в атмосфере всегда равно 100%.

$$\% O_2 + \% N_2 + \% CH_4 \approx 100 \%$$

Изменение содержания кислорода и азота в шахтной атмосфере при наличии в нем метана можно оценить по формулам:

$$\begin{aligned} \% O_2 &= 21 \% O_2 (100 \% - \% CH_4), \\ \% N_2 &= 78 \% N_2 (100 \% - \% CH_4). \end{aligned}$$

Если концентрация метана в шахтной атмосфере составит 5% (нижний предел взрываемости), то содержание кислорода уменьшится до 20%:

$$\% O_2 = 21 \% O_2 (100 \% - 5 \% CH_4) = 20 \% O_2,$$

азота

$$\% N_2 = 78 \% N_2 (100 \% - 5 \% CH_4) = 74 \% N_2.$$

Подобное снижение концентрации кислорода в шахтной атмосфере человек не ощутит даже выполняя тяжелую физическую работу, а значит не почувствует опасности возможности взрыва.

При содержании метана 10% (самая взрывоопасная смесь) концентрация кислорода снизится до 19%:

$$\% O_2 = 21 \% O_2 (100 \% - 10 \% CH_4) = 19 \% O_2,$$

азота

$$\% N_2 = 78 \% N_2 (100 \% - 10 \% CH_4) = 70 \% N_2,$$

что также практически неощутимо.

При 20% метана (сверх верхнего предела взрываемости метановоздушной смеси), содержание кислорода в атмосфере снизится до 16,8 %, а азота – до 63 %. В среднем увеличение концентрации метана в шахтной атмосфере на каждые 5% ведет к замещению кислорода на 1%, а азота - на 4%.

При более высоких концентрациях метана шахтная атмосфера становится непригодной для дыхания. При 30%  $CH_4$  содержание кислорода снижается до 14,7%. Вдыхание такой смеси в течение 2-3 минут приводит к удушью. При 12% кислорода наступает мгновенная смерть.

Ранее существовало понятие «мертвый воздух» [1]. Он может образовываться не только в заброшенных, непрветриваемых шахтных выработках, но и колодцах, подвалах, независимо от того, какой газ вытесняет кислород: метан, радон, углекислый газ и др.

Если человек находится в замкнутом объеме (помещении, отсеке), происходит подобная описываемой, но не аналогичная картина. В данном случае происходит замещение кислорода углекислым газом, а не его вытеснение. В выдыхаемом воздухе содержание  $CO_2$  возрастает с 0,03 до 3,6%, а кислорода снижается до 16,4%, что связано с поглощением его гемоглобином крови. За 1 час человек в состоянии покоя вдыхает 500 л воздуха. Зная объем помещения, количество людей и время их пребывания, можно рассчитать, как быстро будет меняться состав воздуха. К этому следует добавить, что каждый человек за 1 час выделяет 120 ватт тепла и водяной пар при выдохе. Именно эти факторы делают рассматриваемые процессы не идентичными.

Если в закрытом помещении накапливается по каким-то причинам угарный газ, то критическая ситуация наступит гораздо быстрее, поскольку окись углерода в 300 раз активней, чем гемоглобин, поглощает кислород воздуха, окисляясь до углекислого газа.

Взрывы метановоздушной смеси в шахтах опасны не только своим непосредственным воздействием, но и последствием, которое зачастую оказывается еще более трагическим, реализуясь в виде подземных пожаров и взрывов угольной пыли. Следует отметить, что осевшая угольная пыль не взрывается. Для перевода угольной пыли во взрывоопасную смесь ее необходимо перевести во взвешенное состояние при соответствующей температуре. Именно такие условия создаются при взрывах метана. При этом взрывы - это кратковременный процесс, а на тушение пожаров затрачивается гораздо более длительное время. Более подробно эти вопросы рассмотрены в работе [2].

Нельзя оставить без внимания еще один аспект - роль метана в механизме внезапных выбросов угля, породы и газа. Сохраняется мнение о том, что горное давление (напряжения) разрушает выбросоопасный массив, а сжатый газ выносит уже разрушенную горную массу в выработку. Наши исследования [3]

доказывают, что подобные представления не соответствуют истине. Неравнокомпонентное поле напряжений обуславливает зарождение трещин, но их дальнейший рост, приводящий к послойному разрушению, невозможен без фильтрационных процессов в разрушающейся напряженной газонасыщенной среде. Для подтверждения достоверности сказанного в табл. 1 представлены энергетические параметры различных динамических и газодинамических явлений.

Таблица 1 – Энергетические параметры различных динамических явлений (кДж/т)

Явление	Потенциальная энергия			Работа		
	положения	упругого деформирования	сжатого газа	разрушения среды	перемещения горной массы	газового потока
Выбросы песчаника	-20 – (+70)	50	1000	80	450	25
Выбросы угля	-30 – (+100)	10	4000	100	450	150
Выбросы соли	-20 – (+100)	20	2000	100	450	70
Горные удары	200-500	70	-	30	200	-
Отжим пород	-	20	-	0,5	5	-
Пучение пород	-5	30	-	0,5	5	-
Стреляние	-	100	-	0,5	50	-
Обрушение	10–100	-	-	5	50	-

Из таблицы видно, потенциальной энергии упругого деформирования твердых тел (песчаника, угля, соли) явно недостаточно для того, чтобы совершить работу разрушения, тем более что далеко не вся потенциальная энергия среды может быть реализована в ее разрушении. Другие данные, приведенные в таблице, дают наглядное представление о соотношении действующих сил и совершаемой ими работе. Тема данной публикации и объем статьи не позволяют углубляться в этот вопрос, который подробно рассмотрен нами в работе [3].

В целом представленные результаты позволяют глубже понять природу и механизм процессов, происходящих в шахтной атмосфере, способствуя тем повышению безопасности работ

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Ф.А. Рудничная аэрогазодинамика - М : Недра, 1972. - 272 с.
2. Клебанов Ф.С. Воздух в шахте – М.: Издательский дом «Имидж», 1995. – 547 с.
3. Шевелев Г.А. Динамика выбросов угля, породы и газа - Киев: Наукова думка, 1989. – 159 с.