

# III РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

DOI: 10.25558/VOSTNII.2018.02.007

УДК 622.83 © А.М. Ермолаев, А.В. Адамков, А.А. Ермолаев, 2018

**А.М. ЕРМОЛАЕВ** д-р техн. наук, научный консультант АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово



**А.А. ЕРМОЛАЕВ** коммерческий директор ООО «Принт Альфа», г. Кемерово e-mail: 11F@bk.ru







# АЭРОГАЗОДИНАМИКА ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ

В статье рассмотрены типовые схемы аэрогазодинамики в тупиковых подготовительных выработках и аэродинамика става гибких шахтных вентиляционных труб при нагнетательном проветривании с помощью вентиляторов местного проветривания.

Отмечено, что характер выделения метана по длине тупиковой выработки разнообразен и имеет различную интенсивность. Наибольшие утечки воздуха из вентиляционного става происходят у устья выработки, вблизи вентилятора, а по мере подвигания к тупиковой части они уменьшаются.

Ключевые слова: МЕТАН, ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ, ПОДГОТОВИТЕЛЬНАЯ ГОРНАЯ ВЫРА-БОТКА, ВЕНТИЛЯТОР МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ, СТАВ ГИБКИХ ШАХТНЫХ ВЕН-ТИЛЯЦИОННЫХ ТРУБ, ТУПИКОВЫЙ ЗАБОЙ, АЭРОГАЗОДИНАМИКА, АЭРОДИНАМИ-КА, УТЕЧКИ ВОЗДУХА.

Вопросы борьбы со слоевыми и местными скоплениями метана в подготовительных горных выработках рассматривались нами ранее в статьях [1, 2]. В продолжение темы отметим, что при нагнетательном способе вентиляции в призабойной части тупиковой выработки процессы газопереноса происходят преимущественно в свободной воздушной струе, образующейся при выходе воздуха из трубопровода местного проветривания, а в остальной части выработки — в ограниченном воздушном потоке, твердыми границами которого являются поверхности выработки. Процессы газопереноса в тупиковой выра-ботке происходят в едином воздушном потоке, омывающем вначале призабойную часть выработки, а затем остальную ее часть. Поэтому наряду с другими факторами газодинамические процессы в призабойной части определяют начальные и граничные условия для остальной части выработки. Особенность газовой динамики тупиковых выработок — периодичность газовыделения в них. При ведении взрывных работ, а также при комбайновой отбойке в выработки быстро поступают газы, образующиеся при взрыве взрывчатых веществ, а также газы, выделяющиеся из разрушаемого массива и обнаженных плоскостей. Образовавшееся газовое облако под действием диффузионных процессов начинает рассеиваться, перемещаясь вдоль выработки. Вследствие ограниченности количества выделившихся при взрыве и отбойке газов и постоянства подачи свежего воздуха концентрация их как в забое, так и в движущемся по выработке газовом облаке непрерывно уменьшается. Уменьшение концентрации газа происходит за счет растяжения облака. В результате на каком-то расстоянии от забоя максимальная концентрация газа в облаке становится меньше допустимой концентрации Сдоп.

В основной части тупиковых выработок, проводимых как по углю, так и по породам (в полевых штреках и квершлагах), со стен выработок имеется газовыделение. Характерным является то, что газовыделение у устья выработок, как правило, меньше, чем вблизи тупика, по мере приближения к тупику оно возрастает. Так происходит при отсутствии по длине выработки очагов местного обильного или суфлярного выделения метана. Если же выработка пересекает тектонические разломы, большие трещины, то на этих участках выработки по ее длине появляются очаги обильного газопритока.

Суммарное значение газового облака в любом из его сечений  $C_i$  складывается из двух составляющих: первая составляющая  $C_i$  — концентрация газа, выделившегося в забое и движущегося по выработке, вторая составляющая  $C_2$  — концентрация газа, выделяющегося со стен выработки и горной массы, находящейся на данном участке:  $C_i = C_i + C_2$ .

Исследователи отмечают, что характер выделения метана по длине тупиковой выработки весьма разнообразен и имеет различную интенсивность, зависящую от технологических процессов и времени. На рис. 1 показаны наиболее типичные графики газовыделения в тупиковые выработки по его длине от устья до забоя.

Зависимость величины газовыделения от длины тупиковой выработки можно описать различными выражениями:

- прямой функцией вида *C*<sub>2</sub> = *f* (*a x*+*g*);
- степенной функцией (*C<sub>2</sub>*)= *f* (*a x<sup>2</sup>* + *b x* + *g*);
- экспоненциальной функцией
   C2 = f ( a e <sup>x</sup>+ b).





3 — в квершлагах при пересечении пластов угля и тектонических нарушений

Общее газовыделение из тупиковой выработки С определяют интегральной суммой по выражению

$$C = \int_{k}^{n} f(C_{2}) dx,$$

где *n*, *k* — пределы интегрирования по длине выработки от устья до тупика.

Анализ газодинамической обстановки по длине тупиковой выработки позволяет раскрыть явление слоевого скопления метана на отдельных ее участках.

## Аэрогазодинамика системы «вентилятор и став вентиляционных труб»

Известно, что требуемое количество воздуха для проветривания призабойного пространства определяется расчетным путем по пяти факторам: газовыделению; выделению вредных веществ при взрывных работах; максимальному числу людей, одновременно присутствующих в забое; по минимальной скорости и по тепловому фактору.

Учитывая требуемое количество воздуха в призабойной части выработки и нормативные потери по длине проектируемого вентиляционного става, выбирают тот или иной тип вентилятора местного проветривания, става вентиляционных труб. По существу, на этом и заканчивается расчетная часть проекта установки ВМП, которая ни в коей мере не отвечает на вопрос, какими должны быть вентиляционные трубы: герметичными или «дырявыми». Количество воздуха в призабойной части и объем воздуха, подаваемого вентиляторами местного проветривания, — величины независимые: последние в несколько (в 2-3 и более) раз выше первых, что никак нельзя отнести к энергосберегающим факторам. Расход энергии на перемещение лишних объемов воздуха не оправдан и приводит к дополнительным энергетическим и денежным затратам и может быть устранен или хотя бы обоснован расчетами, методик проведения которых, к сожалению, в действующем «Руководстве по проектированию вентиляции шахт» [3] нет.

С целью ликвидации вышеописанных недостатков сделан анализ аэродинамики системы «вентилятор и став вентиляционных труб» тупиковой подготовительной выработки с нагнетательным проветриванием, для чего использована расчетная схема, показанная на рис. 2.



Рис. 2. Схема аэродинамики става вентиляционных труб в подготовительной тупиковой выработке: *Q* — объем воздуха, подаваемого вентилятором в оптимальном режиме работы, м<sup>3</sup>/с;

Q<sub>з.п.</sub> — расчетный объем воздуха, подаваемого в забой, м<sup>3</sup>/с;

Н — давление вентилятора при оптимальном режиме работы, даПа

L<sub>кр</sub> — критическая длина става вентиляционных труб при оптимальном режиме работы вентилятора, м, определяемая из следующего выражения:

$$Q^2 L_{rp} / d^5, \qquad (1)$$

где *H*=6,45 — аэродинамическое сопротивление труб, *d* — диаметр вентиляционных труб, м.

Для последующих расчетов потребуются обозначения: l — длина отдельного отрезка вентиляционных труб, м; i — номер соединения отдельных отрезков труб, начиная от вентилятора;  $A_i$  — утечки воздуха через соединения вентиляционных труб, м<sup>3</sup>/с;  $B_i$  — утечки воздуха через ткань и швы вентиляционных труб на отрезке труб от i=1 до i+1 соединения, м<sup>3</sup>/с;  $C_i$  — объем воздуха, поступающего в следующий отрезок трубы за соединением, м<sup>3</sup>/с;  $R_i$  — давление в конце отрезка труб, даПа; Fi — количество воздуха, исходящее из отрезка вентиляционных труб, м<sup>3</sup>/с;  $P_i$  — давление в начале отрезка трубы, следующего за соединением, даПа.

Расчет аэродинамических параметров става вентиляционных труб осуществляют в следующем порядке:

1. Утечки воздуха в первом соединении вентилятора с вентиляционной трубой  $A_1$  определяем по выражению

$$A_{1} = 0,00035 H.$$
(2)

2. Количество воздуха, поступающее в первую трубу *С*, определяем по выражению

$$C_1 = Q - A_1. \tag{3}$$

3. Давление в начале первой трубы вследствие утечек в первом соединении снизится и составит *P*<sub>1</sub>, которое определяем по выражению

$$P_{i} = 6, 45 \ 6 \ C^{2} \left( L_{irr} - l \left( i - 1 \right) \right) / d^{5}.$$
(4)

4. Утечки воздуха через ткань и швы вентиляционных труб в основном зависят от типа ткани, числа швов, площади поверхности ткани, давления в трубопроводе. Для труб диаметром 800 мм, длиной l = 20 м их описывают выражением

$$B_{1} = 0,000138 P_{1}.$$
(5)

5. Количество воздуха в конце первой трубы F1 снизится на величину B1:

$$F_{i} = C_{i} - B_{i}. \tag{6}$$

6. Давление в конце первого отрезка составит *R*<sub>1</sub>, которое определяют по выражению

$$R_{1}=6,45; C_{1}F_{1}(L_{\kappa\rho}-l_{i})/d^{5}.$$
(7)

В дальнейшем расчет параметров аэродинамики става вентиляционных труб по его длине после первого соединения сводят к циклическому определению величин  $A_i$ ,  $C_i$ ,  $P_i$ ,  $B_i$ ,  $R_i$ ,  $F_i$  до выполнения одного из следующих условий:

– полного отсутствия разницы давления в ставе вентиляционных труб и тупиковой выработке, R = 0;

– полного отсутствия дебита воздуха в вентиляционной трубе, F = 0;

– равенства количества воздуха, исходящего из последнего отрезка трубы, количеству необходимого воздуха, подаваемого в забой,

$$F \leq Q_{,}$$

Заданная цикличность расчетов позволяет составить соответствующую блок-схему и программу для расчета аэродинамических параметров става вентиляционных труб, работающего с тем или иным вентилятором.

## Результаты расчетов параметров става вентиляционных труб, работающих с вентилятором ВМ-6м

Результаты расчетов параметров става вентиляционных труб, работающих с вентилятором ВМ-6 м для конкретных условий, произведенные на персональном компьютере, представлены в табл. 1. Из таблицы следует, что при использовании соединений вентиляционных труб старого образца дебит в конце четырнадцатого отрезка става ниже, чем требуется подать в забой ( $F_{14} = 2,98 < Q_{3p} = 3 \text{ } m^3/c$ ), а в конце 13-го отрезка он равен  $3,019 \text{ } m^3/c \approx Q_{3p}$ , что соответствует длине става 260 м.

i	<i>А,</i> м³/с	<i>С</i> , м³/с	<i>В,</i> м³/с	<i>F,</i> м³/с	<i>Р,</i> даПа	R, даПа
1	0,077	3,923	0,0288	3.89	208,764	207,23
2	0,072	3,821	0,02696	3,794	195,41	194,41
3	0,0679	3,72	0,0259	3,70	183	182
4	0,0637	3,637	0,02375	3,61	172	171
5	0,05986	3,554	0,02235	3,53	162	160,98
6	0,05634	3,4754	0,02106	3,45	152,74	152
7	0,0531	3,40	0,01988	3,38	145	143,2
8	0.0501	3,331	0,01879	3,31	136	135,39
9	0,04738	3,26	0,017778	3,247	128,8	128,13
10	0,0448	3,202	0,0168	3,1856	122	121,398
11	0,0424	3,14	0,01597	3,127	115,73	115,14
12	0,0403	3,0868	0,01516	3,0716	109,86	109,3237
13	0,03826	3,033	0,014	3,019	104,389	103,89
14	0,03636	2,98	0,0137	2,96896	99	98,8228

Расчетные аэродинамические параметры системы «вентилятор и став вентиляционных труб»

## Аэрогазодинамика системы «став гибких шахтных вентиляционных труб и подготовительной тупиковой выработки»

С помощью проведенного расчета определяют все аэродинамические параметры системы «вентилятор и вентиляционный став» на любом из его участков по длине тупиковой подготовительной выработки. На основе расчетов построены графики утечек воздуха из трубопровода по его длине (кривая 1, рис. 3), а также дебита воздуха в трубопроводе Q (кривая 3) и количества воздуха, проходящего по выработке, в любом его сечении W.

Если на этот график нанести кривую 4, характеризующую газовыделение из стен выработки и отбитой массы, перемещаемой по ней, то на ее основе можно построить кривую 5, которая будет характеризовать зависимость необходимых утечек воздуха из вентиляционного става для разжижения метана, поступающего в выработку. Кривая 5 — производная (зависимая) от кривой 4. Эта зависимость определяется предельно допустимой концентрацией газа в подготовительной выработке, то есть 0,5 или 1 %. Кривая 2 на рис. 3 характеризует скорость воздуха на любом участке выработки по ее длине, которую можно сопоставить с предельно допустимой минимальной скоростью, равной 0,25 м/с в тупиковых выработках не газовых шахт или 0,5 м/с на шахтах 3-й категории и выше (линия уровня — 6) (правила безопасности). В свою очередь, анализ кривой, характеризующей скорость движения воздуха в выработке, позволяет определять зоны и места, где скорость воздушного потока снижается до опасных величин, следовательно, предупреждать возможные скопления метана.

Таблица 1

Количество воздуха в вентиляционном ставе Q и суммарные утечки из него (A + B), количество воздуха в выработке W, количество воздуха, подаваемого в забой тупиковой выработки  $Q_{3,n}$ , взаимосвязанные величины. И для любой точки выработки по ее длине в *i*-м сечении данные величины могут быть определены из выражения

$$W_i = Q_{3.n.} + \sum_{i}^{n} (A+B) + C_{co2}N + \int_{i}^{n} f(x) dx.$$
 (8)

С учетом того, что  $Q_{_{3.n.}}$  в высокогазообильных выработках определяют из выражения

$$Q_{3.n.} = 100 \cdot I_3 / (C - C_0), \tag{9}$$

где  $I_3$  — максимальное количество газа, выделяющееся в забое подготовительной выработки, м<sup>3</sup>/мин;  $C_0$  — концентрация газа в воздухе, поступающем к всасу вентилятора местного проветривания, %; C — допустимая концентрация газа, %, получаем



Рис. 3. Аэродинамические характеристики вентиляционного става и подготовительной выработки по их длине

$$W = \frac{100J_3}{C - C_0} + \sum_{i}^{n} (A_i + B_i) + C_{co2}N + \int_{i}^{n} f(x)dx \quad (10)$$

Если исходящая из призабойного пространства в выработку вентиляционная струя, равная  $Q_{_{3,\Pi}}$ , уже обогащена метаном и имеет предельно допустимую его концентрацию, то по мере движения струи к устью она продолжает обогащаться метаном, что приводит к увеличению концентрации метана свыше допустимого предела, следовательно, на каждый объем метана, поступающего со стен выработки, и транспортируемого угля требуется из става вентиляционных труб выпустить в виде утечек не менее 100 таких же объемов свежего воздуха.

Логика явления и анализ фактических и расчетных утечек воздуха из вентиляционного става показывают, что наибольшие утечки происходят у устья выработки, вблизи вентилятора и по мере подвигания к тупиковой части они уменьшаются. Так, *A1* > *A2* > *A3*>...>*Ai* и *B1* > *B2* > *B3*>...> *Bi*.

Дальнейший анализ показывает, что если утечки воздуха с единицы длины вентиляционного става превышают в 100 раз приток газа с той же длины выработки, никаких дополнительных мер по борьбе с газовыделением не требуется (концентрация газа по всей длине выработки не изменяется и остается в пределах нормы). Если газоприток в выработку в 100 раз меньше утечек воздуха через швы, ткань и соединения на той же длине, то концентрация газа в исходящей струе уменьшается. Если газоприток превышает 0,01 величины утечек, то появляются условия загазирования выработки, появляются места, где концентрация метана превышает 1 %, следовательно, возникает необходимость в организации дополнительной утечки воздуха из става вентиляционных труб.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаев А.М. Слоевые и местные скопления метана в тупиковых подготовительных выработках // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2017.— № 4. — С. 33–39.

2. Ермолаев А.М. Вопросы борьбы со слоевыми и местными скоплениями метана в тупиковых выработках // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — № 1. — 2018. — С. 63–68.

3. Руководство по проектированию угольных шахт: утв. 15 авг. 1989. Доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт».

#### DOI: 10.25558/VOSTNII.2018.02.007

UDC 622.83 © A.M. Ermolaev, A.V. Adamkov, A.E. Ermolaev, 2018

### A.M. Ermolaev

Doctor of Engineering Sciences, Scientific Consultant JSC «NC VostNII», Kemerovo

#### A.V. Adamkov

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo e-mail: aav\_75@mail.ru

#### A.E. Ermolaev

Marketing Director OOO «Print Alfa», Kemerovo e-mail: 11F@bk.ru

### **AEROGASDYNAMICS OF DEAD-END HEADINGS**

Typical aerogasdynamics schemes for dead-end preparatory excavations and aerodynamics of a stack of flexible mine ventilation pipes during the forced ventilation with local fans are considered. It is noticed that the methane release along the length of the dead-end headings is varied and has different intensity. The biggest amount of air leakage from the vent stack occurs near the heading mouth, near the fan, and as it moves toward the deadlock. It decreases while moving to the dead-end part.

Keywords: METHAN, GAS EMISSION, OPENING, FAN FOR LOCAL VENTILATION, STACK OF FLEXIBLE MINE VENTILATION PIPES, DEAD-END, AEROGGAZODYNAMICS, AERODYNAMICS, AIR LEAKAGE.

#### REFERENCES

1. Ermolaev A.M. Sloevye i mestnye skopleniya metana v tupikovykh podgotovitelnykh vyrabotkakh (Layering and local methane accumulations in deadend development headings). Vestnik nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti = Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety. 2017. № 4. pp. 33–39.

2. Ermolaev A.M. Voprosy borby so sloevymi i mestnymi skopleniyami metana v tupikovykh vyrabotkakh (Prevention of methane layering and local accumulations in dead-end headings). Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti = Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety. 2018. № 1. pp. 63–68.

3. Rukovodstvo po proektirovaniyu ugolnykh shakht: utv. 15 avg. 1989 (Coal mine design requirements manual (last updated August 15, 1989). Available at: «Tekhekspert» system.