

УДК 622.817.4

**Ю. Ф. БУЛГАКОВ**, доктор техн. наук,  
**В. А. ТРОФИМОВ**,  
**Я. В. МЕЛЬНИКОВА**, кандидаты техн. наук  
(ДонНТУ)



Ю. Ф. Булгаков



В. А. Трофимов



Я. В. Мельникова

## Оценка устойчивости проветривания горных выработок при пожарах

*Рассмотрены газодинамические процессы при пожарах в шахтах. Предложена методика, позволяющая прогнозировать влияние термического расширения воздуха на проветривание.*

Отечественный и зарубежный опыт ликвидации тяжелых аварий свидетельствует, что в последние годы сложность их протекания и время ликвидации существенно возросли. В некоторых случаях это обусловлено трудностью обоснования и выбора аварийного вентиляционного режима, так как необходимо решить комплекс аэротермодинамических задач. Особую сложность представляют расчеты устойчивости проветривания наклонных выработок при пожарах, ошибка в которых может привести к гибели горнорабочих в результате непредвиденного опрокидывания вентиляционной струи под действием собственной тяги пожара, термического расширения воздуха или напора, создаваемого средствами пожаротушения. Основные задачи аварийной вентиляции и способы их решения опубликованы в работах [1–3]. Существующие нормативные документы по этому вопросу устарели и требуют доработки. При этом нерешенной остается задача учета влияния термического расширения воздуха на устойчивость проветривания при развитии подземного пожара.

В то же время в практике ликвидации аварий все больше используются современные ПЭВМ и программное обеспечение для решения различных задач рудничной вентиляции [4, 5], с помощью которых значительно повышается оперативность и точность расчетов. Вследствие этого разработка рекомендаций по выбору аварийного режима вентиляции выработок при пожарах и создание на их основе программного обеспечения достаточно актуальны.

Исследования газодинамических задач затрагивают главные аспекты разработки программного обеспечения для моделирования аварийной вентиляции, они ча-

стично изложены в работе [6]. Кроме того, вопросы учета влияния атмосферного давления на интенсивность газовыделения до конца не изучены.

Наиболее сложны для решения задачи регулирования воздухораспределения, поскольку процесс выбора аварийного вентиляционного режима (АВР) включает: оценку обстановки на аварийном участке, прогноз развития пожара, оценку и выбор средств пожаротушения. Выделим два основных направления их решения, а именно выбор АВР для плана ликвидации аварий (ПЛА) и для процесса ведения горноспасательных работ.

План ликвидации аварии, как правило, предусматривает применение двух общешахтных аварийных вентиляционных режимов – реверсирования и остановки отдельных вентиляторов главного проветривания (ВГП), а также одного местного – повышение устойчивости проветривания при пожаре в наклонной выработке. Из общешахтных наиболее изучен режим реверсирования вентиляционных струй [6], для которого разработано программное обеспечение – АРМ «Вентиляция» [7], позволяющее моделировать изменение направления вентиляционных струй с учетом аэродинамических сопротивлений вентиляционных сооружений и вентиляторных установок. Точность расчетов обеспечивается за счет определения параметров в ходе планового реверсирования вентиляции конкретной шахты. Однако, исходя из оптимизации выбора аварийного вентиляционного режима (для ПЛА), надо решить: сохранять нормальный режим проветривания шахты (с возможностью местного регулирования) или проводить общешахтное реверсирование вентиляции.

Реверсивный режим в комбинации с остановкой одного из вентиляторов, как правило, применяют при пожарах на вентиляционных установках.

В случае пожаров в наклонных выработках, когда существует опасность нарушения стабильности проветривания, принимают меры по обеспечению устойчивости вентиляционной струи. Их основу составляют действия, способствующие увеличению или уменьшению расхода воздуха в аварийной выработке, для чего используют противопожарные двери. Для оценки эффективности указанных режимов проветривания применяется программный комплекс АРМ «Вентиляция». Вместе с тем это программное обеспечение не имеет возможности для выбора аварийных вентиляционных режимов, перегружено расчетными задачами и в некоторых случаях требует значительных затрат времени на моделирование аварийных ситуаций. Кроме того, комплекс практически не решает задач моделирования и расчета метанораспределения.

Выбор аварийного вентиляционного режима в ходе ликвидации аварии, как правило, осложнен тем, что руководитель горноспасательных работ должен принимать решения в сжатые сроки, и эти решения должны обеспечить как скорейшую ликвидацию аварии, так и безопасность ведения горноспасательных работ. Особую сложность вызывают задачи выбора аварийных вентиляционных режимов в тех случаях, когда для ликвидации пожара применяются мощные средства (газогенераторы или пеногенераторы) и необходимо прогнозировать не только последствия развития пожара, но и влияние средств пожаротушения на проветривание аварийных выработок.

Оценку эффективности использования средств пожаротушения [4, 5] можно разделить на два этапа. Первый – это собственно моделирование работы средств пожаротушения в шахтной вентиляционной сети, а второй – оценка возможных последствий их применения. Вопросы моделирования до настоящего времени досконально не изучены, отсутствуют и методики моделирования, т. е. прогноза эффективности инерттизации аварийного участка. Можно использовать результаты ранее проведенных исследований [4, 5], однако для разработки на этой основе программного обеспечения надо уточнить математический аппарат, разработанный ранее, упростить его и представить в виде, удобном для программирования. Из анализа особенностей применения инертных газов (азот,  $\text{CO}_2$ ) и порошков для тушения пожара следует, что их воздействием на вентиляционную струю можно пренебречь. Поэтому целесообразно рассмотрение вопроса устойчивости проветривания выработок в зависимости от условий развития пожара.

Известно [2, 5], что развитие подземного пожара зависит от многих условий, основные из них: вид горючих материалов, их количество, степень пожарной нагрузки выработки каждым материалом и режим вентиляции. Эти факторы влияют не только на динамику

пожара, но и на формирование его тепловой депрессии, а также на устойчивость проветривания аварийной и смежных выработок.

Общий объем воздуха, необходимого для полного выгорания горючих материалов на 1 м длины выработки, определяется по формуле [1]

$$q_v = \sum_{i=1}^n m_i \Pi_i q_i, \quad (1)$$

где  $n$  – количество горящих выработок;

$m_i$  – масса  $i$ -го горючего материала на 1 м<sup>2</sup> поверхности;

$\Pi_i$  – ширина конвейерной ленты или часть периметра выработки, закрепленной деревянной затяжкой, м;

$q_i$  – объем воздуха, необходимый на сгорание 1 кг  $i$ -го материала, м<sup>3</sup>.

При наличии в аварийной выработке только деревянных затяжек расчетная пожарная нагрузка принимается равной 22 кг/м<sup>2</sup>, а при наличии затяжек и деревянных рам на расстоянии более 0,8 м друг от друга – 33 кг/м<sup>2</sup>, на расстоянии менее 0,8 м – 44 кг/м<sup>2</sup>. Согласно Руководству [1] резиноканальная конвейерная лента имеет среднюю горючую нагрузку 22 кг/м<sup>2</sup>, а резиноканевая – 15 кг/м<sup>2</sup>.

Часть периметра выработки, закрепленной деревянной затяжкой, ориентировочно определим по формуле  $\Pi_i = 3,3\sqrt{S}$  (где  $S$  – площадь поперечного сечения аварийной выработки, м<sup>2</sup>). Шириной конвейерной ленты  $\Pi_2$  при пожаре считается ее двойная ширина, так как горят обычно обе ее стороны.

При расчете пожарной нагрузки конвейерных выработок, закрепленных деревянной затяжкой, нагрузкой других горючих материалов, таких, как силовые кабели, мелкие скопления угля и угольной пыли, можно пренебречь. Указанная нагрузка составляет менее 5 кг на 1 м выработки по сравнению с десятками и сотнями килограммов на 1 м соответственно конвейерной ленты и деревянной затяжки [1].

Определив общий объем воздуха, требуемого для полного выгорания горючих материалов, найдем предельную скорость распространения пожара по выработке:

$$v_{пр} = 60Q/q_v,$$

где  $Q$  – расход воздуха в аварийной выработке, м<sup>3</sup>/с;

$q_v$  – пожарная нагрузка, кг/м<sup>3</sup>.

В работе [1] предлагается текущую скорость распространения пожара определять по формуле

$$v = v_{пр} / \sqrt{1 + (b/\tau)^2}, \quad (2)$$

где  $b$  – параметр, характеризующий скорость развития пожара, м/мин, для конвейерной ленты  $b = 80 + 42 Q/S$ ; для конвейерной ленты, деревянной затяжки и деревянных рам  $b = 20 + 21 Q/S$ ;

$\tau$  – время от момента возникновения пожара, мин.

После интегрирования уравнения (2) по времени можно рассчитать дальность распространения пожара:

$$L_{\text{п}} = v_{\text{п}} \left( \sqrt{\tau^2 + b^2} - b \right) + L_0, \quad (3)$$

где  $L_0 = 10/\Pi_i$  – начальная длина зоны воспламенения для случая возгорания минерального масла или метана на больших площадях, а также при локальном воспламенении метана, конвейерной ленты от трения или других горючих материалов от воздействия тепловых импульсов.

Если ввести в рассмотрение время горения  $\tau_r$  того или иного материала, то по формуле, аналогичной формуле (3), можно вычислить длину зоны тления продуктов горения ( $\tau \geq \tau_r$ ):

$$L_r = v_{\text{п}} \left( \sqrt{(\tau - \tau_r)^2 + b^2} - b \right) + L_0. \quad (4)$$

Время горения определяют по наиболее длительно горящему материалу

$$\tau_r = m_i / v_r, \quad (5)$$

где  $v_r$  – скорость выгорания  $1 \text{ м}^2$  древесины или конвейерной ленты, равная 0,21 и 0,37 кг/мин соответственно.

Длину зоны горения  $l_r$  находят как разность длин:  $l_r = L_0 - L_r$  (где  $L_0$  – длина начальной зоны воспламенения, м;  $L_r$  – длина зоны тления, м). Зная длину зоны горения, устанавливают характер нарастания температуры и ее охлаждение по ходу движения вентиляционной струи, а также тепловую депрессию в зависимости от условий развития пожара.

Однако параметр  $b$ , характеризующий скорость развития пожара, – эмпирическая константа, и он не всегда правильно отражает динамические явления в аварийной выработке. Так, лабораторный анализ шахтного воздуха на содержание пожарных газов или кислорода в исходящей струе аварийного участка дает возможность более точно определить длину зоны горения. С одной стороны, масса вещества, сгораемого за единицу времени в очаге пожара, определяется по формуле [1]

$$G = (1 - C_{\text{к}} / C_{\text{к.а}}) Q / m_i, \quad (6)$$

где  $C_{\text{к}}$  и  $C_{\text{к.а}}$  – содержание кислорода в струе, исходящей из участка при пожаре, и струе, поступающей в аварийный участок, %.

С другой стороны, та же масса вещества  $G = v_i \Pi_i l_r$ .

Сравнивая зависимости (5) и (6), найдем формулу для расчета длины зоны горения по данным лабораторного анализа:

$$l_r = (1 - C_{\text{к}} / C_{\text{к.а}}) Q / (m_i \Pi_i v_i), \quad (7)$$

что дает возможность откорректировать эмпирическую константу и в целом математическую модель развития пожара.

При пожаре в наклонной или вертикальной выработке возникает необходимость оценить устойчивость проветривания как самой аварийной выработки, так и

параллельных ей выработок. Точность оценки во многом зависит от расчетного значения тепловой депрессии, которая в свою очередь зависит от условий развития пожара. Чтобы определить значение тепловой депрессии [2], предварительно следует вычислить коэффициент нагрева воздуха в зоне горения:

$$a_r = 0,12 + 0,15S/Q,$$

где  $S$  – площадь сечения выработки,  $\text{м}^2$ ;

$Q$  – расход воздуха, поступающего в зону пожара,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Кроме того, необходимо определить максимальную температуру воздуха (пожарных газов):

$$T_{\text{max}} = T_0 + (T_r - T_0)(1 - e^{-a_r l_r / \sqrt{S}}),$$

где  $T_0$  – температура воздуха в струе, поступающей в аварийный участок, К;

$T_r$  – температура горения различных материалов (ориентировочно), К.

Если известно место расположения очага пожара, то температура воздуха на выходе из аварийной выработки

$$T_{\text{к}} = T_0 + (T_{\text{max}} - T_0)e^{-a_r x(10\sqrt{S})}, \quad (9)$$

где  $x$  – расстояние от конца зоны горения до устья выработки, м.

Тогда тепловая депрессия

$$h_r = -\rho_0 g l_r \sin \beta \left( 1 - T_0 / T_r + \frac{10\sqrt{S}}{a_r l_r} \ln T_{\text{max}} / T_{\text{к}} \right), \quad (10)$$

где  $\rho_0$  – плотность воздуха при нормальных условиях

( $\gamma_0 = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ );

$g$  – ускорение свободного падения ( $9,8 \text{ м}/\text{с}^2$ );

$\beta$  – угол наклона аварийной выработки к горизонту, ... °.

При отсутствии данных о месте расположения очага пожара для определения значения тепловой депрессии необходимо измерить температуру воздуха  $T_{\text{к}}$  в исходящей из аварийной выработки струе либо задать  $T_{\text{к}} \approx T_0$ .

Данные горноспасательной разведки о температуре воздуха  $T_{\text{к}}$  дают возможность установить согласно уравнению (10) место расположения очага пожара:

$$x = (10\sqrt{S}) / a_r \left( \ln \frac{T_r - T_0}{T_{\text{к}} - T_0} \right). \quad (11)$$

Необходимое условие при этом  $T_{\text{к}} > T_0$ .

Для более точной оценки устойчивости проветривания выработок при пожаре следует вводить в расчет коэффициент термического расширения воздуха

$$K_T = 1 + (l_r / l T_0) \left[ T_r - T_0 + (10\sqrt{S} / (a_r l_r)) (T_r - T_{\text{к}}) \right], \quad (12)$$

где  $l$  – длина аварийной выработки, м.

Поэтому аэродинамическое сопротивление аварийной выработки  $R_a$ , необходимо пересчитать:  $R_a = K_T R$

(где  $R$  – сопротивление выработки до возникновения в ней пожара, Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>).

При нисходящем движении воздуха в наклонной аварийной выработке возможно опрокидывание вентиляционной струи, если показатель устойчивости станет меньше единицы:

$$P = h_{кр} / h_T \quad (13)$$

где  $h_{кр}$  – критическая депрессия аварийной выработки, Па.

Потеря устойчивости струи ( $P < 1$ ) возможна спустя некоторое время  $\tau$  с момента возникновения пожара.

При восходящем движении воздуха в аварийной выработке существует опасность опрокидывания вентиляционной струи в параллельной ей выработке. Условием ее стабильного проветривания является сохранение неравенства

$$h_T < K_T R Q_{кр}^2 \quad (14)$$

где  $Q_{кр}$  – критический расход воздуха в аварийной выработке, м<sup>3</sup>/с.

Входящие в формулы (13) и (14) параметры  $h_{кр}$  и  $Q_{кр}$  определяются предварительно, экспериментальным путем в шахтных условиях либо расчетами на ЭВМ вентиляционной сети.

В настоящее время при расчетах устойчивости проветривания в условиях подземного пожара используются экстремальные значения эмпирических показателей, что снижает возможность маневра при выборе аварийного вентиляционного режима. К недостаткам известных методик расчета тепловой депрессии можно отнести то, что в них не принимается во внимание действие объемного расширения воздуха.

Суть предлагаемой авторами статьи методики заключается в следующем. Вначале определяются тепловые параметры вентиляционной струи: температура воздуха (пожарных газов) в зоне горения  $T_T$ ; тепловая депрессия  $h_T$ ; термическое сопротивление движению воздуха  $K_T$ .

В качестве исходной информации для расчета следует использовать такие параметры, как: длина аварийной выработки  $l$ , м; средняя площадь ее поперечного сечения  $S$ , м<sup>2</sup>; угол наклона выработки к горизонту  $\beta$ , ... °; температура воздуха в аварийной выработке до возникновения пожара  $T_0$ , К; расход воздуха в выработке до возникновения пожара  $Q_0$ , м<sup>3</sup>/с; время с момента возникновения пожара  $\tau$ , мин; расстояние от устья выработки (по ходу движения струи воздуха) до места возникновения пожара  $x_0$ , м; содержание кислорода в выработке до возникновения аварии  $C_{к.а}$ , %; содержание кислорода на выходе из аварийной выработки (при наличии данных разведки)  $C_k$ , %; температура

на выходе из аварийной выработки (при наличии данных разведки)  $T_k$ , К.

Затем по оперативным данным необходимо уточнить вид горючих материалов, их расположение в выработке и тип источника воспламенения, после чего рассчитать параметры подземного пожара в соответствии с действующим нормативным документом [1]. Это дает возможность горноспасателям в оперативной обстановке реально оценить степень устойчивости проветривания в аварийных выработках и принять адекватные меры по стабилизации ситуации, выполнив тот или иной вентиляционный маневр.

На основании изложенного можно сделать **вывод** о том, что существующие нормативные документы устарели, не учитывают такой важный фактор, как термическое расширение воздуха, и требуют доработки. Предлагаемая методика учитывает указанный фактор и рекомендуется для использования оперативными работниками горноспасательной службы Украины на этапе разработки ПЛА и ведения аварийно-спасательных работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Руководство* по определению параметров подземного пожара и выбору эффективных средств его тушения: утв. Всесоюз. упр. ВГСЧ 09.09.85. – Донецк: ВНИИГД, 1985. – 96 с.
2. *Рекомендации* по выбору эффективных режимов проветривания шахт при авариях. – Донецк: НИИГД, 1995. – 168 с.
3. *Осипов С. Н.* Вентиляция шахт при подземных пожарах / С. Н. Осипов, В. М. Жадан. – М.: Недра, 1973. – 150 с.
4. *Руководство* по применению инертных газов при ликвидации пожаров в шахтах, опасных по газу и пыли: утв. Всесоюз. упр. ВГСЧ 22.10.86. – Донецк: ВНИИГД, 1989. – 190 с.
5. *Руководство* по применению инертных газов при ликвидации пожаров в шахтах: утв. нач. ЦШ ВГСЧ Минуглепрома СССР 19.07.89. – Донецк: ВНИИГД, 1989. – 190 с.
6. *Болбат И. Е.* Аварийные вентиляционные режимы в угольных шахтах / И. Е. Болбат, В. И. Лебедев, В. А. Трофимов. – М.: Недра, 1992. – 206 с.
7. *Потемкин В. Я.* Автоматизация составления оперативной части планов ликвидации аварии на шахтах и рудниках / В. Я. Потемкин, Е. А. Козлов, И. Е. Кокоулин. – К.: Техника, 1991. – 125 с.
8. *Абрамов Ф. А.* Автоматизация проветривания шахт / Ф. А. Абрамов, В. А. Бойко. – К.: Наук. думка, 1967. – 310 с.