

УДК 622. 822

В.А.Портола

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЕ АЗОТА ДЛЯ БОРЬБЫ С ПОЖАРАМИ И ВЗРЫВАМИ В ШАХТАХ

Увеличение темпов угледобычи с одновременным ростом глубины горных работ обостряет проблему безопасности труда шахтеров. Так, возрастающее выделение метана повышает вероятность образования взрывоопасных скоплений горючего газа. Активное проветривание выработанного пространства может стимулировать развитие процесса самовозгорания скоплений угля с повышенной химической активностью (отложения угольной пыли, зоны геологических нарушений), увеличивает скорость повышения температуры очага на стадии возгорания [1]. Изоляция, снижение количества подаваемого воздуха повышает концентрацию метана в рудничной атмосфере, вероятность воспламенения и взрыва.

Повысить эффективность и безопасность тушения подземных пожаров позволяет инертизация атмосферы выработанного пространства с очагом самовозгорания. Так, при концентрации кислорода менее 12% взрыв метана не происходит. Поэтому предварительная подача в выработанное пространство расчетного количества инертного газа даст возможность изолировать очаг без опасности взрыва. Последующее поглощение кислорода углем ведет к дальнейшей инертизации атмосферы выработанного пространства, прекращению пламенного горения и остыванию очага.

Снижение содержания кислорода в рудничной атмосфере путем подачи инертного газа в выработанное пространство позволяет также затормозить или предотвратить развитие эндогенного пожара. Однако на данный момент нет однозначных данных о величине концентрации кислорода, останавливающей развитие процесса самовозгорания или приводящей к остыванию очага пожара. Так, по мнению [2], для предотвращения и тушения эндогенных пожаров необходимо снизить концентрацию кислорода в воздухе до 10 %. По данным [3] горючее вещество может тлеть при концентрации кислорода менее 2%, а в [4] сделан вывод о необходимости понижения концентрации кислорода до 1%. В [5] утверждается, что для развития процесса самовозгорания угля концентрация кислорода в воздухе должна быть не менее 18%.

Для оценки влияния концентрации кислорода на процесс самовозгорания применялось математическое моделирование с использованием уравнений, описывающих нестационарный тепло- и массоперенос в одномерном скоплении угля. Перенос тепла, генерируемого при взаимодействии кислорода с углем, осуществлялся за счет теплопроводности и конвекции. С учетом испарения начальной влаги и экспоненциальной зависимости скорости сорбции кислорода углем от температуры использовались уравнения

$$\begin{aligned}
 (1-m)\rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} (1-m) + (1-m)\rho_1 \times \\
 CQK \exp(-E / RT) - \rho_2 c_2 V \frac{\partial T}{\partial x} - Q_W \rho_3 \frac{\partial W}{\partial \tau}; \\
 m \frac{\partial C}{\partial \tau} &= mD \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - \\
 &\quad -(1-m)\rho_1 CK \exp(-E / RT); \\
 T(x,0) = T_0; \quad C(x,0) = C_0; \quad W(x,0) = W_0; \quad (1) \\
 \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_1 (T - T_0); \\
 \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} &= \alpha_2 (T - T_0); \\
 \frac{\partial W}{\partial \tau} \Big|_{T=373} &= 0; D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{c1} (C - C_0); \\
 D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=L} &= \alpha_{c2} (C - C_0),
 \end{aligned}$$

где m - пористость скопления угля; ρ_1 - плотность угля, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_1 - теплоемкость скопления угля, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; T - температура, К; τ - время, с; λ - коэффициент теплопроводности угля, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; C - концентрация кислорода; Q - тепловой эффект реакции окисления, $\text{Дж}/\text{м}^3$; K - константа скорости окисления, $\text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$; E - энергия активации, $\text{Дж}/\text{моль}$; R - газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$; ρ_2 - плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_2 - теплоемкость газа, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; V - скорость фильтрации газа, $\text{м}/\text{с}$; Q_W - удельная теплота испарения воды, $\text{Дж}/\text{кг}$; ρ_3 - плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; W - влажность угля; D - коэффициент молекулярной диффузии кислорода, $\text{м}^2/\text{с}$; α_i - коэффициент теплоотдачи от угля, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; α_{ci} - массоотдача, $\text{м}/\text{с}$; L - размер угольного скопления, м.

Решение системы уравнений (1) осуществлялось конечно-разностным методом при параметрах: $L = 3,0 \text{ м}$; $\rho_1 = 1200 \text{ кг}/\text{м}^3$; $m = 0,3$; $Q = 1,26 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{м}^3$; $E = 6,28 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{моль}$. Для упрощения расчетов испарение влаги происходило при температуре 373 К, а его скорость подбиралась из условия поддержания этой температуры до полного высыпивания угля. Для оценки степени влияния концентрации кислорода на процесс самовозгорания угля в качестве критерия использовали время разогрева скопления угля до температуры 150 °C.

Решение уравнений (1) показало, что сниже-

ние концентрации кислорода в воздухе позволяет существенно затормозить процесс самовозгорания (рис. 1). Наблюдается увеличение продолжительности как начальной стадии разогрева, так и стадии экспоненциального повышения температуры. Из результатов исследований следует, что при заданной химической активности угля и содержании кислорода менее 10% в расчетные 100 суток возгорания угля не произошло. Интересно отметить, что по мере падения концентрации кислорода в потоке воздуха уменьшается и величина оптимальной скорости воздуха, обеспечивающей наибольший прирост температуры. Эффективность влияния концентрации кислорода иллюстрируется тем фактом, что уменьшение этого па-

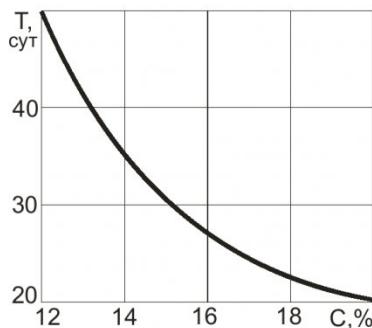


Рис. 1 Время самонагревания угля до температуры 150°C в зависимости от концентрации кислорода в атмосфере

раметра в 1,7 раза приводит к увеличению продолжительности развития процесса самовозгорания до принятой температуры в 2,4 раза. Дальнейшее снижение содержания кислорода вызывает резкое падение скорости разогрева.

Приведенные результаты свидетельствуют о целесообразности и эффективности применения инертизации атмосферы выработанного пространства для предотвращения развития самовозгорания угля. Выбор концентрации кислорода, необходимой для предотвращения эндогенного пожара, будет определяться инкубационным периодом самовозгорания. В случае тушения уже возникшего очага пожара, подача инертного газа должна осуществляться из условия снижения концентрации кислорода ниже 12 %, что предотвратит взрыв возникающих скоплений метана.

Инертизацию атмосферы выработанного пространства целесообразно проводить подачей азота в поток воздуха, поступающего в выработанное пространство. Чистота получаемого азота обычно может колебаться от 90 до 100% в зависимости от совершенства оборудования. Поэтому содержание кислорода в образуемой смеси зависит от соотношения расходов воздуха и подаваемого азота. Концентрацию кислорода в образующейся газовой смеси можно определить по выражению

$$C = \frac{G_B C_B + G_A C_A}{G_B + G_A}, \quad (2)$$

где C_A, C_B – концентрация кислорода соответст-

венно в поступающем в выработанное пространство воздухе и подаваемом азоте; G_A, G_B – расход соответственно азота и воздуха, м³/с.

Зависимость концентрации кислорода получаемой газовой смеси от соотношения расходов азота и воздуха при различной чистоте азота приведена на рис. 2. Приведенные данные позволяют выбрать расход азота в зависимости от его чистоты и количества поступающего в выработанное

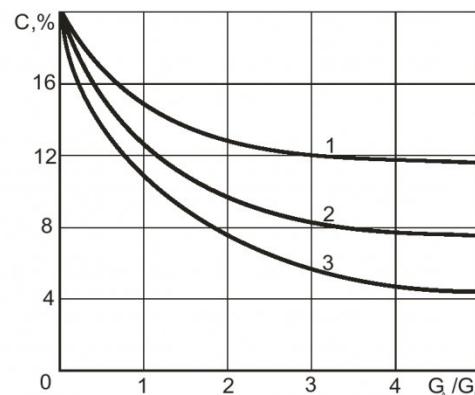


Рис. 2. Изменение концентрации кислорода в смеси в зависимости от соотношения расхода азота к расходу воздуха: 1 – чистота азота 90%; 2 – чистота азота 95%; 3 – чистота азота 99%.

пространство воздуха для создания взрывобезопасной атмосферы .

Реальная концентрация кислорода в выработанном пространстве будет снижаться за счет дополнительного выделения метана из угля и вмещающих пород. Содержание кислорода в выработанном пространстве :

$$C = \frac{G_B C_B + G_A C_A}{G_B + G_A + G_M}, \quad (3)$$

где G_M – выделение метана в выработанном пространстве, м³/с.

Для ликвидации подземных пожаров, возникающих в горных выработках, разработаны и применяются генераторы инертных газов (ГИГ-4, ГИГ-1500 и др.). Инертная паро-газовая смесь образуется в турбогенераторе, дополненном камерами дожигания и охлаждения продуктов горения водой. Недостатком данных устройств является высокая температура образуемой смеси (около 80°C), большое содержание токсичного оксида углерода (около 0,2%). Поэтому для ликвидации пожаров в выработанном пространстве данные устройства не применяются из-за опасности прогрева больших скоплений угля и горных пород, а также аккумуляции токсичных продуктов в пустотах выработанного пространства.

Практика применения инертных газов для борьбы с эндогенными пожарами на угольных шахтах показала, что наиболее эффективным средством является азот. Его плотность близка к плотности воздуха, поэтому он равномерно распределяется в поданном объеме. Азот не токсичен, распространен в природе, и его легко получить

при разделении воздуха.

Большие объемы азота можно получить разделением воздуха с помощью криогенной или мембранных технологий. В Кузбассе при борьбе с подземными пожарами в шахтах в основном применяют азот, производимый криогенным способом (как побочный продукт при получении кислорода).

Для транспортировки азота в Кузбасс используют железнодорожные криогенные цистерны. Перевозку жидкого азота к местам подачи инертного газа в горные выработки или выработанное пространство, а также хранение жидкого азота осуществляют установками УПА-8/0,25 (количества заливаемого азота 5670 кг, выдается криогенная жидкость под давлением до 0,25 МПа). Для транспортировки и газификации на месте потребления используют установку АГУ-8К (вмещает 4200 кг азота, производительность по газообразному азоту до 420 $\text{нм}^3/\text{ч}$ с давлением до 22 МПа). В качестве стационарных установок для хранения и газификации применяют СГУ-8000 и СГУ-7К.

Азот в жидком виде (температура кипения - 195,8 $^{\circ}\text{C}$) в настоящее время практически не используется для борьбы с пожарами. Практика показала, что быстрое испарение жидкого азота в горных выработках, особенно при подаче в очаг пожара, ведет к резкому скачку давления газа. В результате возможно повреждение емкостей с жидким азотом, трубопроводов, изоляционных сооружений в шахте, возникает угроза жизни и здоровью людей. Поэтому перед подачей в шахту жидкий азот газифицируют.

Испарение азота осуществляется в холодных газификаторах (используется тепло окружающего воздуха) или в теплообменниках с электронагревателями. Так, холодные газификаторы ГХК 8/1,6-1000 обеспечивают получение азота под давлением до 1,6 МПа с производительностью до 2200 $\text{нм}^3/\text{ч}$. В аварийный участок азот подается в виде газа или используется для получения инертной пены.

В последние годы перспективными становятся мембранные технологии получения газообразного азота. Применение установок пятого поколения, использующих пористое полимерное волокно с нанесенным газоразделительным слоем, позволяет получить газообразный азот чистотой 95-99,95 % под давлением от 0,5 до 4 МПа с производительностью до 5000 $\text{нм}^3/\text{ч}$. Для борьбы с пожарами на шахтах можно использовать передвижные азотные мембранные станции серии АМВЦ. Производительность по газу у этих установок от 150 $\text{нм}^3/\text{ч}$ (АМВП-2,5/0,7) до 1590 $\text{нм}^3/\text{ч}$ (АМВП-26,5/7) под давлением 0,8 МПа с чистотой азота 99,5 %.

Расчеты показывают, что при потребности газообразного азота до 10000 $\text{нм}^3/\text{ч}$ с чистотой 90 – 99%, экономически более целесообразны мембранные установки. При постоянной потребности азота более 10000 $\text{нм}^3/\text{ч}$, следует использовать криогенные установки получения азота.

Выводы

1. В случаях, когда в выработанном пространстве создается взрывоопасная обстановка или возникает опасность развития эндогенного пожара, целесообразно снизить концентрацию кислорода в атмосфере выработанного пространства.

2. Наиболее эффективным средством инертизации атмосферы выработанного пространства является азот.

3. Количество азота, необходимого для предотвращения взрыва метана или профилактики самовозгорания угля, можно рассчитать исходя из количества воздуха, поступающего в выработанное пространство, и чистоты получаемого азота.

4. Для получения больших объемов азота можно применять разделение воздуха с помощью криогенной или мембранных технологий. При потребности газообразного азота до 10000 $\text{нм}^3/\text{ч}$ с чистотой 90 – 99%, экономически более целесообразны мембранные установки. В случае более высокой потребности в азоте следует использовать криогенные установки получения азота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Портола В.А. Оценка пожароопасных скоростей фильтрации воздуха через скопления угля./Вестн. КузГТУ. – 2005. - № 6. – С. 22-25.
2. Линденau Н.И., Маевская В.М., Крылов В.Ф. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров. – М.: Недра, 1977. – 319 с.
3. Heat removal methods for control of underground abandoned coal mine fires. Dalverny Louis E./Inf. Circ. Bur. Mines. US Dep. Inter.- 1988.- № 9184.- 343-347.
4. Глузберг Е.И. Теоретические основы прогноза и профилактики шахтных эндогенных пожаров.- М.: Недра, 1986.- 161 с.
5. Возможность управления эндогенной пожароопасностью при прямоточных схемах проветривания / Каледин Н.В., Засевский В.П., Хорольский В.Т. //Горноспасательное дело: Сб. науч. тр./ Донецк, 1993.- С. 94-98.

Автор статьи:

Портола

Вячеслав Алексеевич

- докт.техн.наук, проф. каф. аэрологии,
охраны труда и природы