

ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА ТРУДА

УДК 622.271

В.А. Портола, Н.Л. Галсанов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЗОТА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ

Наиболее распространенной аварией на угольных шахтах Кузбасса являются пожары эндогенного и экзогенного происхождения. Особен- но опасны для шахт эндогенные пожары, большая часть которых возникает в недоступной части выработанного пространства из-за самовозгорания угля. Опасность таких пожаров заключается в об- разовании большого количества токсичных газов, способных распространяться в ограниченном объ- еме горных выработок на большие расстояния, высокой вероятности воспламенения взрывоопас- ных скоплений горючих газов и угольной пыли, а также в потере дорогостоящей угольной техники и подготовленных к выемке запасов угля.

Наблюдаемое в последние годы увеличение размеров выемочных столбов приводит к росту объемов выработанного пространства, что затруд- няет обнаружение, определение местонахождения очагов и предупреждение самовозгорания. Поэтому наиболее перспективными для подавления процессов самовозгорания угля в выработанном пространстве шахт являются способы, позволяю- щие производить объемную обработку угольных скоплений. К таким способам относится подача в выработанное пространство инертных газов, например, азота.

Инертные газы способны заполнять большие объемы выработанного пространства. Привлекает также многофакторное воздействие газов. Так, происходит инертизация атмосферы, что позволяет полностью исключить генерацию тепла в угле и предотвратить возможные взрывы горючих газов. Кроме того, подаваемый газ является хладагентом, отнимающим и выносящим тепло из прогретого скопления угля.

В шахтных условиях для борьбы с пожарами были использованы практически все доступные инертные газы: углекислый газ, продукты сгорания, азот, сернистый газ. Практика подачи в шахты углекислого газа [1,2], показала, что ему присущ такой недостаток, как интенсивное поглощение водой и углем, приводящее к быстрому снижению его концентрации в атмосфере. Кроме того, затруднена транспортировка баллонов, в которых хранится углекислый газ. Результатом этих недостатков является эпизодическое применение углекислого

газа.

Более широкое использование для борьбы с подземными пожарами находят продукты сгорания. Основным способом получения таких газов является работа воздушно-реактивных авиационных двигателей [3]. Разработкой и созданием генераторов инертных газов на таком принципе занимался ВНИИ горноспасательного дела [4]. Генератор ГИГ-1 укомплектован шахтным вентилятором, подающим воздух в камеру сгорания, состоящую из трех секций. Образующиеся продукты сгорания поступали в камеру охлаждения, где их температура снижалась за счет распыления воды. Производи- тельность генератора доходила до 350 м³/мин, содержание кислорода составляло около 3 %. Температура парогазовой смеси достигала на выходе 250° С. Длина установки равнялась 13,4 м.

Более совершенной является установка для получения инертных газов ГИГ-4, использующая газотурбинный двигатель АИ-8П. Производительность установки составляет 340 м³/мин, температура парогазовой смеси 80-90° С. Концентрация кислорода в смеси снижена до 1,0 %. Содержание углекислого газа 7,0 %, оксида углерода не более 0,2 %. Длина установки 6,5 м, масса 910 кг.

Однако широкому применению разработан- ных установок мешает ряд недостатков, присущих этому способу получения инертного газа. Так, образующаяся смесь имеет высокую температуру (80-90° С), что снижает эффективность охлаждения высокотемпературных областей и приводит к разогреву значительных масс угля и пород, находящихся при естественных температурах. Большое количество оксида и диоксида углерода в смеси создает опасность отравления людей во время и после работы установки. Ограничения в применении этих установок для борьбы с подземными пожарами возникают из-за сложности работы и обслуживания установки, необходимости доставки в шахту большого количества керосина (расход топлива 850 кг/ч), небольшого напора, невзрывобезопасности и т.д.

Наибольшее распространение при борьбе с пожарами получил азот. Преимуществом азота по сравнению с другими инертными газами и

смесями является возможность получения низких температур подаваемого газа. Технология получения азота позволяет практически исключить присутствие кислорода. Благодаря удельному весу, близкому к удельному весу воздуха, азот равномерно распределяется в горных выработках и выработанном пространстве. Кроме того, азот слабо поглощается. Так, по сравнению с двуокисью углерода, азот поглощается слабее углем в 3-8 раз, породой в 4-6 раз и шахтной водой в 30 раз [5].

Успешное применение газообразного азота на угольных шахтах для борьбы с подземными пожарами началось с 1967 г. Эффективным оказалось использование установок АГУ-2м, предназначенных для транспортирования и газификации азота, при тушении подземного пожара на шахте № 29 комбината "Воркутауголь" в 1968 г [5]. Широкое внедрение азота для борьбы с пожарами на угольных шахтах ФРГ началось в 1974 г [6]. Основной целью подачи газообразного азота являлось предотвращение взрывов, ликвидация открытого огня и снижение интенсивности пожара за счет инертизации рудничной атмосферы. Известны также случаи подачи в шахту и жидкого азота [7].

Однако применяемый способ подавления самовозгорания угля в шахтах путем подачи в выработанное пространство азота имеет ряд недостатков. Так, газообразный азот, получаемый из сжиженного газа, абсолютно сухой. Поэтому его подача в выработанное пространство вызывает потерю влаги из угля, что может активизировать окислительные процессы после восстановления утечек воздуха. Общий недостаток инертных газов – низкая теплоемкость и плотность, что приводит к длительным срокам снижения температуры разогретого угля, составляющим, по данным [8], 6-8 месяцев.

Повысить эффективность профилактики и тушения эндогенных пожаров в выработанном пространстве позволит добавка к подаваемому азоту мелкодисперсных частиц, способных значительно увеличить теплосъем из разогретого угля. В качестве частиц целесообразно использовать замороженную жидкость [9, 10]. Для повышения эффективности профилактики самовозгорания можно использовать водные растворы антипригенона. Дальность транспортирования замороженных частиц в выработанном пространстве существенно больше, чем у частиц в жидким состоянии, а теплосъем с угля возрастает за счет поглощения тепла при фазовом переходе из льда в жидкость.

Для получения состава, состоящего из газообразного азота и замерзших частиц жидкости целесообразно использовать совместное распыление жидкого азота и жидкости. В процессе передачи тепла от частиц жидкости к частицам жидкого азота происходит переход азота в газообразное состояние, а жидкость переходит в твердое со-

стояние.

Совместное распыление жидкого азота и воды приводит к образованию огромных площадей прямого контакта между теплоносителем и жидким азотом. В результате резко увеличивается производительность устройства по газообразному азоту, уменьшается его масса и размеры.

Прямой контакт жидкого азота и пара приведет к образованию парогазовой смеси, содержащей газообразный азот, пар и частицы сконденсировавшейся из пара жидкости. В зависимости от соотношения исходных компонентов, в значительном диапазоне может меняться температура образуемой смеси. Так, жидккая часть может при охлаждении переходить в твердое состояние (частицы льда). Образуемая смесь способна отнимать от скоплений разогретого угля значительное количество тепла, идущего на таяние льда, нагрев и последующее испарение жидкой фазы.

Благодаря присутствию частиц жидкости и пара будет происходить дополнительное увлажнение обрабатываемого угля, что замедлит процесс генерации тепла и увеличит количество теряющего тепла. Результатом будет замедление или предотвращение процесса самовозгорания угля. Наличие частиц жидкости интенсифицирует также теплосъем с разогретого угля.

Исходя из изложенного, возникает необходимость исследовать свойства парогазовых смесей, получаемых при перемешивании жидкого азота и воды, а также эффективность их воздействия на уголь в естественном состоянии и на различных стадиях самовозгорания. Полученные данные позволят разработать высокопроизводительное оборудование для газификации жидкого азота и технологические схемы применения парогазовых смесей для борьбы с эндогенными пожарами.

В процессе теплообмена между распыляемыми компонентами частицы воды или водного раствора будут отдавать тепло жидкому газу, что приведет к фазовому переходу и получению газообразного азота. Отдающие тепло частицы воды начинают охлаждаться, превращаясь в кристаллики льда. В случае, если температура образующейся смеси будет равна температуре газа на линии насыщения (-196° С или 77 К), количество тепла, полученное жидким азотом, можно определить из соотношения

$$Q_a = G_a r_a \quad , \quad (1)$$

где Q_a – количество тепла, получаемое азотом, кДж/с; G_a – количество газифицированного азота, кг/с; r_a – теплота испарения жидкого азота, кДж/кг.

Тепло, теряющее водой на газификацию азота равно

$$Q_w = Q_{wo} + Q_{wL} + Q_L, \quad (2)$$

где Q_w – тепло, отдаваемое водой азоту, кДж/с;

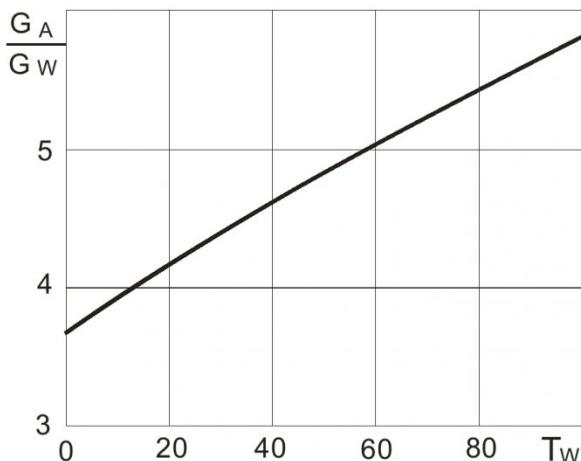


Рис. 1. Влияние начальной температуры воды на соотношение расхода жидкого азота и воды

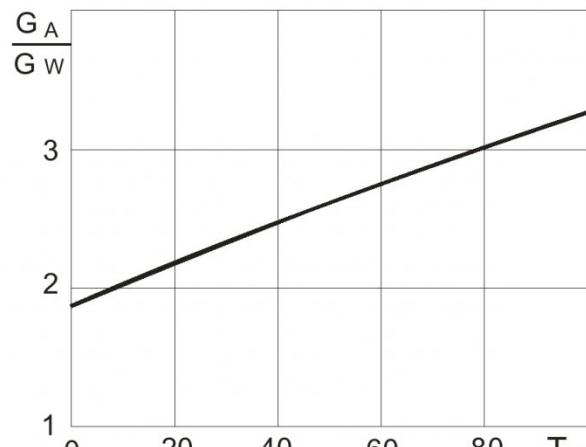


Рис. 2. Влияние начальной температуры воды на соотношение расходов жидкого азота и воды для получения смеси с температурой -100° С

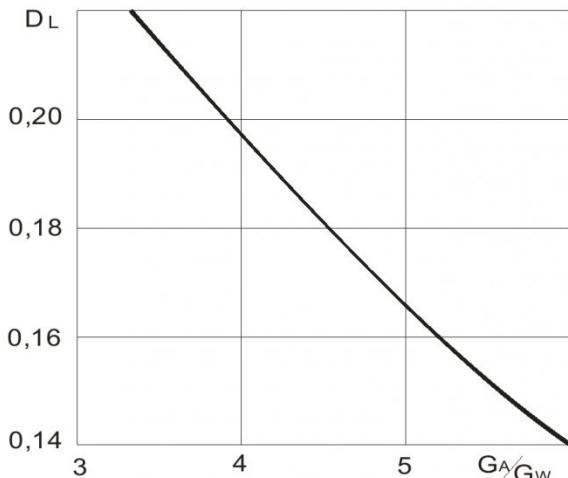


Рис. 3. Изменение массовой доли частиц льда в смеси с температурой -196° С от соотношения расхода жидкого азота и воды

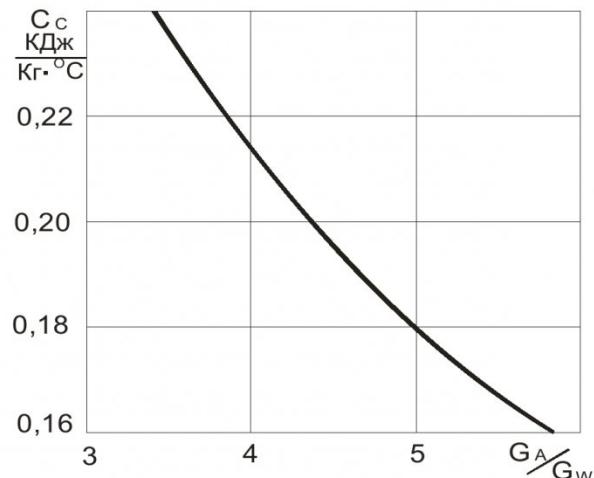


Рис. 4. Изменение теплоемкости смеси температурой -196° С в зависимости от соотношения расхода азота и воды

Q_{wo} – тепло, отдаваемое водой при охлаждении от начальной температуры, до температуры кристаллизации, кДж/с; Q_{wL} – тепло, отдаваемое водой при замерзании, кДж/с; Q_L – тепло, отдаваемое льдом при охлаждении, кДж/с.

Тепло, теряемое водой при охлаждении от начальной температуры до начала кристаллизации, равно

$$Q_{wo} = G_w c_w (t_0 - t_L), \quad (3)$$

где G_w – расход воды, кг/с; c_w – теплоемкость воды, кДж/(кг·К); t_0 – начальная температура воды, °С; t_L – температура замерзания воды, °С.

Тепло, теряемое при замерзании воды, находим из уравнения

$$Q_{wL} = G_w r_L, \quad (4)$$

где r_L – теплота замерзания воды, кДж/кг.

Тепло, отдаваемое льдом при охлаждении, равно

где c_L – теплоемкость льда, кДж/(кг·К); t_c – температура образуемой смеси азота и воды, °С.

Приравнивая (1) и (2) и подставляя в них соотношения (3)-(5), получаем следующее соотношение расхода жидкого азота к воде, необходимое для получения смеси с заданной температурой

$$\frac{G_a}{G_w} = \frac{c_w + r_L + c_L(t_L - t_c)}{r_a}, \quad (6)$$

Учитывая, что теплота испарения азота равна 197,5 кДж/кг, теплоемкость воды 4,2 кДж/(кг·К), теплоемкость льда равна 2,09 кДж/(кг·К), теплота замерзания воды равна 324 кДж/кг, на рис. 1 приведена зависимость изменения соотношения расхода жидкого азота и воды от величины начальной температуры воды для получения смеси с температурой -196° С.

В случае, если температура получаемой смеси

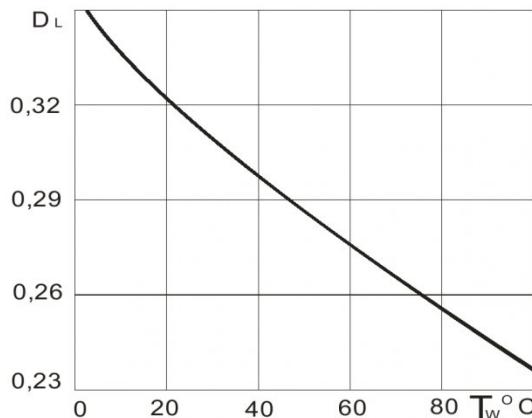


Рис. 5. Изменение массовой доли частиц льда в смеси с температурой -100°C в зависимости от начальной температуры воды

будет превышать температуру испарения жидкого азота, необходимо учесть количество тепла, требуемое для нагрева газообразного азота до температуры смеси. Поэтому количество тепла, расходуемого на испарение и подогрев азота, можно определить из выражения

$$Q_a = G_a r_a + G_a c_a (t_c - t_a), \quad (7)$$

где c_a – теплоемкость газообразного азота, кДж/(кг·К); t_a – температура кипения жидкого азота, $^{\circ}\text{C}$.

Подставляя формулу (7) вместо (1), получаем следующее соотношение между расходом воды, жидкого азота и параметрами получаемой смеси

$$\frac{G_a}{G_w} = \frac{c_w + r_L + c_L(t_L - t_c)}{r_a + c_a(t_c - t_L)}. \quad (8)$$

Влияние начальной температуры воды на соотношение расходов жидкого азота и воды для получения инертной смеси с температурой -100°C приведено на рис. 2.

Анализируя данные, приведенные на рис. 1 и 2, можно сделать вывод, что с увеличением температуры воды, используемой для газификации жидкого азота, возрастает расход жидкого азота и, соответственно, увеличивается выход газообразного азота. Рост температуры получаемой смеси сопровождается снижением расхода газифицируемого жидкого азота.

При оценке эффективности хладагентного действия получаемой инертной смеси в случае движения через разогретый уголь, одной из важнейших характеристик смеси является ее удельная теплоемкость. Теплоемкость смеси подчиняется правилу аддитивности, поэтому, учитывая возможное различное агрегатное состояние жидкости в смеси, ее удельную теплоемкость можно подсчитать по выражению

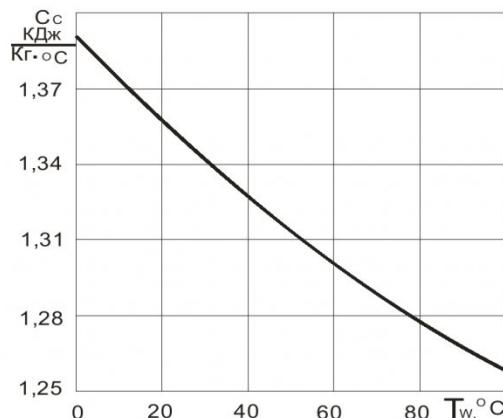


Рис. 6. Изменение теплоемкости смеси с температурой -100°C в зависимости от исходной температуры воды

$$c_c = c_a D_a + c_p D_p + c_w D_w + c_L D_L, \quad (9)$$

где D_a – доля газообразного азота в инертной смеси, доли ед.; D_p – доля пара в смеси, доли ед.; D_w – доля воды в жидким состоянии, доли ед.; D_L – доля льда в смеси, доли ед.; c_p – теплоемкость водяного пара, кДж/(кг·К).

В рассматриваемом случае получаемая смесь имеет отрицательную температуру, поэтому она состоит в основном из газообразного азота и жидкости в виде частиц замороженной воды. Массовая доля воды в виде жидкости и пара имеет небольшое значение и в расчетах не учитывается. С учетом этих условий массовую долю замороженной жидкости в смеси можно определить по зависимости

$$D_L = \frac{G_w}{G_w + G_a}. \quad (10)$$

Соответственно доля азота в смеси равна

$$D_a = \frac{G_a}{G_w + G_a}. \quad (11)$$

Используя полученные зависимости, на рис. 3 представлены изменения содержания массовой доли частиц льда в смеси с температурой -196°C . На рис. 4 показано влияние соотношения расхода жидкого азота и воды на удельную теплоемкость смеси с температурой -196°C .

Из приведенных данных видно, что теплоемкость образуемой смеси существенно больше теплоемкости сухого азота. С ростом доли воды, используемой при газификации жидкого азота, удельная теплоемкость смеси повышается, что

улучшает ее хладагентное действие при подаче в очаг самовозгорания.

Для повышения температуры получаемой инертной газовой смеси требуется изменить соотношение распыляемых компонентов. Параметры инертной смеси, имеющей температуру -100° С, приведены на рис. 5 и 6.

Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод, что с ростом температуры получаемой инертной смеси увеличивается расход воды, необходимой для газификации жидкого азота, и возрастает доля льда и удельная теплоемкость смеси. При повышении температуры воды, используемой для газификации азота, снижается теплоемкость

смеси и уменьшается доля частиц льда в смеси.

Таким образом, проведенные исследования показали, что газификация жидкого азота путем его совместного распыления с водой позволяет получить смесь инертного газа с частицами льда, параметры которой регулируются изменением соотношения расхода исходных компонентов и начальной температурой воды. За счет присутствия частиц замерзшей жидкости можно значительно снизить химическую активность обрабатываемого угля. Применение таких смесей позволит также существенно увеличить теплосъем со скоплений разогретого угля, что повысит эффективность борьбы с самовозгоранием угля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белик И.П., Кондратенко И.И., Горбатенко А.И. и др. Тушение пожара в тупиковых выработках / Безопасность труда в промышленности. – 1979. - № 3. – С.40-41.
2. Белик И.П., Горбатенко А.Е., Клименко В.В. Установка «Иней» для интенсивного выпуска углекислого газа при тушении пожара / Сб. науч. тр. Макеев. ин-т по безоп. в горн. пром. – 1979 № 16. – С. 85-88.
3. Goward H.F., Jones G.W. Limits of flammability of gases and vapors / Bulletin Bureau of Mines. № 2952. - 503.
4. Колышенко М.В. Применение генераторов инертного газа для борьбы с пожарами в шахтах. – М.: Недра. – 1974. – 52 с.
5. Осипов С.Н. Применение инертных газов при ликвидации подземных пожаров. – Киев: Техника. – 1973. – 51 с.
6. Kock F.J., Linberg B. Strategie der Brandbekämpfung mit Stickstoff / Glückauf. – 1985. - № 18. - S. 20-25.
7. Клеццев П.Е., Дмитрюк Н.Ф. Предупреждение и ликвидация пожаров на зарубежных шахтах / Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – 1986. – Выпуск 8. – С. 36.
8. Иглишев В.Г., Портола В.А. Оценка параметров пены, необходимых для тушения очагов самовозгорания / ФТПРПИ. – 1993. - № 4. – С. 74-78.
9. Патент РФ 2082885. Способ борьбы с подземными пожарами / В.А. Портола. 1997. – Б.И., № 18.
10. Патент РФ 2092203. Способ борьбы с пожарами / В.А. Портола. 1997. – Б.И., № 28.

□ Авторы статьи:

Портола
Вячеслав Алексеевич
докт. техн. наук, проф.
каф. аэробиологии, охраны труда и промышленной гигиены КузГТУ,
проф. каф. БЖДЭ и ФВ ЮТИ ТПУ
E-mail: portola2@yandex.ru

Галсанов
Нима Лайдапович,
зам. технического директора
ОАО «СУЭК-Кузбасс»
Тел.: (38456) 31693