

УДК 622.822.2

В.А. Портола, Н.Л. Галсанов

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУШЕНИЯ СКОПЛЕНИЙ УГЛЯ РАЗЛИЧНЫМИ ХЛАДАГЕНТАМИ

Основной причиной возникновения очагов пожаров в скоплениях угля является процесс самовозгорания. Наиболее опасными являются очаги самовозгорания, возникающие в угольных шахтах. Развитие эндогенных пожаров в шахтах обычно происходит в выработанном пространстве, где образуются скопления разрыхленного угля и создаются условия для фильтрации воздуха [1,2]. Причем тушение таких скоплений горящего угля существенно отличается от тушения пожаров, возникающих на земной поверхности. Так, при подаче хладагента (вода, пена) в открытые пожары происходит его нагревание, испарение жидкой фазы. Образующиеся горячие пары, газы поднимаются в атмосферу, унося из зоны горения значительное количество тепла.

При тушении же пожара в выработанном пространстве подаваемый хладагент (вода, пена и пр.) нагревается, но остается в обрушенной массе горючего вещества. Тушение таких пожаров существенно осложняется, так как тепло, поглощаемое хладагентом в очаге пожара, переносится в соседние, ранее холодные области выработанного пространства. В результате объем разогретой области увеличивается. Учитывая, что химическая активность угля по отношению к кислороду увеличивается с ростом температуры угля, возникает опасность быстрого рецидива пожара после тушения и увеличение объема горящего угля. Особенно опасно перемещение от очага высокотемпературного водяного пара, так как пар активизирует активность угля и переносит большое количество тепла, отдаваемое скоплению угля при конденсации пара.

Одним из наиболее эффективных средств тушения пожаров является вода, обладающая большой теплоемкостью и плотностью, а также малой вязкостью, позволяющей ей проникать через поры и трещины горящих материалов. Однако из-за большой плотности вода будет перемещаться в выработанном пространстве только по почве пласта угля. Очаги же самовозгорания, из-за условий теплообмена с окружающей средой и особенностей движения воздуха через выработанное пространство, будут располагаться в верхней части обрушенной массы угля и горных пород и окажутся вне зоны воздействия воды. Поэтому для тушения очагов самовозгорания в скоплениях угля необходимо использовать составы, позволяющие производить его объемную обработку.

Основным свойством, позволяющим хладагенту распространяться по всему объему скопления угля, является незначительная его плотность.

Наиболее пригодны для этой цели пена [3,4], инертные газы [5,6] и составы на основе инертных газов, содержащие частицы, поглощающие большое количество тепла при фазовых переходах и нагревании [7,8]. Необходима сравнительная оценка хладагентного действия этих составов для выбора наиболее эффективного для подавления очагов самовозгорания на различных стадиях его развития.

Для сравнения хладагентного действия исследуемых составов возьмем скопление разогретого угля объемом 1 м³. При тушении подземных пожаров необходимо учитывать, что пожар считается потушенным в случае снижения температуры исходящих из пожарного участка воздуха, воды, а также температуры охлаждаемых горных пород и угля до 25 °C [9].

Теплосодержание разогретого угля можно определить по формуле

$$Q = V\rho c(t_p - t_o), \quad (1)$$

где V – объем скопления угля, м³; ρ – плотность скопления угля, кг/м³; c – удельная теплоемкость угольного скопления, кДж/(кг·К); t_p – температура разогретого угольного скопления, К; t_o – температура угольного скопления после охлаждения, К.

При расчете учтем, что плотность скопления угля равна 1000 кг/м³, его удельная теплоемкость 1,05 кДж/(кг·К). Средняя температура горных пород на шахтах Кузбасса составляет около 15 °C (288 К). Изменение теплосодержания заданного объема разогретого угольного скопления в зависимости от исходной температуры, рассчитанное по формуле (1) приведено на рис. 1.

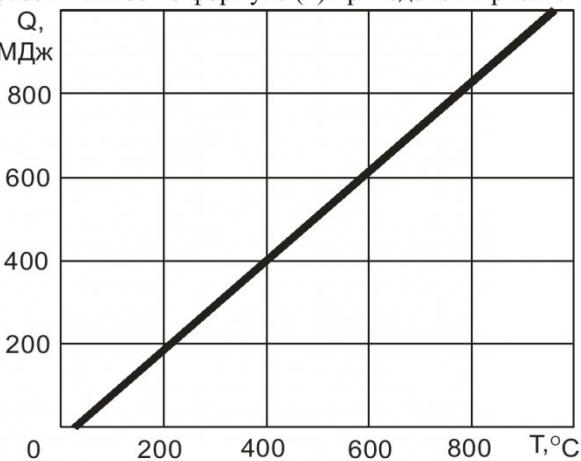


Рис. 1. Теплосодержание 1 м³ угольного скопления в зависимости от температуры

Приведенные на рис. 1 данные показывают, что теплосодержание угольного скопления линейно возрастает с увеличением его температуры.

Нагнетание газообразного азота в выработанное пространство с разогретым углем сопровождается нагреванием газа теплом, отнимаемым от самовозгорающегося угля. Количество тепла, поглощенное азотом при прохождении через скопление зависит от начальной температуры газа и определяется по зависимости

$$Q_a = V_a \rho_a c_a (t_c - t_a), \quad (2)$$

где V_a – объем поданного газообразного азота, м^3 ; ρ_a – плотность газообразного азота, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_a – удельная теплоемкость поданного азота, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; t_c – температура, до которой охлаждается при подаче азота разогретое процессом самовозгорания угольное скопление, К; t_a – температура инертного газа, подаваемого в разогретое выработанное пространство, К.

Приравняв выражения (2.18) и (2.19) определим количество газообразного азота, необходимого для охлаждения разогретого угольного скопления до требуемой температуры

$$V_a = \frac{V_c \rho (t_p - t_0)}{c_a \rho_a (t_c - t_a)}, \quad (3)$$

Анализ уравнения (3) показывает, что количество азота, необходимого для охлаждения нагретого угля, увеличивается с ростом начальной температуры угля и температуры подаваемого азота. Количество газообразного азота с различной начальной температурой, которое необходимо подать в разогретое угольное скопление объемом 1 м^3 для охлаждения его до температуры, при которой пожар можно списать (до 25 °C), определенное по формуле (3), приведено на рис. 2.

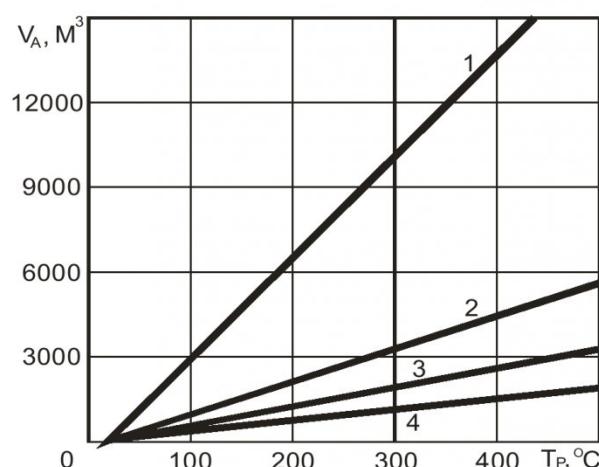


Рис. 2. Объем азота, необходимый для охлаждения разогретого угольного скопления в зависимости от температуры угля и температуры подаваемого газа: 1 – температура подаваемого азота 0 °C; 2 – температура азота -50 °C; 3 – температура азота -100 °C; 4 – температура азота -190 °C

При расчетах принято, что плотность азота равнялась 1,2 $\text{кг}/\text{м}^3$, а его удельная теплоемкость 1,0 $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Из приведенных на рис. 2 данных видно, что существенно уменьшить количество азота, необходимого для охлаждения очагов самовозгорания, позволяет снижение его начальной температуры. Так, при температуре азота 0 °C, требуется 16975 м^3 газа для охлаждения 1 м^3 угольного скопления до необходимой для списания пожара температуры. Снижение начальной температуры газа до -50° C, уменьшает расход необходимого объема азота до 5658 м^3 .

Между тем в настоящее время для борьбы с эндогенными пожарами зачастую используют сжиженный азот, который предварительно газифицируют и нагревают в испарительной камере перед подачей в выработанное пространство до температуры окружающей среды. Полученные результаты показывают, что жидкий азот необходимо только газифицировать и подавать в выработанное пространство с очагом самовозгорания при минимальной температуре.

Оценим эффективность применения пены для охлаждения угольного скопления. Пена состоит из жидкой фазы и газа, соотношение между которыми определяет кратность пены. Количество тепла, которое может поглотить пена, зависит от ее начальной температуры, соотношения между жидкой и газовой фазой и может быть определено по формуле

$$\begin{aligned} Q_n &= \rho_w c_w \frac{V_n}{K} (t_c - t_n) + \\ &+ \rho_a c_a (V_n - \frac{n}{K}) (t_c - t_n), \end{aligned} \quad (4)$$

где ρ_w – плотность жидкой фазы пены, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_w – удельная теплоемкость жидкой фазы пены, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; V_n – объем подаваемой пены, м^3 ; K – кратность подаваемой пены; t_c – температура,

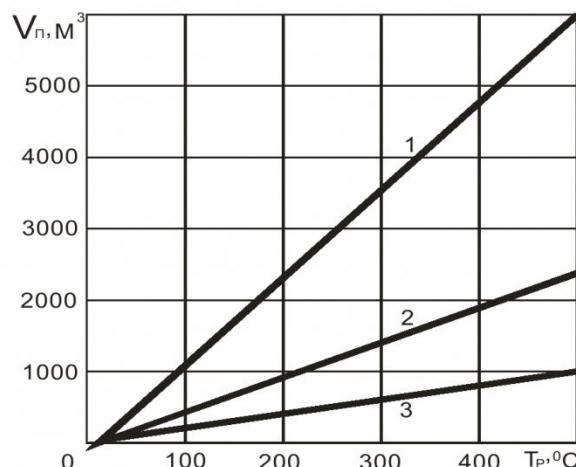


Рис. 3. Объем пены, необходимый для охлаждения угольного скопления в зависимости от начальной температуры угля и кратности подаваемой пены: 1 – кратность пены равна 500; 2 – кратность пены 200; 3 – кратность пены 100.

до которой охлаждается угольное скопление, К; t_n – температура подаваемой пены, К.

Для расчета необходимого для охлаждения угольного скопления количества пены приравняем формулы (1) и (4). Получим следующее выражение

$$V_n = \frac{\rho c V K (t_p - t_0)}{\rho_w c_w (t_c - t_n) + \rho_a c_a (R - 1)(t_c - t_n)}. \quad (5)$$

Количество пены, необходимой для охлаждения 1 м³ разогретого угольного скопления, рассчитанное по формуле (5), представлено на рис. 3.

Анализ представленных на рис. 3 зависимостей показывает, что существенно сократить расход объема пены, необходимого для снижения температуры разогретого угольного скопления, позволяет снижение кратности пены. В случае снижения кратности пены происходит увеличение доли жидкой фазы в единице объема пены, способной поглощать значительное количество тепла при нагревании вследствие большой плотности и удельной теплоемкости воды.

Однако кратность пены можно регулировать при ее получении, а при движении по выработанному пространству кратность пены быстро возрастает из-за оседания жидкой фазы на поверхности угля. Поэтому пена, попадающая в очаг разогретого угля после движения по выработанному пространству от удаленной точки подачи, может существенно отличаться по хладагентному действию от пены, свойства которой можно определить в месте генерации. Кроме того, пена низкой кратности имеет большую плотность и может стекать по почве пласта, что снижает эффект объемной обработки скоплений угля и породы и не позволит попасть пены в очаги, расположенные выше точки подачи хладагента.

Сравнивая расход инертного газа и пены, необходимый для охлаждения угольного скопления с заданными параметрами, видно, что использование пены вместо азота может значительно сократить количество подаваемого хладагента. Однако, в случае использования газообразного азота с низкими температурами, требуемые объемы пены, особенно большой кратности, и инертного газа отличаются незначительно. При температурах, близких к температуре кипения жидкого азота, охлаждающие свойства газообразного азота оказываются лучше, чем у пены кратностью 200.

Подача инертного состава, созданного при перемешивании жидкого азота и распыленной воды, в разогретое угольное скопление приводит к поглощению тепла на нагрев газа и льда, таяние льда и нагрев образующейся жидкости. Учитывая,

что объем частиц льда в составе пренебрежимо мал по сравнению с объемом инертного газа, количество отнимаемого инертной смесью тепла можно определить из выражения

$$Q_s = V_s c_a \rho_a (t_0 - t_s) + M_w c_w (t_p - t_{pl}) + M_w c_l (t_{pl} - t_s) + M_w r_{pl}, \quad (6)$$

где V_s – объем инертного состава, м³; M_w – масса частиц льда в инертном составе, кг; t_s – температура подаваемого инертного состава, К; t_{pl} – температура плавления льда, К; c_l – удельная теплоемкость льда, кДж/кг; r_{pl} – удельная теплота плавления льда, кДж/кг.

Приравнивая уравнение (6) к уравнению (1), можем получить следующую формулу для определения объема инертного состава, необходимого для охлаждения разогретого угля до температуры, достаточной для списания пожара в категорию потушенных

$$V_s = \frac{\rho c V K (t_p - t_0)}{[\rho_a c_a (t_0 - t_s) + M_w c_w (t_p - t_{pl}) + M_w c_l (t_{pl} - t_s) + M_w r_{pl}]} \quad (7)$$

Массу частиц, находящихся в жидком или твердом состоянии, в инертном составе, полученном путем перемешивания частиц воды и жидкого азота, можно определить из уравнения

$$M_w = \frac{M_a r_a}{c_w (t_0 - t_l) + c_l (t_l - t_c) + r_l}, \quad (8)$$

где M_a – масса газообразного азота в инертном составе, кг.

Массу инертного газа в составе находим из выражения

$$M_s = M_a = V_a \rho_a. \quad (9)$$

Объем инертного состава, необходимый для охлаждения 1 м³ разогретого скопления угля, в зависимости от температуры угля приведен на рис. 4. При расчете использовался инертный состав с начальной температурой -196 °C, полученный при совместном распылении жидкого азота и воды с исходной температурой 15 °C.

Проведенные исследования показали, что полученная зависимость объема инертного состава, необходимого для охлаждения угольного скопления, незначительно отличается при изменении начальной температуры воды, распыляемой совместно с жидким азотом. Применение для газификации жидкого азота водяного пара вместо воды снижает хладагентные свойства получаемого инертного состава из-за уменьшения доли частиц льда в составе.

Количество инертного состава, необходимого для охлаждения 1 кг разогретого угля, в

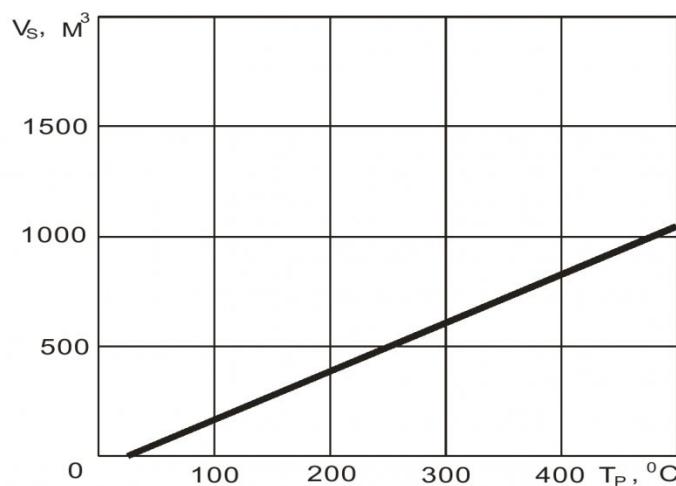


Рис. 4. Влияние температуры разогретого угля на объем инертного состава, необходимого для его охлаждения

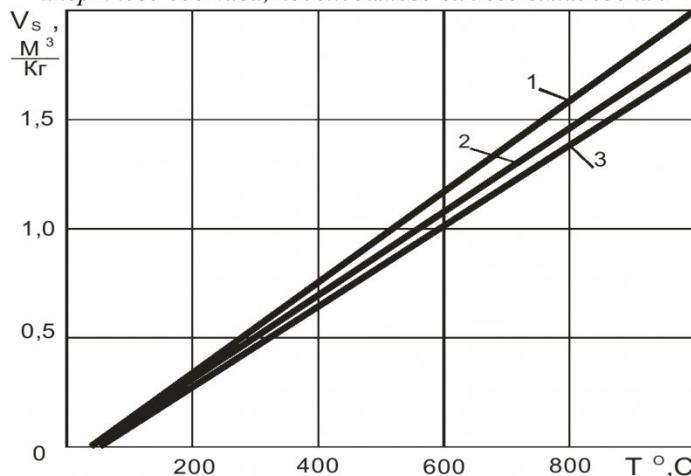


Рис. 5. Объем инертного состава, необходимый для охлаждения угля, в зависимости от температуры угля и подаваемого состава: 1 - температура состава равна -196°C ; 2 - температура состава -100°C ; 3 - температура состава -50°C

зависимости от начальной температуры инертного состава приведено на рис. 5. Начальная температура распыляемой воды равна до 15°C . Температура получаемого инертного состава регулировалась изменением соотношения расходов воды и жидкого азота. Конечная температура охлаждаемого угля составляла 25°C .

Результаты, приведенные на рис. 5, свидетельствуют о повышении эффективности охлаждения разогретого скопления угля, в случае увеличения температуры подаваемого инертного состава. Причиной такого эффекта является увеличение доли частиц льда в инертном составе с ростом его температуры.

Сравнивая данные расчетов, приведенных на рис. 2, 3 и 4, можно сделать вывод, что хладагентные свойства инертных составов, полученных при совместном распылении воды и жидкого азота, значительно выше, чем у применяемого газообразного азота и сопоставимы

с нагнетаемой в выработанное пространство пеной низкой кратности. Однако зона распространения пены в выработанном пространстве ограничена несколькими метрами из-за большой вязкости пены и ее быстрого спада [10]. Поэтому применение инертных составов существенно повысит эффективность борьбы с эндогенными пожарами из-за увеличения вероятности попадания хладагента в очаг. Одновременно подача инертных составов сократит время тушения очагов самовозгорания и уменьшит расход инертного газа, что повысит безопасность горных работ и снизит экономический ущерб, обусловленный подземными эндогенными пожарами.

Анализируя результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы.

1. Тушение подземных пожаров инертным газом малоэффективно из-за небольшой плотности и теплоемкости газа. Снижение

температуры подаваемого инертного газа уменьшает расход этого хладагента для тушения пожара.

2. Применение пены существенно уменьшает расход хладагента для тушения подземного пожара. С увеличением кратности пены эффективность охлаждения очага пожара уменьшается.

3. Хладагентные свойства инертного состава, получаемого при совместном распылении воды и

жидкого азота, больше, чем у инертного газа и пены высокой кратности, что позволит сократить время тушения очагов самовозгорания угля в шахтах.

4. Повышение температуры инертного состава, получаемого при совместном распылении воды и жидкого азота, увеличивает эффективность охлаждения разогретого угля за счет роста количества частиц льда в составе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скочинский А.А., Огневский В.М. Рудничные пожары. – М.: Углехиздат, 1954. – 387 с.
2. Линденau Н.И., Маевская В.М., Крылов В.Ф. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров. – М.: Недра, 1977. – 319 с.
3. Игишев В.Г., Портола В.А. Кратность пен, используемых при локализации и тушении эндогенных пожаров. Безопасность труда в промышленности. – 1983. – № 7. – С. 32.
4. Игишев В. Г. Борьба с самовозгоранием угля в шахтах / В. Г. Игишев. – М. : Недра, 1987. – 176 с.
5. Портола В.А. Перспектива применения азота для борьбы с пожарами и взрывами в шахтах // Вестник КузГТУ, 2006. № 3. – С. 57 – 59.
6. Осипов С.Н. Применение инертных газов при ликвидации подземных пожаров. – Киев: Техника. – 1973. – 51 с.
7. Портола В.А., Галсанов Н.Л. Эффективность использования инертных составов для тушения пожаров в выработанном пространстве шахт// Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 6. – С. 34–37.
8. Галсанов Н.Л., Портола В.А. Распространение инертных составов в выработанном пространстве шахт. Вестник КузГТУ, 2013, № 6. С. 80-83.
9. Инструкция по предупреждению и тушению подземных эндогенных пожаров в шахтах Кузбасса. – Кемерово, 2007. – 79 с.
10. Портола В. А. Параметры пенного способа борьбы с самовозгоранием угля // Локализация и тушение подземных пожаров. – Кемерово, 1989. – С. 21–27. – (Сб. науч. ст. / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т по горноспасательному делу, Вост. отд-ние ; вып. 11).

Авторы статьи:

Портола Вячеслав Алексеевич докт. техн. наук, проф. каф. АОТП КузГТУ, проф. каф. БЖДЭ и ФВ ЮТИ ТПУ. E-mail: portola2@yandex.ru	Галсанов Нима Лайдапович соискатель каф. АОТП КузГТУ, «СУЭК-Кузбасс» Тел.: (38456) 31693
---	--