

ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА ТРУДА

УДК 622.271

В.А. Портола, Н.Л. Галсанов

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ОЧАГА САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ ИНЕРТНЫМИ СОСТАВАМИ

Развитие процесса самовозгорания угля в шахтах сопровождается выделением токсичных горючих газов в рудничную атмосферу, возникает опасность воспламенения смеси горючих газов и угольной пыли. Образующиеся очаги эндогенных пожаров наносят огромный экономический ущерб угольным предприятиям [1], обусловленный потерями угледобывающей техники, подготовленных запасов угля, работами по ликвидации аварийной ситуации. Поэтому для повышения безопасности горных работ и снижения ущерба от эндогенных пожаров необходимо использовать для ликвидации очагов самовозгорания хладагенты, позволяющие существенно сократить длительность охлаждения разогретого угля.

Проведенные исследования показали, что для предотвращения распространения тепла в разрыхленном угле, окружающем очаг самовозгорания, целесообразно использовать хладагенты, содержащие компоненты, поглощающие тепло при фазовых переходах. Так, существенно повысить теплосъем с разогретого угля позволяют составы, получаемые при совместном распылении жидкого азота, воды или водяного пара, содержащие частицы льда [2]. Расчет теплофизических параметром инертных составов в зависимости от соотношения используемых компонентов приведен в [3].

Подача инертного состава, состоящего из инертного газа и частиц льда, через очаг самовозгорания в угольном скоплении приводит к интенсивному теплосъему от угля. Тепло, отнимаемое от разогретого угля, используется для подогрева инертного газа и частиц льда, затем, при температуре 0°C тепло расходуется на фазовый переход льда в жидкое состояние. При более высоких температурах происходит подогрев газа и частиц образующейся жидкости. В случае попадания состава в область, прогретые более 100° С, идет интенсивное поглощение тепла на испарение жидкой фазы.

Для исследования процесса охлаждения разогретого угольного скопления инертными составами необходимо учесть отсутствие кислорода в подаваемом составе, что предотвращает выделение тепла за счет окисления угля. Особенностью такого охлаждения является также потребление тепла смесью при фазовых переходах. Поглоще-

ние тепла инертными составами при фазовых переходах совершается при постоянных температурах до полного превращения льда или жидкости соответственно в воду или пар. С учетом вышеизложенных особенностей процесса подачи инертного состава в очаг самовозгорания использовалась следующая математическая модель охлаждения предварительно разогретого угольного скопления

$$(1-m)\rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} (1-m) - \rho_c c_c V \frac{\partial T}{\partial x} - Q_L \rho_L \frac{\partial C_L}{\partial \tau} - Q_W \rho_W \frac{\partial C_W}{\partial \tau}$$

$$T(x,0) = T_H(x); \quad C_L(x=0, \tau=0) = C_{L0};$$

$$C_W(x=0, \tau=0) = C_{W0};$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_1 (T - T_0);$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_2 (T - T_0);$$

$$\frac{\partial C_L}{\partial \tau} \Big|_{T(273K)} = 0; \quad \frac{\partial C_W}{\partial \tau} \Big|_{T(373K)} = 0;$$

$$C_L(x=0, \tau=0) = C_W(x=0, \tau=0) = D_L, \quad (1)$$

где T - температура, К; m - пористость скопления угля; ρ_1 - плотность угля, кг/м³; c_1 - удельная теплоемкость скопления угля, Дж/(кг·К); τ - время, с; λ - коэффициент теплопроводности угля, Вт/(м·К); x - координата вдоль угольной насыпки, м; c_c - удельная теплоемкость инертного состава, кДж/(кг·К); ρ_c - плотность инертного состава, кг/м³; V - скорость фильтрации инертного состава, м/с; C_L - концентрация частиц льда в инертном составе, доли ед.; Q_L - удельная теплота таяния льда, Дж/кг; ρ_L - плотность льда, кг/м³; C_W - концентрация частиц жидкости к инертному составу после таяния льда, доли ед. Q_W - удельная теплота испарения воды, Дж/кг; ρ_W - плотность жидкости в инертном составе, кг/м³; α_1 - коэффициент теплоотдачи от угля, Вт/(м²·К); T_0 - темпера-

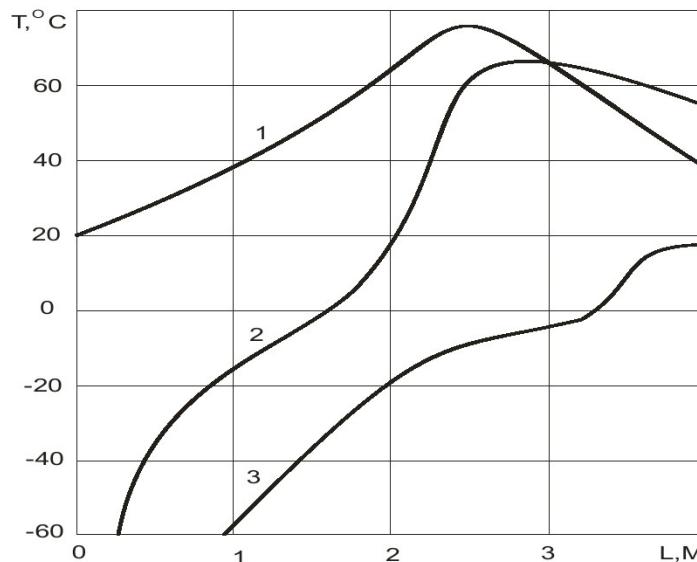


Рис. 1. Изменение температуры скопления при подаче инертного состава со скоростью 10^2 м/с: 1 – начальное состояние; 2 – через 21 час; 3 – через 55 часов

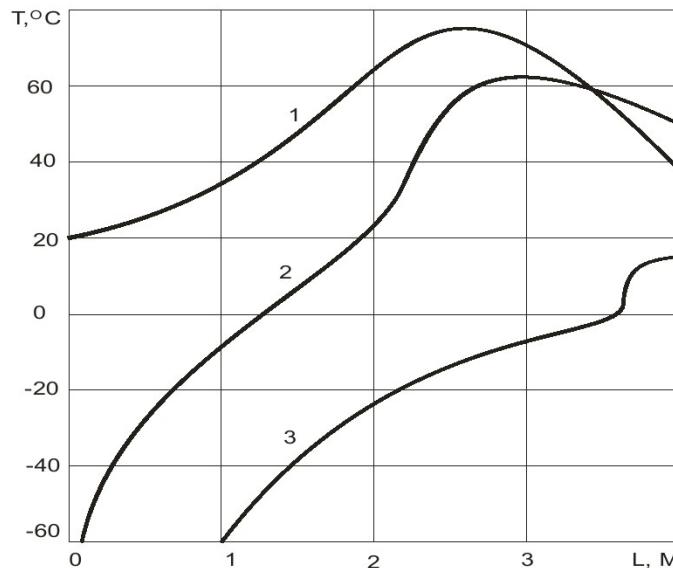


Рис. 2. Охлаждение скопления инертным составом, подаваемым со скоростью 0,1 м/с:
1 – начальное состояние; 2 – через 2 часа; 3 – через 6 часов

тура окружающей среды, K ; L - размер угольного скопления, м; D_L – доля частиц льда в инертном составе, доли ед.

Доля частиц льда или воды (после таяния льда) в инертном составе можно определить как

$$D_L = G_i / (G_i + G_a),$$

где G_i – расход воды или водяного пара, кг/с; G_a – расход азота, кг/с.

Решение системы уравнений (1) осуществлялось конечно-разностным методом с реализацией на ПЭВМ. Расчет процесса охлаждения угольного скопления производился из условия, что таяние льда происходило только при температуре 273 К, а испарение жидкости только при температуре 373 К. Скорость таяния льда и испарения частиц жид-

кости в процессе решения подбиралась из условия сохранения постоянной температуры фазового перехода.

В процессе моделирования использовалось одномерное угольное скопление размером 4 м. Для разогрева угольного скопления вначале моделировалась подача воздуха, способствующая окислению угля с выделением тепла. При расчете процесса самовозгорания угля применялась система уравнений, приведенная в [4]. Скорость фильтрации воздуха через скопление разрыхленного угля составляла $2,8 \cdot 10^{-4}$ м/с. После достижения в эпицентре очага температуры 75°C температурное поле фиксировалось. Затем начиналась подача через разогретое скопление угля инертного состава.

Расчет изменения температуры в угольном

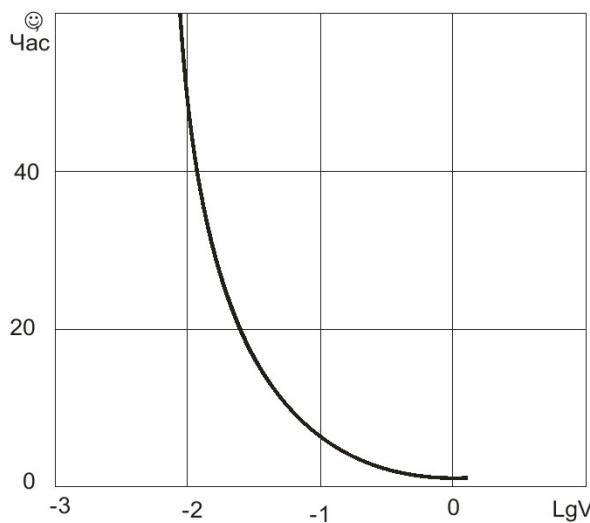


Рис. 3. Влияние скорости фильтрации инертного состава через скопление угля на длительность охлаждения очага

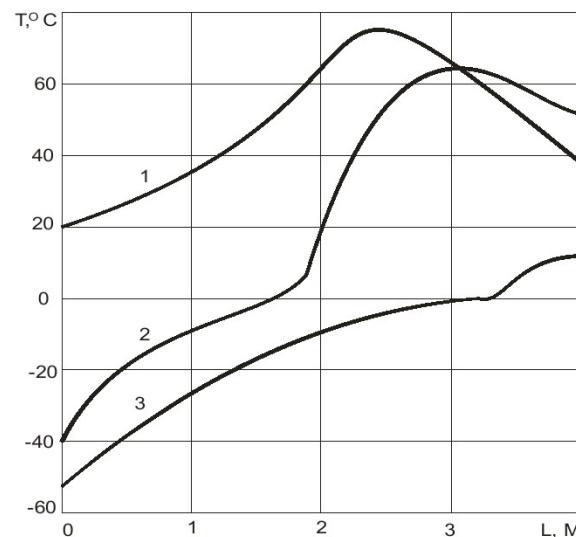


Рис. 4. Изменение температуры скопления угля при подаче инертного состава с температурой -50°C : 1 – начальное состояние; 2 – через 2 часа; 3 – через 4.5 часа

скоплении осуществлялся с использованием системы уравнений (1), учитывающих теплообмен между углем и газообразным азотом, содержащим частицы замерзшей жидкости. При температуре 0°C происходил фазовый переход частиц льда из твердого состояния в жидкое с поглощением количества тепла, обеспечивающим поддержание температуры до полного таяния частиц льда.

В процессе исследования оценивались хладагентные качества инертных составов, подаваемых с различной скоростью через угольное скопление. Также изучалось влияние на процесс охлаждения угля изменение начальной температуры инертных составов и соотношения расходов азота и воды,

совместно распыляемых для получения хладагента. Подача инертного состава прекращалась при снижении максимальной температуры угольного скопления менее 20°C .

Для оценки скорости подачи инертного состава на температуру предварительно разогретого угольного скопления осуществлялось моделирование процесса охлаждения инертным составом с исходной температурой -100°C , полученным при соотношении (массовом) распыляемого жидкого азота и воды, равном 2,1. Скорость подачи инертного состава в скоплении угля варьировалась в пределах от 10^{-2} м/с до $1,0 \text{ м/с}$. Так, на рис. 1 показано распределение температуры в скоплении угля

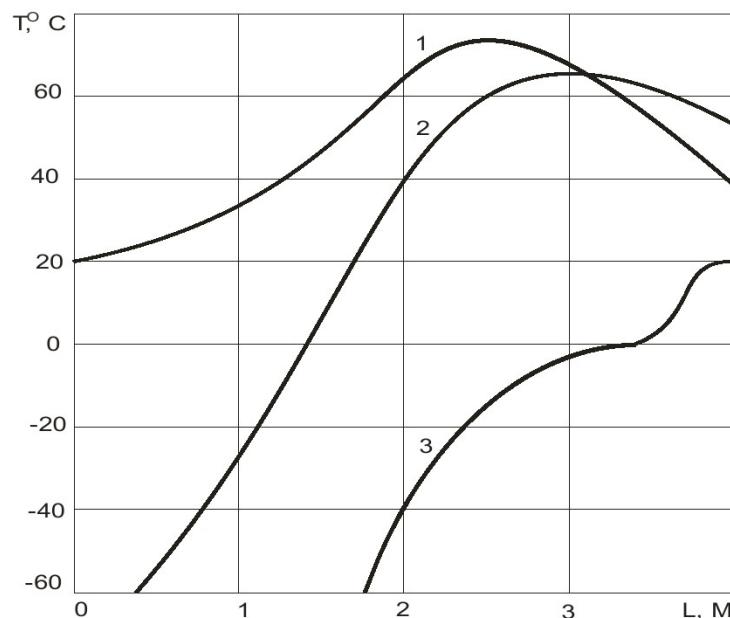


Рис. 5. Изменение температуры скопления при подаче инертного состава с температурой -196°C : 1 – начальное состояние; 2 – через 2,5 часа; 3 – через 8 часов

в различные моменты времени в результате подачи инертного состава, состоящего из газообразного азота и частиц льда. Скорость подачи инертного состава в течение всего процесса охлаждения составляла 0,01 м/с.

На рис. 2 представлено распределение температур в скоплении угля в различные моменты времени при подаче инертного состава, получаемого при перемешивании воды и жидкого азота с начальной температурой -100°C . Скорость движения инертного состава с частицами льда в порах и трещинах угольного скопления равнялась 0,1 м/с.

Повышение скорости подачи инертного состава с теми же параметрами до величины 1,0 м/с привело к уменьшению процесса охлаждения до 0,75 часа.

Сравнение полученных результатов расчета показывает, что увеличение скорости подачи инертного состава существенно сокращает длительность охлаждения угольного скопления. Однако общее количество инертного состава, необходимого для охлаждения угольного скопления, в этом случае практически не меняется. Конечное распределение температуры в охлажденном скоплении угля также сопоставимо.

Зависимость длительности охлаждения скопления от логарифма скорости фильтрации инертного состава через уголь приведена на рис. 3. Увеличение скорости фильтрации инертного состава через уголь резко уменьшает длительность остывания угольного скопления. Одновременно с ростом скорости газа возрастает дальность транспортирования частиц льда.

В следующей серии расчетов оценивалось влияние начальной температуры инертного состава, получаемого при смешивании воды и жидкого азота, на длительность охлаждения и распределение температуры в угольном скоплении. Темпера-

тура состава варьировалась в интервале от -196°C до -50°C путем изменения соотношения расходов воды и жидкого азота при их совместном распылении. Скорость подачи инертного состава через угольное скопление составила в этих исследованиях 0,1 м/с.

Повышение температуры инертного состава от -196 до -50°C приводит к увеличению доли замерзшей воды в инертном составе. Так, при получении состава с температурой -196°C масса азота в единице объема инертного состава больше в 4,15 раза массы частиц замерзшей воды. В составе с температурой -100°C масса азота в единице объема в 2,1 раза больше, чем масса замерзших частиц воды. При температуре -50°C соотношение масс азота и частиц льда в единице инертного состава составляет 1,4.

На рис. 4 показано распределение температуры в угольном скоплении при подаче инертного состава с температурой -50°C

На рис. 5 представлено распределение температуры в различные моменты времени при охлаждении скопления угля инертным составом на основе жидкого азота и воды с исходной температурой -196°C .

Сопоставление данных, приведенных на рис. 2, 4 и 5 показывает, что снижение температуры инертного состава за счет уменьшения доли льда в составе, увеличивает время охлаждения угольного скопления. Так, для снижения температуры угольного скопления менее 20°C необходимо около 4,5 часа при подаче инертного состава с температурой -50°C . Снижение температуры состава до -100°C требует увеличения длительности подачи хладагента до 6,0 часов. Подача инертного состава с температурой -196°C способствует росту времени подачи до 8,0 часов. Однако средняя температура угольного скопления в случае уменьшения температуры инертного состава снижается.

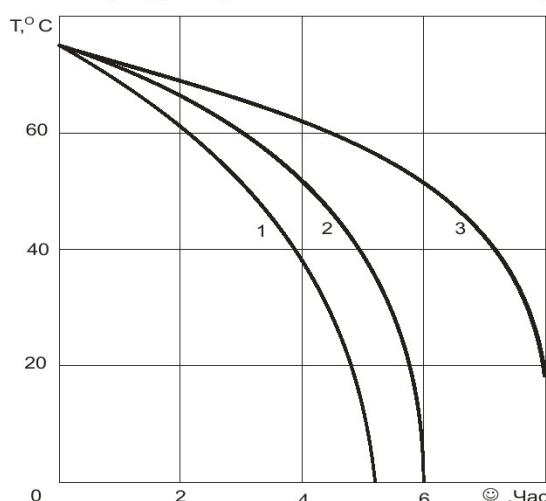


Рис. 6. Изменение максимальной температуры скопления при подаче инертного состава: 1 – с температурой -50°C ; 2 – с температурой -100°C ; 3 – с температурой -196°C .

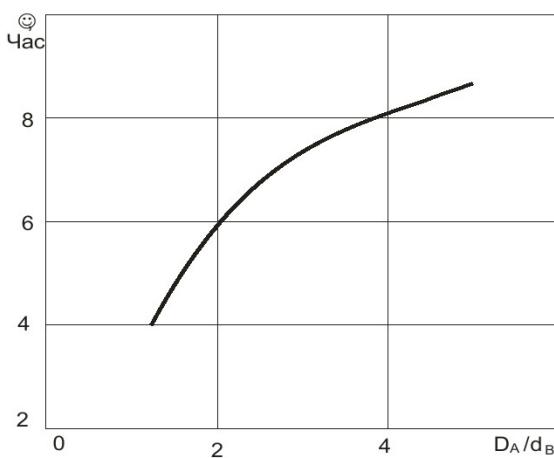


Рис. 7. Изменение времени охлаждения угольного скопления от соотношения расхода жидкого азота и воды при получении инертного состава

На рис. 6 приведено изменение максимальной температуры угольного скопления при подаче инертных составов на основе воды и жидкого азота с различными исходными температурами. Приведенные данные показывают, что вначале подачи инертных составов температура угольного скопления понижается медленно. Причем чем ниже начальная температура инертного состава, тем медленнее снижается максимальная температура угля. Постепенно скорость падения температуры угольного скопления увеличивается, достигая максимума в конце подачи инертного состава.

Влияние соотношения расходов жидкого азота и воды при получении инертного состава на длительность охлаждения угольного скопления показано на рис. 7. Отсюда следует, что увеличение доли азота в инертном составе замедляет процесс охлаждения. Повысить долю частиц льда в инертном составе можно также снижением исходной температуры воды, используемой для получения состава, путем совместного распыления с жидким азотом.

Таким образом, проведенное математическое моделирование подачи инертных составов, получаемых при совместном распылении жидкого азо-

та и воды, через разогретое угольное скопление позволяет сделать следующие выводы.

1. Увеличение скорости фильтрации инертного состава через разрыхленный уголь существенно интенсифицирует процесс охлаждения угля, значительно сокращая длительность ликвидации повышенной температуры. Однако расход инертного состава, необходимый для охлаждения угольного скопления, при изменении скорости хладагента практически остается постоянным.

2. Снижение начальной температуры инертного состава за счет сокращения доли частиц льда в единице объема состава увеличивает продолжительность охлаждения разогретого угольного скопления. Так, рост доли инертного газа в составе в 2,96 раза (с 1,4 до 4,15) приводит к повышению длительности охлаждения в 1,78 раза (с 4,5 до 8,0 суток).

3. Снижение температуры исходной воды, используемой для совместного распыления с жидким азотом для получения инертного состава, увеличивает долю частиц льда в хладагенте при одинаковой температуре состава и повышает эффективность тушения, сокращая длительность охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Портола В.А. Эндогенная пожароопасность шахт Кузбасса / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов, М.В. Шевченко, Н.Ю. Луговцова // Вестник КузГТУ. – 2012. – №2. – С. 44-47.
2. Портола В.А. Повышение эффективности применения азота для подавления самовозгорания угля / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов // Вестник КузГТУ. – 2011. – № 5. – С. 59-63.
3. Портола В.А. Эффективность использования инертных составов для тушения пожаров в выработанном пространстве шахт / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 6. – С. 34-37.
4. Портола В.А. Развитие процесса самовозгорания в скоплении предварительно охлажденного угля / Портола В.А., Галсанов Н.Л., Луговцова Н.Ю. // Вестник КузГТУ. – 2013. – №1. С. 49-52.

□ Авторы статьи:

Портола
Вячеслав Алексеевич
докт. техн. наук, проф. каф. АОТП
КузГТУ, проф. каф. БЖДЭ и ФВ
Юргинского технологического ин-
ститута ТПУ
E-mail: portola2@yandex.ru

Галсанов
Нима Лайдапович
соискатель каф. АОТП КузГТУ,
главный инженер шахты № 7 ОАО
«СУЭК-Кузбасс»
Тел.: (38456) 31693

УДК 620.9.001.12

А. И. Копытов, Ю. В. Антонов

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ ЭНЕРГЕТИКИ КУЗБАССА. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Утилизация отходов предприятий энергетики представляет собой одну из актуальных проблем в области охраны окружающей среды. В настоящее время количество и разновидность этих отходов по химическому составу в Кузбассе, как и в стране в целом, стремительно возрастает.

Золошлаковые отходы (ЗШО), образующиеся

при сжигании угля в топках ТЭЦ и котельных являются механической смесью золы и шлака. Усредненное состояние золы и шлака составляет 4:1.

По форме золошлаки представляют собой микроскопические сферические частицы оплавленных под воздействием высоких температур минералов, в основном кварца и частицами непра-