

## ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА ТРУДА

УДК 622.271

В.А. Портола, Н.Л. Галсанов, Н.Ю. Луговцова

### РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССА САМОВОЗГОРАНИЯ В СКОПЛЕНИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОХЛАЖДЕННОГО УГЛЯ

Необходимыми условиями развития процесса самовозгорания угля являются образование достаточных по массе скоплений разрыхленного угля, приток к нему необходимого количества воздуха и поглощение углем кислорода из окружающего воздуха.

В результате сорбции угольным скоплением кислорода и последующих химических реакций выделяется тепло, часть которого теряется в окружающую среду, а часть расходуется на нагревание угля.

Поэтому предотвращение развития процессов самовозгорания угля в шахтах осуществляется по следующим четырем направлениям

- снижение количества теряемого в выработанном пространстве угля, способного окисляться кислородом воздуха;
- снижение количества воздуха, поступающего к скоплениям угля, до безопасного уровня;
- уменьшение количества тепла, генерируемого углем при окислении кислородом;
- увеличением потерь тепла из окисляющегося угля в окружающее пространство.

Существующие на данный момент технологии угледобычи, применяемое оборудование, схемы проветривания не позволяют полностью предотвратить потери угля в выработанном пространстве, а также приток воздуха к теряемым скоплениям. Особенно сложно отрабатывать геологические нарушения, в которых теряется угля, ранее разрыхленный в результате сдвижения горных пород, с высокой химической активностью. Поэтому наиболее распространенным способом профилактики эндогенных пожаров в шахтах, разрабатывающих пласты угля, склонные к самовозгоранию, является обработка теряемого угля антипирогенами, снижающими химическую активность угля по отношению к кислороду. Уменьшение генерации тепла в угольном скоплении приводит к замедлению процесса самовозгорания или его предотвращению.

Снижения химической активности угля в основном достигают путем обработки теряемых скоплений твердыми и жидкими антипирогенами. Так, обычное увлажнение угля приводит к снижению его химической активности по отношению к кислороду из-за образования на его поверхности

слоя жидкости, препятствующей проникновению кислорода к активным центрам [1-3]. Добавка в жидкость поверхностно-активных веществ усиливает антипирогенное действие воды действия благодаря лучшей смачиваемости поверхности угля, приводящей к образованию пленок с большей поверхностью [4,5].

Применение глинистой пульпы позволяет дополнительно заполнить трещины и поры осевшей глиной.

Объем глины в целике, подаваемой в выработанное пространство для профилактических целей, должен составлять 3-5 % от объема вынимаемого угля. Также для профилактики самовозгорания угля используются и другие антипирогены в твердом и жидким состоянии [5,6].

Согласно санитарным нормам, в настоящее время на угольных шахтах в качестве антипирогенов допускается использовать хлористый аммоний, хлористый кальций, гашенную известь, карбамид и другие нетоксичные вещества.

Антипирогены применяются преимущественно в виде водных растворов в разных технологических схемах для профилактической обработки выработанного пространства, целиков угля и концентрированных потерь.

При отработке мощных пластов в зонах геологических нарушений рекомендуется пропитывать водными растворами антипирогенов краевые частицы целиков.

В последнее время широкое распространение получил способ обработки разрыхленных потерь угля водными растворами антипирогенов в виде тонкодисперсных аэрозольных частиц, подаваемых в выработанное пространство в потоке утечек воздуха [5].

Данная технология профилактики эндогенных пожаров позволяет проводить обработку выработанного пространства без остановки добычных работ в лаве, что очень важно с экономической точки зрения. Недостатком этого способа является малая дальность транспортирования антипирогена в выработанном пространстве, поэтому скопления угля, образующиеся за пределами этой зоны распространения аэрозоля, оказываются не обработанными.

Антипирогены для профилактики самовозго-

рания угля могут применяться не только в виде водных растворов, но и в виде порошков [6,7]. В качестве антипирогена используется состав из карбомида и диаммония фосфата. Предложено использовать для обработки выработанного пространства и летучую золу, подаваемую в потоке сжатого инертного газа [8].

Несмотря на многообразие предложенных и применяемых способов профилактики самовозгорания угля, эндогенные пожары продолжают возникать на угольных шахтах.

Причиной такой ситуации является невозможность обработки большинства поверхностей угольного скопления. Так, антипироген обычно наносится на поверхность угольного целика или нагнетается по скважинам в ограниченном количестве.

Поэтому после разрушения целика в выработанном пространстве основная часть поверхности скопления не подвергалась обработке и имеет высокую химическую активность.

Достичь существенного замедления процесса самовозгорания окисляющегося материала можно также путем снижения начальной температуры взаимодействующих компонентов [9]. В этом случае увеличится длительность низкотемпературного окисления. Одновременно, согласно уравнению Аррениуса, при снижении температуры уменьшается скорость реакции окисления. Поэтому охлаждение угля также приводит к сокращению количества выделяемого тепла, что позволит повысить вероятность предотвращения возникновения очагов самовозгорания.

Снизить температуру угля в выработанном пространстве возможно путем подачи низкотемпературного хладагента, например, охлажденного газа.

Однако газовые составы имеют незначительную плотность и удельную теплоемкость, поэтому для охлаждения угля потребуются большие объемы газа. Значительно сократить расход хладагента можно путем добавки в газ частиц замороженной жидкости [10].

Интенсивность теплосъема от угля и горных пород резко увеличивается за счет поглощения тепла на фазовый переход, а также большой плотности и удельной теплоемкости частиц жидкости. В качестве газа целесообразно использовать азот, не взаимодействующий с углем.

Достичь снижения температуры угля в выработанном пространстве возможно и за счет использования процесса испарения ранее поданной жидкости. Реализовать этот процесс можно путем периодической подачи распыленной воды в потоке воздуха, поступающего в отработанное пространство. В результате угля и горные породы увлажняются. После нагнетания жидкости в выработанное пространство необходимо подать сухой газ, например, азот. Во время подачи сухого газа резко интенсифицируется испарение ранее подан-

ных частиц жидкости, что сопровождается снижением температуры угля.

Особенно эффективен этот способ для снижения температуры угольной пыли, уносимой в выработанное пространство и оседающей в местах увеличения диаметра каналов, по которым фильтруется воздух. Частицы пыли будут увлажняться жидкостью еще во время движения и интенсивно охлаждаться в период испарения.

Для оценки влияния охлаждения угля на его химическую активность была проведена серия экспериментов. Уголь различной химической активности отбирался на угольных шахтах. Часть угля выдерживали на воздухе для снижения его активности. В лаборатории уголь размельчали и помещали в герметично закрываемые емкости, которые хранились в течение 24 часов при различной температуре. Затем в емкостях отбирались пробы газа, в которых измерялась концентрация оставшегося кислорода и рассчитывалась химическая активность угля. Результаты влияния температуры на химическую активность угля, имевшего наибольшую исходную активность, приведены на рис. 1.

Анализ полученных результатов показал, что снижение температуры пробы на десять градусов (с 20 до 10 °C) уменьшает химическую активность раздробленного угля практически в два раза. Последующее понижение температуры также снижает химическую активность угля, но с меньшей интенсивностью.

Соответственно и скорость выделения тепла при окислении охлажденного угля значительно уменьшится, что замедлит развитие процесса самонагревания или может полностью его предотвратить.

Однако эффективность падения химической активности угля при охлаждении зависела и от начальной активности пробы угля. Так, при снижении начальной химической активности проб угля охлаждение в меньшей степени уменьшает скорость реакции угля с кислородом.

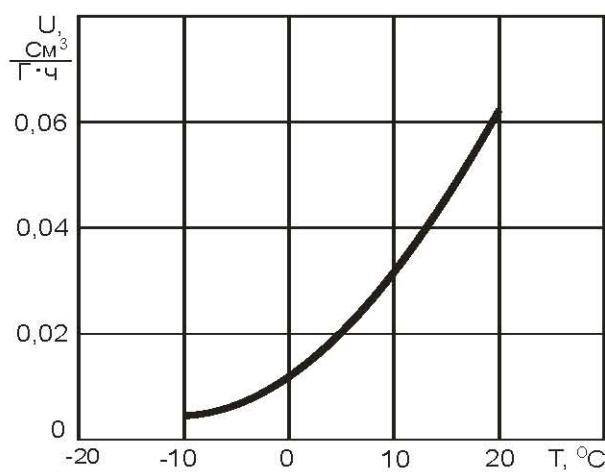


Рис. 1. Изменение химической активности угля в зависимости от температуры

Для оценки эффективности способа предотвращения процесса самовозгорания угля путем его предварительного охлаждения до определенной температуры, использовалось математическое моделирование.

Проведенный анализ показал, что существуют различные математические модели процесса самовозгорания, отличающиеся количеством факторов, входящих в уравнения и влияющих на процесс [11-14]. Для решения уравнений применялись аналитические и численные методы. Однако результаты расчета у различных исследователей отличаются незначительно. Поэтому при выборе математической модели процесса самовозгорания использовались уравнения, описывающие нестационарный тепло- и массоперенос в одномерном скоплении угля.

Перенос тепла, генерируемого при взаимодействии кислорода с углем, в выбранной модели осуществлялся за счет теплопроводности и конвективными потоками воздуха. Кислород распространялся в скоплении угля за счет диффузии и потоком фильтрующегося воздуха. С учетом экспоненциальной зависимости скорости сорбции кислорода углем от температуры использовались следующие уравнения, описывающие изменение температуры и концентрации кислорода в угольном скоплении

$$(1-m)\rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} (1-m) + \\ + (1-m)\rho_1 C Q K \exp(-E/RT) - \rho_2 c_2 V \frac{\partial T}{\partial x} \\ m \frac{\partial C}{\partial \tau} = m D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - \\ - (1-m)\rho_1 C K \exp(-E/RT) \\ T(x,0) = T_0; \quad C(x,0) = C_0; \quad (1) \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_1 (T - T_0); \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_2 (T - T_0); \\ D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{c1} (C - C_0); \\ D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_{c2} (C - C_0),$$

где  $m$  - пористость скопления угля;  $\rho_1$  - плотность угля,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c_1$  - теплоемкость скопления угля,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $T$  - температура,  $\text{К}$ ;  $\tau$  - время,  $\text{с}$ ;  $\lambda$  - 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,

$\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ ;  $\rho_2$  - плотность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c_2$  - теплоемкость газа,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $V$  - скорость фильтрации газа,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $D$  - коэффициент молекулярной диффузии кислорода,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\alpha_1$  - коэффициент теплоотдачи от угля,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $\alpha_{c1}$  - коэффициент массоотдачи,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $L$  - размер угольного скопления,  $\text{м}$ .

Решение системы уравнений (1) осуществлялось конечно-разностным методом [15-17] с реализацией на ПЭВМ.

При моделировании оценивалось влияние на процесс самовозгорания таких изменяющихся факторов, как сорбционная активность и начальная температура угля.

В расчетах использовалось скопление угля со следующими базовыми параметрами:  $L = 3,0 \text{ м}$ ;

$\rho_1 = 1200 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $m = 0,3$ ;  $Q = 1,26 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{м}^3$ ;  $E = 6,28 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{моль}$ .

Изменение максимальной температуры в самовозгорающемся угольном скоплении во времени в зависимости от начальной температуры скопления приведено на рис. 2.

При анализе полученных результатов необходимо учитывать, что за счет одномерности модели потери тепла существенно сокращаются и время развития процесса самовозгорания также уменьшается.

Результаты расчета показывают, что снижение начальной температуры угля резко замедляет начальную стадию низкотемпературного окисления. Незначительное количество тепла, выделяемое при окислении охлажденного угля, быстро рассеивается в окружающей среде, что резко увеличивает инкубационный период процесса самовозгорания угля.

В результате появляется возможность отработки подготовленных запасов угля без возникновения эндогенного пожара.

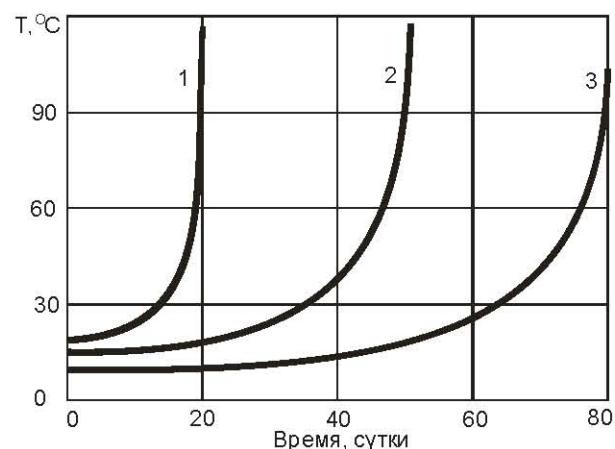


Рис. 2. Изменение температуры угля во времени в процессе самовозгорания: 1 – начальная температура угля  $20^\circ\text{C}$ ; 2 – начальная температура угля  $15^\circ\text{C}$ ; 3 – начальная температура угля  $10^\circ\text{C}$

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Охлаждение угольных скоплений резко замедляет процесс самонагревания и может остановить рост температуры угля. Поэтому для предупреждения эндогенных пожаров в шахтах можно снижать температуру теряемых скоплений угля.

2. Для охлаждения теряемого угля целесооб-

разно подавать в выработанное пространство частицы замороженной жидкости. Носителями частиц льда может быть газообразный азот.

3. Снижения температуры угля и осевшей угольной пыли можно достичь путем чередования подачи в выработанное пространство распыленной воды и сухого газа, например, азота.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов О. И. Скорость поглощения кислорода сухим и увлажненным углем // Уголь. – 1968. – № 5. – С. 66–67.
2. Ярцев В. А. Роль влагообмена в тепловом балансе самовозгорающегося угля // Изв. вузов. Горный журнал. – 1970. – № 7. – С. 75–78.
3. Портола В.А. Влияние профилактического увлажнения на процесс самовозгорания угля // ФТПРПИ. – 1984. – № 3. – С. 108–110.
4. Игишев В.Г., Портола В.А. Оценка параметров пены, необходимых для тушения очагов самовозгорания / ФТПРПИ. – 1993. - № 4. – С. 74-78.
5. Технологические схемы профилактики, локализации и тушения эндогенных пожаров в угольных шахтах / В.А. Горбатов, В.Г. Игишев, В.Б. Попов и др. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2002. – 177 с.
6. Горбатов В.А., Игишев В.Г., Попов В.Б., Портола В.А., Син А.Ф. Защита угольных шахт от самовозгорания угля. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2001. – 132 с.
7. Болдин, В. А. Профилактика эндогенных пожаров порошкообразными антипирогенами // Предупреждение эндогенных пожаров в шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1986. – С. 22–25.
8. Разработка и внедрение новых способов профилактики, локации и локализации очагов самовозгорания угля в действующих выемочных полях шахт Кузбасса / В.Г. Игишев, Л.П. Белавенцев, В.А. Портола и др. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2006. – 98 с.
9. Портола В.А. Предупреждение самовозгорания угля снижением его начальной температуры // Безопасность труда в промышленности. – 1995. – № 6. – С. 29-30.
10. Портола В.А., Галсанов Н.Л. Повышение эффективности применения азота для подавления самовозгорания угля. // Вестник КузГТУ, 2011 г. № 5.- С. 59-63.
11. Глузберг Е.И. Математические модели самовозгорания медленно окисляющихся материалов // Тр. ВНИИПО / Применение математических методов в вопросах пожарной охраны. - М. - 1982.- С. 5-13.
12. Баев Х.А. Теоретическое исследование кинетики тепловых и термохимических процессов самовозгорания угля // Сб. тр. МакНИИ / Вопросы безопасности в угольных шахтах.- 1968.- Т ХVIII.- С. 356-363.
13. Фрейдман С.Л. Самонагревание угольного скопления в выработанном пространстве выемочного участка // ФТПРПИ.- 1982.- № 4.- С.91-96.
14. Бонецкий В.А., Богатырева А.С., Егошин В.В. О математической модели низкотемпературного окисления угольного скопления // ФТПРПИ.-1976.- № 6.- С. 106-111.
15. Самарский А.А. Теория разностных схем.- М.: Наука, 1977.- 656 с.
16. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы.- М.: Наука, 1977.- 439 с.
17. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена.- Минск: Наука и техника, 1976.- 144 с.

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

Луговцова  
Наталья Юрьевна,  
аспирант ТПУ, ассистент каф. БЖДЭ  
и ФВ Юргинского технологического  
института ТПУ  
Тел.: (38451) 62401