

УДК 622.822.22:536.244:011.103



С. П. ГРЕКОВ,
доктор техн. наук
(НИИГД «Респиратор»)



П. С. ПАШКОВСКИЙ,
доктор техн. наук
(НИИГД «Респиратор»)



В. П. ОРЛИКОВА,
инж.
(НИИГД «Респиратор»)

Состояние вопроса. В настоящее время вид и количество профилактических мероприятий по предупреждению самовозгорания углей определяется на основе прогноза эндогенной пожарной опасности, устанавливаемой для каждого шахтопласта перед началом ведения горных работ. Вместе с тем известно, что пожароопасность угольных пластов изменяется

Контроль за признаками самонагревания угля

Рассмотрена и экспериментально апробирована математическая модель самонагревания углей различной стадии метаморфизма как пористой среды в диапазоне температур 340 – 400 К. Предложено использовать отношение оксида углерода к кислороду, израсходованному на реакцию окисления, для определения температуры очага самонагревания угля и времени его образования.

Ключевые слова: гетерогенный процесс, доля реакционной поверхности, низкотемпературное окисление, скорость реакции, энергия активации, самовозгорание.

Контактная информация: orlikova.69@yandex.ru

зонально даже в пределах одного и того же выемочного участка. Поэтому в отдельных зонах шахтного поля проведение мероприятий нецелесообразно, а в других они должны быть усилены. Таким образом, создание эффективного метода прогноза эндогенной пожарной опасности выемочных участков в процессе ведения горных работ актуально.

Исходя из указанного, согласно руководящему документу [1], на каждой шахте, отрабатывающей пласты угля, склонные к самовозгоранию, необходимо проводить текущее прогнозирование эндогенной пожароопасности по методике НИИГД. Должен осуществляться контроль за признаками самонагревания угля в наиболее пожароопасных местах. Одновременно на этих пластах необходимо выполнять предусмотренные бассейновыми инструкциями мероприятия по контролю за признаками самовозгорания угля на ранней стадии. Для этого применяют традиционные методы: анализ газов на содержание оксида и диоксида углерода, кислорода, водорода, а также измеряют температуру воды и воздуха.

Температуру угля в шахтах и фоновое содержание в атмосфере выработок оксида углерода контролируют специалисты ГВГСС. Периодичность контроля устанавливает главный инженер шахты по согласованию с ГВГСС. При обнаружении хотя бы одного из признаков, характерных для ранней стадии самовозгорания угля, главный инженер организует отбор проб газа в специальные трубки – концентраторы для определения объемной доли в атмосфере микропримесей этилена и ацетилена. По соотношению этих компонентов определяют температуру угля. Однако показатели соотношения этилена и ацетилена не дают полной картины развития процесса самонагревания угля, так как не позволяют установить время зарождения очага, что имеет значение для распознавания его месторасположения и, следовательно, тушения.

Контроль за стадией развития пожара по соотношению объемной доли этилена и ацетилена не отражает сути процесса низкотемпературного окисления угля, что возможно осуще-

ствить на основании соотношения объемной доли концентрации оксида углерода и кислорода на аварийном участке.

Известные методы оценки процесса самонагрева угля основаны на анализе продуктов реакции кислорода с углем, тогда как согласно теории уголькислородного комплекса на начальной стадии кислород физически сорбируется поверхностью угля с незначительным выделением теплоты. Затем с возрастанием температуры начинается расщепление неустойчивых кислородных комплексов с образованием конечных продуктов окисления угля – оксидов углерода и воды, при котором выделение теплоты увеличивается в 1,5–2 раза [2]. Таким образом, контроль концентрации кислорода – наиболее чувствительный индикатор раннего появления очага самонагрева угля, поскольку дает возможность проследить весь процесс низкотемпературного окисления.

Влияние содержания кислорода в шахтном воздухе резко возрастает с повышением температуры: чем она выше, тем при его меньшей концентрации может протекать процесс окисления. Зависимость самонагрева от содержания кислорода в шахтной среде – один из главных факторов, влияющих на пожароопасность горных работ при переходе их на глубокие горизонты [3].

Существующая система контроля на шахтах, ограничивающаяся газовым анализом воздуха в действующих выработках, нередко оказывается малоэффективной при обнаружении самовозгорания угля и практически не дает информации о местонахождении очага пожара, что затрудняет использование активных методов тушения и становится причиной изоляции участков с признаками самовозгорания.

Цель работы – на основании математического описания процесса низкотемпературного окисления угля для получения информации о динамике развития очага самонагрева и с использованием данных текущего прогнозирования эндогенной пожароопасности предложить метод определения температуры очага самонагрева угля и времени его зарождения.

Теоретические и экспериментальные исследования. Ранее [4] авторы рассмотрели тепловую и диффузионную задачи самонагрева угля, предполагая известными функциональные зависимости плотности источников и стоков от

температуры и концентрации. Сформулирована физическая и адекватная ей математическая модели процесса в слое угля различной толщины. Предложен способ численного решения задачи. Сложность вычислений и временами неадекватность полученного решения по разработанной программе из-за неустойчивости численного метода позволили рекомендовать упрощенную математическую модель для аналитического решения задачи самонагрева угля в слое зернистого материала и его температуры, имеющую вид [5]

$$\rho c[(\partial T/\partial \tau) + u(T - T_0)/l] = [(\alpha \Pi)(T_c - T)/S] + w, \quad (1)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³;

c – удельная теплоемкость газов при постоянном давлении, Дж/(кг · К);

T – температура в очаге пожара, К;

T_0 – температура до пожара, К;

T_c – температура пород, окружающих скопление угля, К;

u – скорость движения воздуха, м/с;

l – длина зоны горения, м;

α – коэффициент теплообмена между скоплением угля и окружающими его породами, Вт/(м² · К);

Π – периметр скопления угля, м;

S – площадь поперечного сечения скопления угля, м²;

w – интенсивность источника теплоты при горении, Вт/м³.

Решение уравнения (1) для квазистационарного случая, полагая $T_c = T_0$ и учитывая, что скорость u выноса тепла потоком воздуха через угольное скопление на несколько порядков меньше, чем теплоотдача, имеет вид

$$T = T_0 + [wS/(\alpha \Pi)]. \quad (2)$$

Интенсивность тепловыделения w , Дж/(м³·с), согласно ранее предложенной математической модели [6], подтвержденной проведенными экспериментальными наблюдениями [7], представим формулой

$$w = v_{q_0} \xi a_{O_2}, \quad (3)$$

где v_{q_0} – скорость тепловыделения при окислении угля, Дж/(моль·с) [8];

ξ – доля концентрации кислорода, вступающего в реакцию окисления с углем;

a_{O_2} – концентрация кислорода, моль/м³.

Параметры, входящие в выражение (3), связаны с генетическими особенностями углей. На ос-

новании экспериментальных данных [9] авторы сделали попытку выразить их через массовую долю горючих веществ в угле (V^r , %), для дальнейшего моделирования процесса низкотемпературного окисления углей, разработки метода расчета температур самонагрева и времени от зарождения процесса.

Исходя из заключения проф. В. С. Веселовского о том, что лимитирующей стадией скорости низкотемпературного окисления углей является скорость диффузии кислорода к их внутренней поверхности, в НИИГД для определения констант скоростей сорбции кислорода разработан новый метод, основанный на использовании возможностей газовой хроматографии. Показано, что активность углей можно характеризовать значениями коэффициентов диффузии кислорода в поры угля. Авторы [10] предложили способ определения коэффициентов внутренней диффузии D , m^2/c , и нашли его зависимость от V^r и фильтрационного объема пор V_{ϕ} , cm^3/g .

Определена зависимость константы скорости химического реагирования углей k_0 , c^{-1} , от единого параметра V^r , а предэкспоненциального множителя k_0 , c^{-1} , – от энергии активации E , Дж/моль.

Для определения параметра ξ , входящего в формулу (3), обратимся к работе [11], в которой было показано, что при гетерогенных процессах окисления углей реакционная поверхность подвергается непрерывному изменению. Это вызвано тем, что происходят образование и распад поверхностных соединений при адсорбции кислорода, внутреннее реагирование при проникновении кислорода вглубь частиц угля и об-

разование вблизи поверхности частиц твердых продуктов реакции.

Исходя из математической модели [11], в работе [12] рассмотрен ход гетерогенных реакций первого порядка с адсорбцией кислорода и дано выражение

$$\xi = 1 - \exp(-vt) + [v/(\mu - v)][\exp(-\mu t) - \exp(-vt)], \quad (4)$$

где v – константа скорости образования поверхностного комплекса, c^{-1} , зависящая от энергии активации процесса;

μ – константа скорости выделения метана, c^{-1} , зависящая от газоносности пласта и массовой доли горючих веществ в угле.

Чтобы найти значение кислорода, вступившего в реакцию окисления к моменту t ($\Delta C_{O_2} = \xi a_{O_2}$, моль/ m^3), используем проведенные авторами статьи исследования, позволяющие рассчитывать концентрацию кислорода в угле, исходя из концентрации кислорода в шахтном воздухе, газоносности пласта и плотности угля.

Так как для нахождения температуры угля в очаге самонагрева необходим еще один индикаторный компонент, используем оксид углерода, который достаточно точно определяется в шахтном воздухе как экспресс-методом с помощью индикаторных трубок, так и лабораторным путем.

Воспользуемся для расчета оксида углерода, выделяющегося при низкотемпературном окислении угля, данными авторов [13], изучавших склонность к самовозгоранию углей различных марок при температурах 40 и 80 °С. Обобщая эти

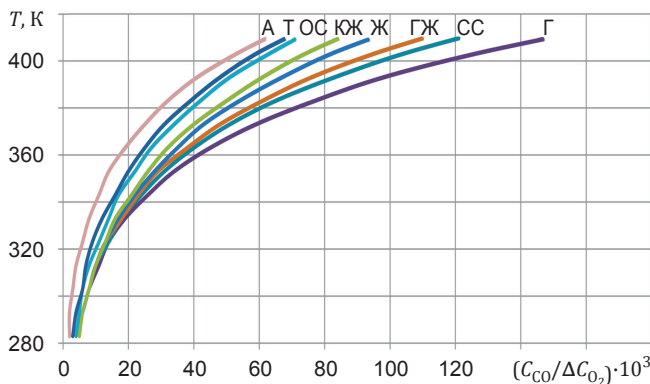


Рис. 1. Зависимость температуры T угля в очаге самонагрева от соотношения $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$ для углей различных марок.

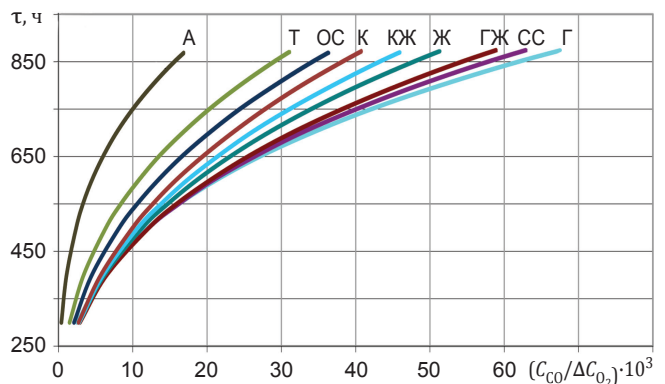


Рис. 2. Зависимость времени τ зарождения очага самонагрева угля от соотношения $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$ для углей различных марок.

данные для различных V^T , получены зависимости:
для температуры 340 К

$$C_{CO}/\Delta C_{O_2} = (0,0001V^T + 3 \cdot 10^{-5})t^{-0,003V^T + 0,384}, \quad (5)$$

для температуры 380 К

$$C_{CO}/\Delta C_{O_2} = 0,007t^{0,18 + 0,004V^T}. \quad (6)$$

В целях установления взаимосвязи параметра $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$ с температурой угля в очаге самонагревания сравним найденные по этим формулам параметры $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$, зависящие от времени, с данными, вычисленными по формулам (1 – 4) для разных температур и времени.

Перебор параметров для разной степени метаморфизма угля и расчеты позволили предложить графический метод определения температуры самоокисляющегося скопления угля (рис. 1) и времени зарождения очага его самонагревания (рис. 2) по соотношению $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$.

Выводы. Путем разработки математической модели процесса окисления угля и использования экспериментальных данных предложен метод определения температуры очага самонагревания угля и времени его образования по анализу оксида углерода и кислорода, израсходованного на окисление.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Эндогенные пожары на угольных шахтах Донбасса. Предупреждения и тушение.* Инструкция: КД 12.01.401 – 96. – Донецк, 1997. – 72 с.
2. *Кучер Р. В.* Структура ископаемых углей и их способность к окислению / Р. В. Кучер, В. А. Компанец, Л. Ф. Бутузова. – К.: Наук. думка, 1980. – 168 с.

3. *Линденау Н. И.* Происхождение и тушение эндогенных пожаров в угольных шахтах / Н. И. Линденау, В. М. Маевская, В. Ф. Крылов. – М.: Недра, 1977. – 320 с.
4. *Греков С. П.* Прогноз параметров пожара по данным мониторинга на исходящих струях в горных выработках / С. П. Греков, И. Н. Зинченко, В. З. Брюм // Вестник Херсонского нац. ун-та. – 2014. – № 2 (49). – С. 106 – 112.
5. *Греков С. П.* Неизотермическая кинетика гетерогенного окисления углей кислородом воздуха и их самонагревания / С. П. Греков, Я. Цыганкевич, Б. И. Кошовский, А. А. Березовский // Химия твердого топлива. – 2000. – № 6. – С. 27–37.
6. *Греков С. П.* Математическое моделирование процесса самонагревания углей для выбора антипирогенов ХТТ / С. П. Греков, А. Е. Калюсский, Б. И. Кошовский // Химия твердого топлива. – 1997. – № 1. – С. 71–74.
7. *Греков С. П.* Определение склонности углей к самовозгоранию / С. П. Греков, В. П. Орликова, А. А. Всякий // Горноспасательное дело. – 2014. – Вып. 51. – С. 88 – 99.
8. *Греков С. П.* Тепловой эффект окисления угля и эндогенная пожароопасность / С. П. Греков, П. С. Пашковский, В. П. Орликова // Уголь Украины. – 2014. – № 10. – С. 46–50.
9. *Пашковский П. С.* Эндогенные пожары в угольных шахтах. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 792 с.
10. *Пашковский П. С.* Расчет коэффициентов диффузии в углях с использованием хроматографического метода / П. С. Пашковский, С. П. Греков, Т. Г. Салахутдинов // Горноспасательное дело. – 2014. – Вып. 51. – С. 78–87.
11. *Канторович В. В.* Основы теории горения и газификации твердого топлива. – М.: АН СССР, 1958. – 598 с.
12. *Греков С. П.* Сорбционные процессы в газонасыщенном угольном скоплении / С. П. Греков, П. С. Пашковский, И. П. Зинченко / Вестник Херсонского нац. ун-та. – 2007. – № 2 (28). – С. 247–252.
13. *Münzner H.* Zur Kinetik der Kohleoxydation im Temperaturbereich 30–100 °C / H. Münzner, W. Peters // Brennstoff-Chemie. – 1965. – № 12. – P. 399–407.

ПО МАТЕРИАЛАМ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ УКРАИНЫ» ПРОШЛЫХ ЛЕТ

Год 1974

В журнале № 5 в статье В. И. Шевцова, В. И. Терехова «С новой горной техникой – к рубежам пятилетки» на примере шахты «Бутовка-Донецкая» комбината Донецкуголь описано, как коллектив шахты выполняет план и принятые социалистические обязательства. Поистине годом внедрения новой техники, средств механизации и автоматизации на всех участках стал 1973 г. В решении многих вопросов, связанных с внедрением новой техники, неоценимую помощь оказывает постоянное содружество с научными и проектными организациями. Неуклонное повышение уровня технической оснащенности шахты, стремление эффективнее использовать горную технику позволяет горнякам добиваться новых успехов в работе. Самое ответственное обязательство – в четвертом году пятилетки превзойти по производительности труда рубежи, предусмотренные пятилетним планом.