

КОСТЕНКО В.К. (Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина)

СНИЖЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПОДАВЛЕНИЕМ САМОНАГРЕВАНИЯ УГЛЯ В ШАХТАХ

Представлены результаты исследования, которые позволили расширить представления об особенностях возникновения и развития очагов самонагревания угля и выявить ряд новых факторов, которые способствуют повышению эффективности прогнозирования и профилактики эндогенных пожаров, за счет чего достигается снижение негативного воздействия угледобывающих предприятий на окружающую среду.

На протяжении последних пятнадцати лет в шахтах Украины ежегодно регистрировали от 6 до 36 эндогенных пожаров. За последние годы эндогенными пожарами были выведены из эксплуатации или осложнена подготовка самых продуктивных в Украине выемочных полей на шахтах: “Привольнянская”, им. А.Ф. Засядько, им. Г.Г. Капустина, “Самсоновская-Западная” и др. Они стабильно остаются на втором месте, после экзогенных пожаров, по количеству и на первом по размерам нанесенных ущербов, которые достигали от 12 до 40% от потерь, причиненных авариями в угольной промышленности. Кроме прямых убытков, связанных с потерей техники, горных выработок и подготовленных к выемке запасов угля, в интенсивно обрабатываемых выемочных полях особенно большие убытки связаны с простоями лав или несвоевременной подготовкой фронта очистных работ.

Самонагревание и горение угля в подземных условиях приводит к образованию значительного количества газообразных (оксиды углерода, серы и других элементов), жидких веществ (растворы солей, органических продуктов термодеструкции угля и пород, взвеси) и тепла. Они, за счет аэродинамических и гидравлических связей, минуют изоляционные сооружения, проникают из очагов реакции в примыкающие горные выработки и на поверхность, ухудшая и без того высокое экологическое напряжение на окружающую угольные шахты среду.

Эндогенные пожары возникают из-за самонагревания угля в труднодоступных местах, таких как выработанное пространство, в целиках, за крепью подготовительных выработок. Подавление очагов горения в таких условиях затруднено, чем обусловлена самая высокая продолжительность ликвидации этого вида подземных аварий. Активным способом было погашено 36%, изолировано - 59%, комбинированным способом ликвидировано 5% пожаров. Наметила тенденция к увеличению продолжительности и трудоемкости их тушения.

Низкую эффективность профилактических мероприятий можно объяснить недостаточной изученностью процессов формирования воздухопроницаемых пустот, образующихся в выработанном пространстве, и параметров газообмена в них.

В этой связи раскрытие условий возникновения и развития очагов самонагревания угля, разработка средств и способов их предупреждения и подавления в труднодоступных местах разрабатываемой угленосной толщи является актуальной научно-технической проблемой, решение которой позволит обеспечить эффективное и безопасное ведение горных работ и существенно сократить негативное воздействие на окружающую среду.

Для этого в ДонНТУ приведены теоретические, лабораторные и шахтные исследования термодинамических процессов, происходящих при формировании очагов самонагревания угля в подземных горных выработках и выработанных пространствах.

Уточнено влияние температуры воздуха на глубину проникновения кислорода в угольное вещество. С использованием хроматографии изучена зависимость константы скорости окисления угля от его фракционного состава. По мере измельчения угля наблюдалось отклонение от линейного роста зависимости между обратным значением диаметра зерна и константой скорости окисления, которая стремилась к постоянному значению. Наиболее активны частицы угля размером менее 0,1 мм, а для имеющих размер менее 0,04 мм - скорость окисления максимальна и постоянна. С увеличением температуры воздуха от 323 до 373...393 К в 2...2,5 раза увеличивается глубина проникновения воздуха в уголь. При этом объем, и соответственно масса угля, который окисляется, значительно возрастают, что определяет существенное увеличение генерируемой очагом теплоты.

Проведена оценка изменения под влиянием водяного пара химических свойств остающегося в выработанном пространстве измельченного угля. Для этого использованы результаты экспериментов по изучению кинетики увлажнения углей разных марок. Анализ изотерм увлажнения угля разной дисперсности при изменяющихся термодинамических условиях позволил получить соотношение, которое связывает температуру, влажность и давление:

$$P = A_0 \cdot W / (W_n e^{-E/RT} - W), \quad (1)$$

где P - давление пара над поверхностью угля, Па; E - энергия активации, Дж/моль; W_n - начальная влажность угля, %; W - текущее равновесное влагосодержание, %; T - температура угля, К; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К); A_0 - эмпирический коэффициент; Па.

Определены в лабораторных условиях значения A_0 и E для наиболее склонных к самовозгоранию типов донецких углей.

Уточнена, с учетом полученных сведений о местах и условиях возникновения эндогенных пожаров, схема тепломассопереноса в очаге самонагревания. При этом, в отличие от известных схем, реализована возможность моделировать очаги, углубленные в деформированную краевую часть угольного пласта (рис. 1).

Чтобы процесс самонагревания угля в скоплении привел за некоторое время t к самовозгоранию, необходимо выполнение условия:

$$I = \frac{m_c}{S_0} \left\langle \frac{\sum_{i=1}^3 A_i}{Q \bar{c} I_r} \right\rangle. \quad (2)$$

где: I - комплексный показатель пожароопасности, кг/м²; m_c - масса очага самонагревания, кг; Q - теплота хемосорбции кислорода углем, Дж/м³; \bar{c} - объемная концентрация кислорода, доли ед.; S_0 - площадь полной поверхности скопления, м²;

$$I_r = \int_0^{t_u} u dt; \quad u - \text{удельная скорость сорбции кислорода углем, м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}).$$

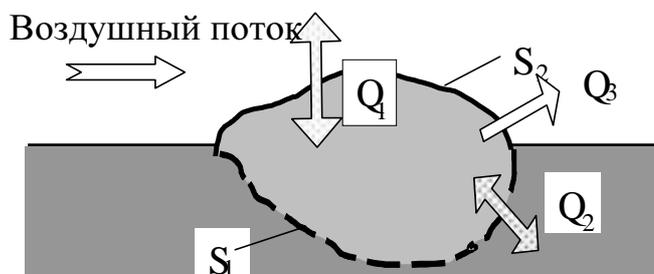


Рис. 1. Схема тепломассообмена в очаге самонагревания: Q_1 и Q_2 - соответственно тепловые потоки между углем, воздушной средой и породным массивом; Q_3 - вынос теплоты, обусловленный испарением воды; S_1 , S_2 - части поверхности очага, контактирующие с массивом пород и воздухом

Выражение (2) отображает термодинамическое состояние угольного скопления в любой промежуток времени. Схема прогнозирования состояния окисляющегося угля следующая. Количество теплоты, выносимой потоком фильтрующего воздуха, (Q_1 , Дж) определяется из выражения:

$$Q_1 = \frac{S_2}{2} \rho_V c_p V_{\phi} \epsilon \int_0^{t_u} (T - T_B) dt, \quad (3)$$

где S_2 - площадь части поверхности скопления, которая контактирует с воздухом;
 T - текущее значение температуры угля в скоплении, К;

T_b - температура воздуха, К; t_u - инкубационный период самовозгорания угля, с; e - пористость измельченной угольной массы.

Формула (3) может быть представлена в виде:

$$Q_1 = A_1 \cdot S_0,$$

$$\text{где } A_1 = \begin{cases} \frac{\rho_g c_p V_{TM} \varepsilon I_r}{2}, & \bullet \text{ при } \Delta S \in S_2 \\ 0, & \bullet \text{ при } \Delta S \in S_1 \end{cases}; \quad (4)$$

I_r - интеграл, входящий в формулу (2); DS - элемент площади, m^2 ; S_1 - площадь части поверхности скопления, которая контактирует с породами, m^2 .

Количество теплоты, которая теряется источником самонагрева в результате теплообмена с породами, равняется:

$$Q_2 = A_2 \cdot S_0, \quad (5)$$

$$\text{где } A_2 = \begin{cases} K_r(1-\varepsilon)I_r, & \text{при } \Delta S \in S_1 \\ 0, & \text{при } \Delta S \in S_2 \end{cases};$$

где K_ϕ - коэффициент нестационарного теплообмена, Дж/($m^2 \cdot c \cdot K$).

Третья составляющая потерь теплоты в скоплении при самонагревании определяется процессом выпаривания влаги с поверхности частиц и пор угля и вычисляется по формуле:

$$Q_3 = A_3 \cdot S_0, \quad (6)$$

$$\text{где } A_3 = \begin{cases} 0,01(1-\varepsilon)V\mu W(\bar{P}_n - \bar{P}_0) \int_0^{t_u} \frac{dt}{R(T-T_0)}, & \text{при } \Delta S \in S_2 \\ 0, & \text{при } \Delta S \in S_1 \end{cases}$$

V - скорость движения воздуха вдоль поверхности скопления угля, м/с; m - молярная масса воды, кг/моль; W - влажность угля, %; \bar{P}_n , \bar{P}_0 - средние значения давления пара над поверхностью угля и в воздухе, который обтекает скопление нагретого угля, Па; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К).

Теплота, которая генерируется в скоплении при самонагревании угля, определяется из выражения:

$$Q_r = m_c Q_c I_r = m_c Q_c \int_0^{t_u} u dt \quad (7)$$

Как следует из теоретических расчетов, напряженное состояние подработанных лавой пород кровли зависит, преимущественно, от величины прогиба (опускания) толстой плиты (U), которая является функцией отношения жесткости плиты (D) к действующей в заданной точке массовой нагрузке (M). Жесткость зависит от мощности (h) слагающих плиту породных слоев и их деформационных свойств - модуля упругости (E) и коэффициента поперечной деформации (n)

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot h_i^3}{12(1-\nu_i^2)}, \quad (8)$$

где n - число породных слоев, слагающих толщину основной кровли пласта; E_i , ν_i , и h_i - соответственно модуль упругости, коэффициент поперечной деформации (Пуассона) и мощность i -го породного слоя.

При этом мощность породных слоев является основным определяющим жесткость кровли показателем так как в выражении (8) она находится в третьей степени, а, например, модуль упругости в первой.

В находящейся под прочными и мощными породами-мостами толще основной кровли пласта нагрузка на единицу площади плиты (M , H/m^2) определяется собственной массой слагающих ее слоев

$$M = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot g \cdot h_i, \quad (9)$$

где n – число слагающих толщу основной кровли пласта породных слоев; ρ_i и h_i – соответственно плотность и мощность i -го породного слоя; g – ускорение свободного падения.

Проверка адекватности полученных теоретических результатов натурным условиям была проведена путем определения тесноты связи между ними и экспериментально установленными проф. И.Л. Черняком (МГГУ) параметрами оседания основной кровли пласта. С учетом данных о текстуре пород кровли в семи горных выработках была рассчитана средняя жесткость пород кровли разрабатываемых пластов, а также прогиб кровли в виде отношения ее жесткости к нагрузке ($U=D/M$), как превалирующий над другими показатель устойчивости толщи.

На рис. 2 представлены результаты сопоставления размеров участков активного оседания пород кровли (b_d) и расчетного ее прогиба (U). Достаточные статистические показатели тесноты связи, позволяют сделать заключение о качественном совпадении характера изменения расчетных показателей с экспериментальными.

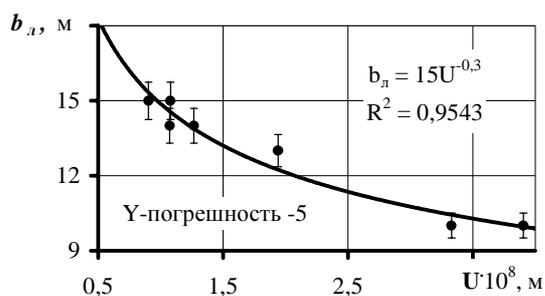


Рис. 2. Взаимосвязь экспериментально установленных (b_d) и расчетных (U) параметров деформирования подработанной слоистой кровли пласта

С учетом полученных зависимостей можно прогнозировать величину минимально допустимой и безопасной скорости подвигания очистного забоя на отдельных участках выемочного столба с изменяющимися горно-геологическими условиями, которая должна быть не ниже

$$v_{оч}^M > b_d / t_{инк} k_n > [15 (D/M \cdot 10^{-7})^{-0,3}] / t_{инк} k_n, \quad (10)$$

где k_n – коэффициент неравномерности скорости подвигания очистного забоя, который определяют по результатам маркшейдерских съемок в соседних выемочных полях. В первом приближении для сложных горно-геологических условий и средних уровнях надежности оборудования и организации работ его можно принимать равным $k_n=1,5 \dots 3$. При этом показатели D и M определяют в соответствии с выражениями (9) и (10), исходя из данных геологической разведки поля, таких как тип и мощность слагающих кровлю породных слоев.

На рис. 3 представлен геологический разрез в пределах выемочного столба слоистой породной толщи, составляющей непосредственную кровлю разрабатываемого пласта. На практике удобнее оперировать не показателями шага обрушения и скорости подвигания фронта очистных работ, а минимально допустимой нагрузки на забой. Оценку опасного состояния предложено производить, пользуясь следующим критерием

$$\sum_{i=1}^{t_{инк}} Q_i / Q_{min} t_{инк} \leq 1, \quad (11)$$

где $\sum_{i=1}^{t_{\text{инк}}} Q_i$ - фактическая суммарная добыча из лавы за период равный инкубационному, тонн;

$Q_{\text{мин}}$ - расчетный минимально допустимый уровень добычи угля из лавы, т/сут;

$t_{\text{инк}}$ - инкубационный период самовозгорания угля, сут.

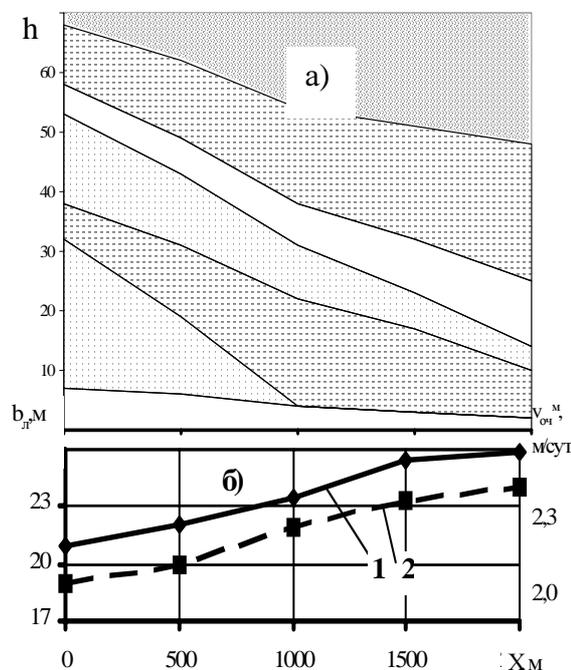


Рис. 3. Нестабильная по длине выемочного столба слоистая текстура пород кровли пласта (а) и соответствующее ей изменение (б) длины шага обрушения (1) и безопасной допустимой скорости подвигания очистного забоя (2)

Если величина критерия равняется единице или больше, то угроза эндогенного пожара отсутствует, если меньше – то следует проводить дополнительные профилактические мероприятия по предотвращению самовозгорания угля в выработанном пространстве.

С учетом установленных в шахтных условиях геомеханических особенностей сдвижений пород кровли в выработанном пространстве определяется время контакта угля с воздухом (рис. 4).

Благодаря выполненным исследованиям появилась возможность обеспечить эффективное влияние на кинетику окисления угля в горных выработках: путем управления гранулометрическим составом, параметрами химической активности угля, расходом воздуха, содержанием кислорода в пожароопасной зоне и др. Прогноз процесса самонагрева угля проводят с учетом возможности управления влажностью среды путем подачи пара, аэрозолей, струй воды.

Выполненные исследования позволили расширить представления об особенностях возникновения и развития очагов самонагрева угля и выявить ряд новых факторов, которые способствуют повышению эффективности прогнозирования и профилактики эндогенных пожаров, за счет чего достигается снижение негативного воздействия угледобывающих предприятий на окружающую среду.

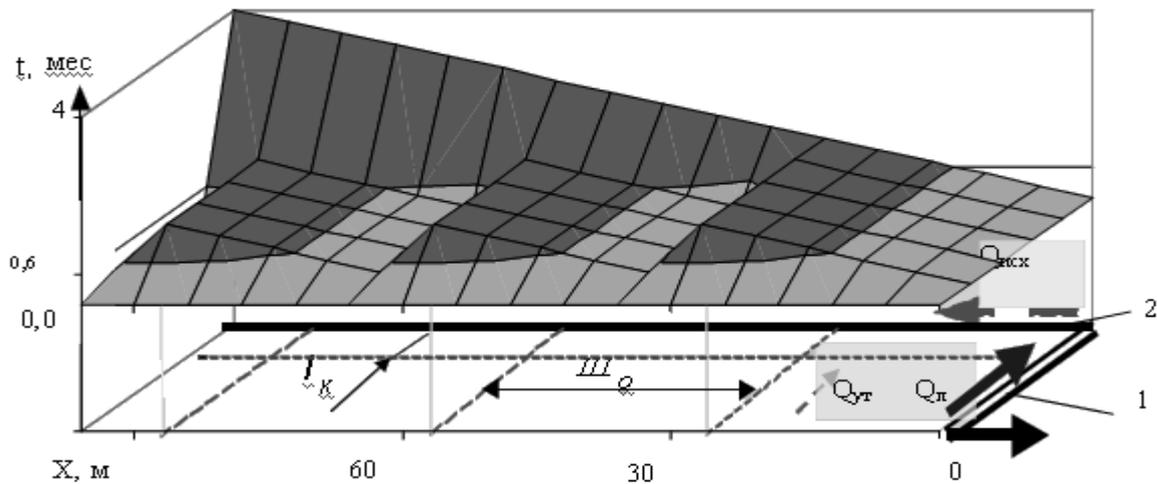


Рис. 4. Продолжительность (t) взаимодействия воздуха с оставленным в выработанном пространстве углем при отработке пласта лавой ($v_{оч} = 25 \text{ м·мес}^{-1}$), тип кровли A_2 ($Ш_0 = l_0 = 30 \text{ м}$; $l_k = 25 \dots 30 \text{ м}$) при прямоточной схеме проветривания и инкубационном периоде самовозгорания угля $t_{и} = 0,65 \text{ мес.}$; 1-лава; 2 - вентиляционная выработка, $Q_{л}$, $Q_{исх}$, $Q_{ут}$ -соответственно расход воздуха в лаве, в исходящей струе участка, утечки через выработанное пространство

© Костенко В.К. 2004

УДК 614.841

КАБЕРА А.Л. (ДонНТУ)

РАЗРАБОТКА НОВОГО ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО СПОСОБА ТУШЕНИЯ ВОЗГОРАНИЙ

Проанализированы результаты экспериментов, связанных с исследованием влияния электрического поля на пламя. Представлены полученные зависимости значений напряжения, которое приводит к гашению источника пламя.

В настоящее время является актуальной разработка принципиально нового способа предупреждения и тушения шахтных пожаров. Необходимо отметить, что пока не найден универсальный способ тушения пожаров разных классов, а современные средства пожаротушения не являются абсолютно безопасными для окружающей среды.

Исследования, связанные с возможностью тушения пожаров принципиально новым способом, проводятся в настоящее время в Донецком национальном техническом университете (ДонНТУ). Данный способ основан на влиянии электрического поля на пламя источника горения. Теоретические исследования в этой области начались в начале XX века и проводились профессором А.Э.Малиновским [1], но практического распространения и применения они не получили. Экспериментальные исследования, направленные на разработку нового способа тушения конвейерной ленты проводились в НИИГД [2].

Для изучения влияния электрического поля на пламя, в ДонНТУ была разработана и испытана специальная установка, представляющая собой два электрода, между которыми находится источник горения. На электроды подается высокое напряжение (порядка нескольких десятков кВ) и изучается поведение пламени в возникшем электрическом поле, а именно: фиксируется факт гашения пламени и напряжение, при котором было достигнуто гашение. На первом этапе исследований изучалось влияние вида электрического поля (постоянное или переменное), материала и формы электродов на эффективность гашения пламени [3]. Для опытов было изготовлено три вида электродов:

- 1) иглообразный остро заточенный электрод;
- 2) круглая плоская пластина;

3) пластина из диэлектрического материала с набором шипов, каждый из которых подключается отдельным проводом.