

д-р техн. наук Греков С.П. / Grekov S.P., Ph.D.¹
проф. д-р техн. наук Пашковский П.С. / prof. Pashkovskiy P.S.¹
инж. Всякий А.А. / Vsyakiy A.A., Eng.¹

Przyjęty/Accepted/Принята: 28.01.2016;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 25.11.2016;
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.12.2016;

Универсальный комплексный показатель эндогенной пожароопасности²

Universal Index of Endogenous Fire Hazards

Uniwersalny kompleksowy wskaźnik zagrożenia pożarem endogenicznym

АННОТАЦИЯ

Цель: Разработка универсального комплексного показателя эндогенной пожароопасности на основе математической модели самонагрева углей, лабораторных исследований их химической активности и анализа причин возникших эндогенных пожаров в шахтах за длительный период времени.

Методы: Основаны на теоретической модели кинетики гетерогенного окисления углей с переменной реакционной поверхностью, анализе более 200 мест и причин возникших эндогенных пожаров по 42 шахтопластам за 10-летний период.

Результаты: Выполнен анализ мест и причин возникновения эндогенных пожаров в угольных шахтах, проанализированы существующие критерии оценки склонности шахтопластов к самовозгоранию и показаны их недостатки. Предложено использовать математическую модель гетерогенного окисления углей с учетом испарения влаги и дросселирования метана для разработки комплексного показателя эндогенной пожароопасности. Показано, что существенное влияние на изменение температуры материала оказывают, кроме времени, константа реакции окисления, теплота дросселирования метана, газоносность пласта, константа скорости испарения влаги, теплота испарения влаги, значение критерия V_i и концентрация кислорода в угле. Концентрацию кислорода в угле определяют его природные характеристики – коэффициент внутренней диффузии, пористость, дробимость, фракционный состав, степень метаморфизма, а также концентрация кислорода на границе уголь – воздух. Получена зависимость для критерия пожароопасности с учетом выделения теплоты и теплоотдачи. Обоснованы параметры разделения шахт по группам пожароопасности на основе математической модели и данных о более 200 происшедших авариях. Даны зависимости для определения инкубационного периода самовозгорания, критического размера угольного скопления, порогового значения критерия оценки склонности углей к самовозгоранию.

Практическая значимость: Полученные зависимости рекомендуются для опытно-промышленного использования при определении эндогенной пожароопасности угольных пластов.

Выводы: Разработан новый комплексный показатель эндогенной пожароопасности, позволяющий по данным анализа проб угля в лабораторных условиях находить все необходимые его характеристики: критические размеры пожароопасного скопления, пороговые значения критерия оценки склонности к самовозгоранию, инкубационный период, группу пожароопасности.

Ключевые слова: самовозгорание, критическая температура, критическая толщина скопления, инкубационный период, группа эндогенной пожароопасности

Вид статьи: предварительный отчет

ABSTRACT

Aim: The purpose of this study is to develop a universal hazard indicator associated with spontaneous fires. Development of the proposed indicator is based on mathematical techniques and aligned to laboratory investigations of chemical activity and analysis of causes for the self-heating of coal and ultimately fires in coal mines, which have taken place over a period of many years.

Methods: The study made use of the theoretical kinetic model for heterogeneous oxidation of coal with variable reactionary surfaces, examined more than 200 locations and analysed causes of spontaneous fires, which occurred in 42 coal seams during a ten-year period.

Results: An analysis of locations and causes of spontaneous fires in coal mines was accompanied by a study of currently applied evaluation criteria for coal seam propensity to spontaneous combustion and identified limitations associated with such evaluations. The authors proposed the use of a mathematical model describing heterogeneous oxidation of coal exposed to the evaporation of moisture and supply restriction of

¹ Научно-исследовательский институт горноспасательного дела и пожарной безопасности «Респиратор», Донецк / The Respirator Scientific Research Institute of Mine-Work and Fire Safety, Donetsk; niigd@mail.ru;

² Процентное соотношение участия в подготовке статьи / Percentage contribution: Grekov S.P. – 40%, Pashkovskiy P.S. – 35%, Vsyakiy A.A. – 25%; Эту статью наградила Редакционный Совет / The article was recognised by the Editorial Committee;

methane to determine a complex indicator of a fire hazard. It was revealed that a significant influence on temperature change in materials, apart from time, is associated with oxidation constant, methane heat suppression, coal seam gas content, moisture loss rate constant, evaporation heat rate, value of the criterion Bi and oxygen concentration in coal. The oxygen content of coal is determined by its natural properties: oxygen coefficient of internal diffusion, porosity, brittleness, fractional composition, degree of metamorphism as well as concentration of oxygen on the coal surface. A relationship was identified for the fire hazard indicator with heat release and heat transfer. Additionally, the study confirmed parameters used to differentiate coal mines according to fire hazard groups with the use of mathematical models and more than 200 fire incident sources of data. Finally, the study revealed necessary influences, which determine the incubation period for spontaneous combustion, critical size of accumulated coal seams and critical threshold value for predicting the likelihood of self ignition of coal.

Practical value: Identified dependencies are recommended for use in the industry to recognise fire hazard levels associated with spontaneous combustion in coal deposits.

Conclusions: Developed a new complex indicator for endogenous fire hazards and, based on data from analysed coal samples in laboratory conditions, facilitated the definition of necessary coal characteristics: critical size of coal deposits clusters/dangerous accumulation of coal, threshold values for the estimation criterion of propensity for spontaneous combustion, incubation period and fire hazard group.

Keywords: spontaneous combustion, critical temperature, critical thickness of coal seams, incubation period, spontaneous combustion fire hazard group

Type of article: short scientific report

АБСТРАКТ

Cel: Opracowanie uniwersalnego i kompleksowego wskaźnika zagrożenia pożarem endogenicznym na podstawie modelu matematycznego samonagrzewania węgla, badań laboratoryjnych jego aktywności chemicznej oraz analizy przyczyn rzeczywistych pożarów endogenicznych w kopalniach, które miały miejsce na przestrzeni wielu lat.

Metody: Metody zostały oparte na modelu teoretycznym kinetyki heterogenicznego utlenienia węgla ze zmienną powierzchnią reakcyjną, analizie ponad 200 miejsc i przyczyn rzeczywistych pożarów endogenicznych 42 pokładów złoża węgla w okresie 10 lat.

Wyniki: Przeprowadzono analizę miejsc i przyczyn postawiania pożarów endogenicznych w kopalniach węglowych, przeanalizowano obecnie stosowane kryteria oceny skłonności złóż do samozapłonu i przedstawiono ich wady. Zaproponowano wykorzystanie modelu matematycznego heterogenicznej reakcji utleniania węgla z uwzględnieniem wyparowywania wilgoci i dławienia metanu w celu opracowania kompleksowego wskaźnika zagrożenia pożarem endogenicznym. Wskazano, że znaczny wpływ na zmianę temperatury materiału, poza czasem, mają konstanta reakcji utleniania, ciepło dławienia metanu, zawartość gazów w złożu, konstanta prędkości wyparowania wilgoci, ciepło parowania, wartość kryterium Bi i stężenie tlenu w węglu. Na wartość stężenia tlenu w węglu mają wpływ jego naturalne właściwości – współczynnik wewnętrznej dyfuzji, porowatość, kruchość, skład frakcyjny, stopień metamorfizmu, a także stężenie tlenu na granicy węgla-powietrze. Otrzymano zależność dla kryterium zagrożenia pożarowego z uwzględnieniem wydzielenia i oddawania ciepła. Uzasadniono parametry dla podziału kopalni na grupy zagrożenia pożarowego na podstawie modelu matematycznego i danych z ponad 200 rzeczywistych zdarzeń. Przedstawiono zależności potrzebne do określenia okresu inkubacyjnego samozapłonu, krytycznej wielkości pokładów węgla, granicznej wartości kryterium oceny skłonności węgla do samozapłonu.

Znaczenie praktyczne: Uzyskane zależności są rekomendowane do wykorzystania w przemyśle do określania stopnia zagrożenia pożarem endogenicznym złóż węgla.

Wnioski: Opracowano nowy kompleksowy wskaźnik zagrożenia pożarem endogenicznym, który na podstawie danych z analizy próbek węgla w warunkach laboratoryjnych, pozwala określić wszystkie charakterystyki węgla: krytyczną wielkość zagrożenia pożarem skupiska złoża węgla, progową wartość kryterium oceny podatności na samozapłon, okres inkubacyjny i grupę zagrożenia pożarowego.

Słowa kluczowe: samozapłon, temperatura krytyczna, krytyczna grubość złóż, okres inkubacyjny, grupa zagrożenia pożarem endogenicznym

Typ artykułu: doniesienie wstępne

1. Введение

Пожароопасность скопления отбитого от массива угля в шахтах определяется его размером, физико-химическими свойствами и условиями в местах его скопления. На достоверность прогноза пожароопасности указывает обоснованный её показатель, являющийся критерием оценки опасности самовозгорания углей в шахте. В качестве таких показателей в настоящее время используют потери угля, размер угольных скоплений, отношение теплоты, израсходованной на нагревание угля, к общему её объему, выделившемуся при окислении, и другие параметры.

Чаще всего авторы исследовали отдельные параметры пожароопасности. Так, в работе [1] получена корреляционная зависимость между количеством эндогенных пожаров и критической температурой самовозгорания углей. В работе [2] найдена зависимость количества эндогенных пожаров от скорости тепловыделения из угля. В статье [3] исследована зависимость количества пожаров от энергии активации угля. Исследовались также влияние на пожароопасность химической активности углей, фракционного состава, влажности, дробимости, удельной реакционной поверхности и пр. [4]. Проведенные исследования позволили получить зависимости для

определения группы пожарной опасности угольных пластов [5], обосновать критерии оценки склонности углей к самовозгоранию и предложить меры по предупреждению эндогенных пожаров в угольных шахтах [6].

При выполнении исследований условий и причин самовозгорания углей использовали различные математические модели, позволяющие установить важные критерии течения процесса нагревания угля при некоторых типичных условиях, возникающих в шахтах.

Одними из первых работ, описывающими механизмы самовозгорания угля, были работы акад. А.А. Скочинского и проф. В.С. Веселовского, в которых приведены экспериментальные исследования процессов адсорбции углями кислорода, определен тепловой баланс при их самонагревании, даны количественные оценки факторов самонагревания и предложен основной показатель склонности угля к самовозгоранию – скорость его окисления, положенная в основу сорбционного метода Института горного дела им. А.А. Скочинского.

В 90-х годах XX в. НИИГД предложен метод определения склонности углей к самовозгоранию путем нахождения некоторого показателя, комплексно учитывающего физико-химические и механические свойства углей.

Комплексный параметр получен на основании предложенной математической модели самонагрева угля в виде теплового баланса для некоторого его скопления [1]. В математической модели учтены реакционная поверхность угля, теплота реакции окисления, константа скорости реакции, зависящая от температуры, энергия активации, концентрация кислорода, время, критическая температура самовозгорания.

Критерий оценки склонности углей к самовозгоранию – это время, и назван он пороговым значением C_n , с. Выполнены расчеты значений C_n по 34 шахтам. Сопоставление полученных значений C_n с количеством пожаров показало, что между ними существует тесная связь. Увеличение значения C_n соответствует уменьшению пожароопасности. Недостатком предложенной математической модели – в том, что не учтена теплоотдача от скопления угля в окружающую среду, это дает несколько заниженные результаты.

В работе [7] предложен другой подход к определению динамики температуры самовозгорающегося угля и времени достижения им критического значения на основе математического описания процесса сорбции кислорода углем и его нагревания. Совместное решение этих уравнений и последующее моделирование процесса позволило выявить параметры, незначительно и существенно влияющие на самонагревание.

Было установлено, что концентрация углерода в угле a_0 мало изменится по мере его окисления. Адсорбционные процессы протекают более интенсивно, чем тепловые, в силу чего можно принять, что концентрация кислорода в твердой фазе $a(T) = a_0 = \gamma c_{ст}$ (где γ – константа Генри; $c_{ст}$ – концентрация O_2 в порах угля в газовой фазе на уровне насыщения, равная концентрации в омывающем уголь воздухе, моль/м³).

Выполненные исследования позволили разработать и внедрить в 2000 году руководящий документ «Склонность к самовозгоранию угля, шахтных пород и отходов углеобогащения. Методика определения».

За прошедшее время в НИИГД выполнены работы по изучению сорбционных процессов в газонасыщенных угольных скоплениях, условий образования пожароопасных угольных скоплений при ведении горных работ и другие, позволившие предложить комплексный показатель пожароопасности, учитывающий новые данные о самовозгорании углей.

Целью работы является создание универсального комплексного показателя эндогенной пожароопасности на основе математической модели самонагрева угля, лабораторных исследований его химической активности и анализа причин возникших эндогенных пожаров в шахтах за длительный период времени, позволяющего найти группу пожароопасности, минимальный размер скопления угля и инкубационный период с учетом его влажности и дросселирующего эффекта охлаждения за счет выделения метана.

2. Теоретические и экспериментальные исследования

Используем предложенную в работе [8] на основании теоретических исследований [9] математическую модель самовозгорания органических материалов за счет химических реакций окисления в виде

$$T = T_0 \left\{ 1 + \Gamma_T \sum_{k=1}^{\infty} B_k \frac{1 - \exp\left[-\left(\mu_k^2 - \Gamma_T\right) \cdot F_0\right]}{\mu_k^2 - \Gamma_T} \right\}, \quad (1)$$

где T_0, T – начальная и текущая температуры угля, К;

Γ_T – комплексный критерий генерации и отвода теплоты, определяемый зависимостью

$$\Gamma_T = \Gamma_{T1} - \Gamma_{T2} - \Gamma_{T3}, \quad (2)$$

$$\Gamma_{T1} = \frac{\xi a_c a_{O_2} q k m^2}{\rho c_v T_0 a}; \quad \Gamma_{T2} = \frac{q_{др} J_M m^2}{\rho c_v T_0 a}; \quad \Gamma_{T3} = \frac{a_c a_B k_B w m^2}{\rho c_v T_0 a}; \quad (3)$$

где

ξ – доля реакционной поверхности, принимающей участие в окислении угля;

a_C^* – концентрация углерода в угле, моль/м³;

a_{O_2} – концентрация кислорода в угле, моль/м³;

q – теплота реакции окисления, Дж/моль;

k – константа скорости окисления угля, м³/(с·моль);

m – толщина скопления угля, м;

ρ – плотность угля, кг/м³;

c_v – удельная теплоемкость угля, Дж/(кг·К);

a – коэффициент температуропроводности угля, м²/с;

$q_{др}$ – теплота дросселирования метана, Дж/моль;

J_M – скорость выделения метана, моль/(м³·с), определяемая зависимостью

$$J_M = \frac{G}{t_n}, \quad (4)$$

G – газоносность пласта, моль/м³;

t_n – пороговое время самовозгорания угля, равное $3 \cdot 10^6$ с;

k_B – константа скорости испарения влаги, м³/(с·моль);

q_B – теплота испарения влаги, Дж/моль;

w – концентрация влаги в угле, моль/м³;

F_0 – критерий Фурье, определяемый по формуле

$$F_0 = at / m^2; \quad (5)$$

t – время, с;

μ_k^2 – корни уравнения [9];

$$\operatorname{tg} \mu = -\frac{1}{\operatorname{Bi} - 1} \mu; \quad (6)$$

Bi – критерий $\operatorname{Bi} = am/\lambda$;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

λ – коэффициент теплопроводности угля, Вт/(м·К);

B_k – коэффициенты уравнения [10].

Из анализа выражений (1) – (5) следует, что существенное влияние на изменение температуры материала T оказывают, кроме времени t , константа реакции окисления k , теплота дросселирования метана $q_{др}$, газоносность пласта G , константа скорости испарения влаги k_B , теплота испарения влаги q_B , критерий Bi и концентрация кислорода в угле a_{O_2} . Концентрацию кислорода в угле определяют его природные характеристики – коэффициент внутренней диффузии D , пористость, дробимость, фракционный состав, степень метаморфизма, а также концентрация кислорода на границе уголь – воздух $C_{ст}$.

Влияние химической активности угля k на процесс его самонагрева подробно изучено ранее [10]. Значения k изменяются для различных углей не более чем на один порядок. Теплота дросселирования метана $q_{др}$ изучалась в работе [11], константа скорости испарения влаги k_B в работе [12].

Как показали исследования [8], с достаточной для практических целей точностью, возможно, ограничить-

ся одним членом суммы в уравнении (1) и одним корнем μ . Величины Bi , как правило, менее 1, что позволяет использовать связь $\mu^2=3Bi$ [9].

Для случая $Bi = 0$ выражение (1) примет вид

$$\ln \frac{T}{T_0} = \Gamma_T F_0. \tag{7}$$

Подставляя в (7) выражения (3) и (5), получим

$$\ln \frac{T}{T_0} = \left[\frac{\xi a_c^* a_{O_2} q k}{\rho c_v T_0} - \frac{q_{др} J_M}{\rho \tilde{n}_v T_0} - \frac{a_c^* q_b k_b w}{\rho c_v T_0} \right] \frac{m^2}{a} \frac{a}{m^2} t, \tag{8}$$

откуда

$$t = \ln \frac{T}{T_0} \frac{\rho c_v T_0}{a_c^* \left(a_{O_2} q k - q_{др} J_M / a_c^* - q_b k_b w \right)}. \tag{9}$$

$B = \frac{1}{A}$

Из анализа (8) следует, что, так как величины m^2 и a , стоящие в числителе и знаменатели этого выражения, сокращаются, то в случае отсутствия теплообмена изменение температуры с изменением времени не зависит от размеров скопления самоокисляющегося органического материала и являются функцией только комплексного параметра A .

Для случая наличия теплообмена между скоплением самовозгорающегося материала и окружающей средой сделаем некоторые математические преобразования в уравнении (1), полагая $\mu^2=3Bi$.

$$\frac{T}{T_0} = 1 + \frac{1 - [\exp(\Gamma_T F_0)]^b}{b}, \tag{10}$$

$$\text{где } b = \frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1, \tag{11}$$

откуда

$$\Gamma_T F_0 |_{Bi \neq 0} = - \frac{\ln \left[- \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \frac{1}{b} \right) b \right]}{b}. \tag{12}$$

Используя явное выражение для $\Gamma_T F_0$ и разрешая уравнение (10) относительно t , получим:

$$t |_{Bi \neq 0} = \frac{\ln \left[- \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \frac{1}{b} \right) b \right]}{b} \frac{\rho c_v T_0}{a_c^* \left(\xi a_{O_2} q k - q_{др} J_M / a_c^* - q_b k_b w \right)}. \tag{13}$$

\bar{t} B

где $T = T_{кр}$ – критическая температура самовозгорания.

Из сравнения (13) и (9) нетрудно видеть, что при $b = 1$ (когда $Bi = 0$) выражение (13) переходит в (9).

Доля реакционной поверхности угля, вступающей в реакцию окисления ξ , находится согласно зависимости, приведенной в [8].

$$\xi = -7,24 \cdot 10^{-6} (\nu^T)^2 + 2,99 \cdot 10^{-4} \nu^T + 3,76 \cdot 10^{-3}, \tag{14}$$

где V^T – доля летучих горючих в угле, %.

Из сказанного следует, что параметр \bar{t} является комплексным и полностью определяет инкубационный период t (с точностью до множителя B) при наличии теплообмена скопления материала с окружающей средой.

Выражение (13) при $B = \text{const}$ определяется величиной $\bar{t} = f \left(\frac{T_{кр}}{T_0}, b \right)$.

Функция \bar{t} имеет четыре характерные точки, которые в дальнейшем будут использованы при определении группы пожароопасности шахтопластов:

- $\bar{t} = \ln \frac{T_{кр}}{T_0}$ при $b = -1$, когда генерация теплоты значительно превышает теплоотвод, т.е. $3Bi/\Gamma_T \rightarrow 0$;
- $\bar{t} = \frac{T_{кр}}{T_0}$ при $b = 0$, когда генерация теплоты равна теплопотерям, т.е. $3Bi = \Gamma_T$;
- $\bar{t} = -\ln \frac{T_{кр}}{T_0} \left(2 - \frac{T_{кр}}{T_0} \right)$ при $b = 1$, когда теплопотери в 2 раза превышают генерацию теплоты;

$$\bar{t} \rightarrow \infty \text{ при } b = 1 / \left(\frac{T_{кр}}{T_0} - 1 \right), \text{ т.е. } \frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1 = 1 / \left(\frac{T_{кр}}{T_0} - 1 \right). \tag{15}$$

Для наглядности и с целью ее графического использования при определении инкубационного периода самовозгорания угля зависимости \bar{t} при различных $T_{кр}/T_0$ и b представлены на рис. 1.

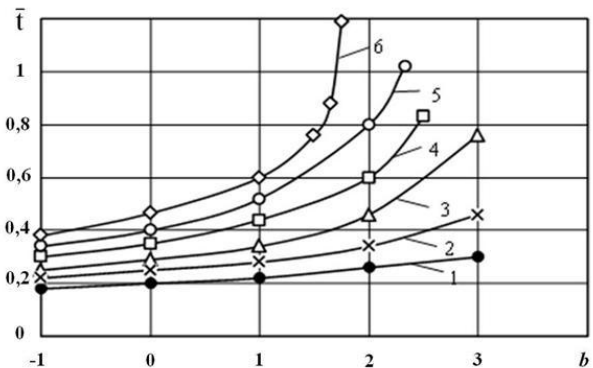


Рис. 1. Зависимости комплексного показателя пожароопасности \bar{t} от b при различных $\frac{T_{кр}}{T_0}$

1 –●– 1,1; 2 – x – 1,25; 3 – Δ – 1,3; 4 – □ – 1,35; 5 – ○ – 1,4; 6 – ◇ – 1,45

Fig. 1. Dependences of the complex fire danger index \bar{t} versus b at various $\frac{T_{кр}}{T_0}$

1 –●– 1,1; 2 – x – 1,25; 3 – Δ – 1,3; 4 – □ – 1,35; 5 – ○ – 1,4; 6 – ◇ – 1,45

Источник: Собственная разработка.
Source: Own elaboration.

С целью выяснения влияния эффекта дросселирования метана из угля и его влажности на инкубационный период самовозгорания t было выполнено моделирование функции t без наличия и с использованием параметров $q_{др}$ и w для нескольких шахт, представленное в таблице 1.

Из данных табл. 1 следует, что при найденных в лабораторных условиях характеристиках угля $T_{кр}$ и отношениях притока и уноса теплоты комплексный учет этих параметров критерием \bar{t} показывает не столь суще-

Таблица 1. Сравнение инкубационного периода самовозгорания угля, рассчитанного с учетом и без учета влияния дросселирующего эффекта его охлаждения и влажности

Table 1. Comparison of the incubation period of spontaneous combustion of coal calculated with the account and without the account of throttling effect of its cooling and humidity

Шахта, символ пласта (Mine, symbol of the seam)	Газоносность пласта, (Gas content of the seam) $G,$ $\frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$ $\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right)$	Влажность пласта (Humidity of the seam) $W,$ $\frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$ $\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right)$	Комплексный критерий (Complex criterion) \bar{t}		Инкубационный период $t_{\text{инк}}, \text{сут}$ (Incubation period $t_{\text{инк}},$ days)	
			С учётом теплов. (Taking into account the heat emission) q	С учётом (With the account) $q, q_{\text{др}}, w$	С учётом теплов. (Taking into account the heat emission) q	С учётом (Taking into account) $q, q_{\text{др}}, w$
«Северная», I ₃ /“Severnaya”	540	974,7	0,20	0,2	13	14
«Северная», м ₃ /“Severnaya”	1134	1928	0,42	0,47	21	27
«Комсомолец», I ₃ /“Komsomolets”	1084	1155	0,22	0,22	12	13
Им. А.Ф. Засядько, м ₃ / A.F. Zasyadko mine	1188	1083	0,33	0,36	25	28
Им. Г.Г. Капустина, м ₃ / G.G. Kapustin mine	918	1516,2	0,11	0,12	13	16
«Александровская», I ₁ / “Aleksandrovskaya”	540	2310	0,29	0,30	17	19
«Булавинская», I ₁ / “Bulavinskaya”	810	2238	0,31	0,36	23	26

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

ственное их влияние, направленное, как и предполагалось, в сторону увеличения \bar{t} и инкубационного периода самовозгорания. Это, однако, дает возможность более верно рассчитать инкубационный период самовозгорания, что существенно для практического пользования.

Известно, что самовозгорание угля – это процесс, связанный с условиями накопления и рассеивания теплоты в его скоплениях.

Анализ мест и причин эндогенных пожаров, выполненный в работе [1], показывает, что наибольшее количество самовозгораний угля связано со слоевыми скоплениями, образующимися в результате обрушения угольных пачек и пропластков. Поэтому первой задачей при определении пожароопасности угольного скопления является определение его критического (наименьшего) размера, при котором самовозгорание еще возможно.

Такие исследования были начаты еще в 50 – х годах прошлого столетия В.М. Маевской, затем в 70 – х проводились в МакНИИ [13] и позднее в 80-х – 90-х во ВНИИГД [1]. Во всех работах нахождение критического размера пожароопасного скопления угля основано на решении дифференциальных уравнений теплового баланса стационарного процесса теплопередачи и получены выражения в явном виде. Критические значения скопления угля в них даны как функции, зависящие от критической температуры самовозгорания, теплопроводности угля, скорости окисления, концентрации кислорода.

Принятая автором [1] модель позволила найти критические размеры скопления угля по 42 шахтопластам за 10-летний период, и подтвердилась ее верность. Тем не менее модель не учитывает теплоотдачу, что ограничивает её использование.

Из анализа функции \bar{t} (формула 13), как было сказано выше, следует, что ее критическое значение наступает при $\frac{3\text{Vi}}{\Gamma_{\tau}} - 1 = \frac{T_0}{T_{\text{сп}} - T_0}$.

Поэтому используем из (8) выражения для $\Gamma_{\tau} = A \frac{m^2}{a}$ и зависимость $\text{Vi} = \frac{a}{\lambda} m$ из (6) и найдем формулу для m с учетом (13) в виде

$$m = \frac{T_{\text{кр}} - T_0}{T_{\text{кр}}} \frac{3aa}{\lambda} \frac{\rho c_{\nu} T_0}{a_c^* \left(\xi a_{\text{O}_2} qk - q_{\text{др}} J_{\text{M}} / a_c^* - q_{\text{В}} k_{\text{В}} w \right)}. \quad (16)$$

Полученная зависимость позволяет по данным о теплофизических свойствах самовозгорающегося материала (угля и пр.) и коэффициентам теплоотдачи найти минимальный размер его скопления, подтвержденного самовозгоранием.

Для выяснения взаимосвязи комплексного критерия пожароопасности \bar{t} с размером угольного скопления, количеством эндогенных пожаров и инкубационным периодом самовозгорания, а также определения группы пожароопасности обратимся к данным [1] по более чем 200 проанализированным случаям самовозгорания углей с различными видами слоевых скоплений. Эти скопления были обусловлены наличием в непосредственной близости от разрабатываемого пласта в кровле или почве пропластков угля или углистого сланца, попадающих при выемке пласта в зону обрушения пород; выемкой пласта не на полную мощность по техническим соображениям; геологическими нарушениями пласта в виде утолщений, при которых его выемка на полную мощность практически невозможна; нарушениями в виде надвигов, сбросов, проходных очистными работами. В выработанных пространствах пластов крутого падения, имеющих в почве слабые, неустойчивые, склонные к сползанию породы, происходит обрушение целиков угля, а также завалы лав. При этом выемка обрушенного угля была практически невозможна.

Исследования слоевых скоплений углей заключались в проведении комплекса шахтных и лабораторных экспериментов, что позволило рассчитать значение критиче-

ской толщины угольных скоплений.

Результаты определения критических размеров угольных скоплений на ряде шахт Донбасса приведены в таблице 2.

Анализ данных, приведенных в таблице 2, показывает,

что эндогенные пожары происходят, как правило, в сло-евых скоплениях углей, размером выше критического. На 42 обследованных шахтопластах за 10 лет произошло 272 эндогенных пожара. При этом 236 пожаров, т.е. 96%, произошло на тех 36 шахтопластах, где фактический раз-

Таблица 2. Параметры угольных скоплений, их критические размеры, инкубационный период самовозгорания и комплексный показатель пожароопасности

Table 2. Parameters of coal accumulations, their critical dimensions, incubation period of the spontaneous combustion and complex endogenous fire hazard index

Шахта (Mine)	Символ пласта (Symbol of the seam)	Газоносность пласта, (Gas content of the seam) G, $\frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$ $\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right)$	Влажность пласта, (Humidity of the seam) W, $\frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$ $\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right)$	Толщ. скопл. угля, (Thickness of coal accumulation) t, м		Компл. парам. (Comp-lex parame- ter) t	Инкуб. период $t_{\text{инк}}$ сут (Incuba- tion period), ($t_{\text{инк}}$ days)	Колич. эндо-генных пожаров за 10-летний период (Number of endoge-nous fires for the 10-year period), N	Группа пожароопасности (Fire hazard group)
				Фактическая (Factual)	Критическая (Critical)				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
«Северная» (“Severnaya”)	l ₃	540	975	0.65	0.11	0.19	14	3	I
«Комсомолец» (“Komsomolets”)	l ₃	1026	1155	0.95	0.10	0.22	13	10	I
Им. А.Ф. Засядько (A.F. Zasyadko mine)	m ₃	1188	1083	0.3	0.16	0.33	28	3	III
Им. Г.Г. Капустина (G.G. Kapustin mine)	m ₃	918	1516	0.35	0.12	0.11	16	29	I
«Александровская» (“Aleksandrovskaya”)	l ₁	540	2310	0.4	0.13	0.29	19	3	II
«Булавинская» (“Bulavinskaya”)	l ₁	810	2238	0.25	0.15	0.32	26	5	III
Им. В.И. Ленина (V.I. Lenin mine)	l ₄	1161	1227	0.4	0.17	0.29	26	1	II
	l ₃	1134	1516	0.8	0.16	0.20	21	8	I
	l ₇ ¹	1080	1733	0.4	0.21	0.32	33	5	III
	k ₄ ¹	972	939	0.3	0.17	0.33	30	2	III
Им. Ю.А. Гагарина (Yu.A. Gagarin mine)	m ₂	432	3538	0.6	0.22	0.27	30	1	II
«Комсомолец Донбасса» (“Komsomolets Donbassa”)	l ₃	1620	1516	0.95	0.22	0.25	29	10	II
	l ₄	1242	1805	0.6	0.11	0.22	15	15	I
Им. М.И. Калинина (M.I. Kalinin mine)	l ₅	1080	2094	0.8	0.17	0.24	23	4	II
	k ₇	1242	866	0.4	0.17	0.29	25	1	II
	k ₇	1242	866	0.4	0.13	0.22	18	12	I
Им. К.А. Румянцева (K.A. Rumyantsev mine)	l ₈	702	2816	0.5	0.17	0.28	25	1	II
	l ₅	702	2238	0.55	0.18	0.27	25	2	II
	l ₃	702	1877	0.6	0.19	0.27	26	5	II
«Александр-Запад» (“Aleksandr-Zapad”)	l ₃	1026	1300	0.5	0.07	0.17	9	15	I
«Торецкая» (“Toretskaya”)	k ₂ ^н	324	2960	0.3	0.20	0.40	36	1	III
Им. XXV съезда КПСС (The XXVth Congress of the Communist Party of the Soviet Union mine)	k22	918	1300	0.5	0.20	0.28	30	2	II
Им. Ильича (Ilyitch mine)	l21	378	967	0.3	0.16	0.32	27	1	III
«Вергилевская» (“Vergilevskaya”)	l4	621	1805	0.3	0.10	0.29	15	1	II
Им. И.В. Чеснокова (I.V. Chesnokov mine)	l8	459	1661	0.45	0.18	0.28	28	3	II
«Бутовка-Донецкая» (“Butovka-Donetskaya”)	n1	594	4260	0.4	0.14	0.26	20	2	II

Им. А.Ф. Засядько (A.F. Zasyadko mine)	m3	1215	1155	0.35	0.15	0.29	22	3	II
	l1	864	1444	0.5	0.17	0.27	25	4	II
«Красногвардейская» (“Krasnogvardeyskaya”)	l1	810	1300	0.4	0.17	0.28	25	13	II
«Святителя Василия Великого» (“Basil the Great prelate”)	l7	421,1	9314	0.4	0.14	0.15	17	14	I
«Кураховская» (“Kurakhovskaya”)	k8	594	7220	0.3	0.08	0.15	10	7	I
«Новодруженская» (“Novodruzhenskaya”)	kH8	486	8592	0.29	0.08	0.15	10	15	I
«Кременная» (“Kremennaya”)	kH8	594	6715	0.35	0.13	0.19	17	8	I
	l11	675	8447	0.3	0.15	0.30	23	2	III
«Никанор-Новая» (“Nikanor-Novaya”)	l4	648	505	0.3	0.08	0.21	11	2	I
Им. Артема (Artyem mine)	l12	810	1588	0.35	0.09	0.21	13	17	I
«Углегорская» (“Uglegorskaya”)	l1	675	1805	0.35	0.07	0.19	9	16	I
«Булавинская» (“Bulavinskaya”)	l1	810	2455	0.35	0.08	0.23	11	5	II
Им. К. Маркса (K.Marx mine)	kH4	1080	2166	0.4	0.12	0.27	17	1	II
«Юнком» („Yunkom“)	k8	1134	1300	0.5	0.10	0.23	13	1	II
«Северная» (“Severnaya”)	l3	756	3682	0.65	0.14	0.20	18	3	I
«Александровская» (“Aleksandrovskaya”)	l1	540	2310	0.4	0.06	0.17	8	16	I

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

мер угольных скоплений превышает критический. Это свидетельствует о достоверности результатов, полученных при расчетах критических размеров слоевых скоплений углей.

Взаимосвязь количества происшедших пожаров N с комплексным показателем пожароопасности \bar{t} по всем анализированным случаям представлена на рис. 2.

Из представленных данных следует, что имеется определенная связь количества пожаров от \bar{t} , причем с увеличением \bar{t} оно снижается по зависимости

$$N = 0,09\bar{t}^{-2,7} \quad (17)$$

Данные рис. 2 свидетельствуют о том, что большинство пожаров произошло при значении комплексного показателя пожароопасности $\bar{t} < 0,22$ (75%), около 20% при \bar{t} от 0,22 до 0,3 и около 5% при \bar{t} от 0,3 до 0,4. С учетом ранее выполненных исследований [14] на основании приведенных результатов предлагается следующее подразделение шахтопластов по эндогенной пожароопасности по группам в зависимости от комплексного показателя \bar{t} :

I – особо опасные шахтопласты (участки), $\bar{t} \leq 0,22$;

II – пожароопасные пласты (участки), $0,2 < \bar{t} \leq 0,3$;

III – малоопасные пласты (участки), $0,3 < \bar{t} \leq 0,4$.

Предлагаемая градация шахтопластов не противоречит нормативному документу [14] и легко может быть выполнена на практике с определением в лабораторных условиях характеристик угля и принимая размеры угольного скопления в шахтах, подверженных самовозгоранию.

Зависимость $N = f(\bar{t})$ имеет две характерные точки:

- \bar{t}_{1-2} – на границе зон I и II, характеризующих категорию пожароопасности;
- \bar{t}_{2-3} – на границе зон II и III, характеризующих категорию пожароопасности.

Точки \bar{t}_{1-2} и \bar{t}_{2-3} имеют аналитический вид

$$\bar{t}_{1-2} = \frac{t_{кр}}{T_0} - 1, \bar{t}_{2-3} = -\ln\left(2 - \frac{T_{кр}}{T_0}\right)$$

Средние значения $T_{кр}$ на границе зон I-II и II-III, найденные экспериментально, которые представлены

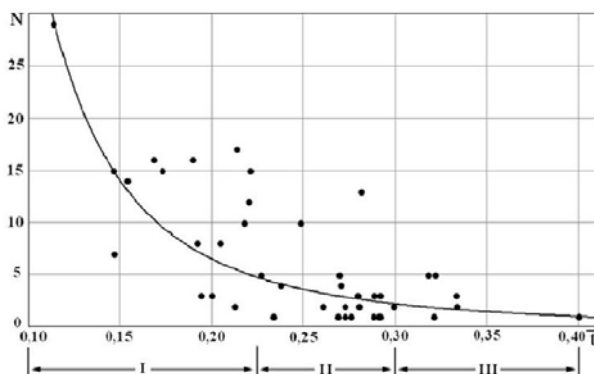


Рис. 2. Зависимость количества пожаров от комплексного показателя пожароопасности и группы пожароопасности шахтопластов (участков)

Fig. 2. Dependence between the number of fires and the complex fire hazard index

and fire hazard group of the seam

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

в таблице 2 для точек \bar{t}_{1-2} и \bar{t}_{2-3} , составляют значения $\bar{t}_{1-2} = 366$ К и $\bar{t}_{2-3} = 372$ К, т.е. несколько увеличиваются с ростом параметра \bar{t} .

Используя полученную связь \bar{t} с $T_{кр}$ возможно ориентировочно, имея только лабораторные данные о критической температуре самовозгорания угля, без других данных найти группу пожароопасности пластов, уточнив ее после получения дополнительных данных о химической активности углей, а также размерах и условиях образования их скоплений в шахте. Например, при $T_{кр} = 350$ К; $T_0 = 300$ К, имея $(T_{кр} / T_0) - 1 = 0,17$, согласно графику (рис. 2), группа пожароопасности определим как I.

При определении склонности углей к самовозгоранию в настоящее время используется некоторый критерий t_n , измеряемый единицами времени и названный автором [1] пороговым, при превышении которого предполагается, что угольные пласты будут не склонны к самовозгоранию.

В приведенных нами исследованиях пороговое время составляет безразмерную величину $\bar{t}_n = 0,4$, выше которой не было ни одного пожара. Чтобы сравнить его с применяемым в настоящее время, достаточно его умножить на среднее значение параметра B в уравнении (13). Тогда получим значение $t_n \approx 8 \cdot 10^6$ с, что в 2 раза больше используемого в настоящее время и должно служить запасом расчета.

Следующим параметром пожароопасности является инкубационный период самовозгорания угля. Согласно настоящим исследованиям он находится умножением комплексного параметра \bar{t} на значение B , характерное для каждого угля. В исследованных нами случаях он равнялся от 16 до 30 суток (см. табл. 2).

Аббревиатура

T_0, T	начальная и текущая температуры угля	К
Γ_T	комплексный критерий генерации теплоты, определяемый зависимостью	-
ξ	доля реакционной поверхности, принимающей участие в окислении угля	-
a_C^*	концентрация углерода в угле	моль/м ³
a_{O_2}	концентрация кислорода в угле	моль/м ³
q	теплота реакции окисления	Дж/моль
k	константа скорости окисления угля	м ³ /(с·моль)
m	толщина скопления угля	м
ρ	плотность угля	кг/м ³
c_v	удельная теплоемкость угля	Дж/(кг·К)
a	коэффициент температуропроводности угля	м ² /с
$q_{др}$	теплота дросселирования метана	Дж/моль
J_m	скорость выделения метана	моль/(м ³ ·с)
G	газоносность пласта	моль/м ³
t_n	пороговое время самовозгорания угля	с
k_v	константа скорости испарения влаги	м ³ /(с·моль)
q_v	теплота испарения влаги	Дж/моль
w	концентрация влаги в угле	моль/м ³
F_0	критерий Фурье, определяемый по формуле	-
t	время	с
μ_k^2	корни уравнения [10]	-
Bi	критерий $Bi = am/\lambda$	-
α	коэффициент теплоотдачи	Вт/(м ² ·К)
λ	коэффициент теплопроводности угля	Вт/(м·К)
B_k	коэффициенты уравнения [10]	-

3. Апробация

Для апробации предлагаемого комплексного параметра эндогенной пожароопасности было выполнено сравнение всех величин, которые согласно ему определяются, с данными, найденными по руководящему документу [14]. Результаты расчетов приведены в таблице 2 и позволяют заключить:

- предлагаемый данным расчетом критический размер угольного скопления несколько меньше, ранее рекомендованного, что дает запас расчета;
- пороговое значение критерия оценки склонности углей к самовозгоранию больше ранее найденных [1], что свидетельствует о запасе его расчета;
- предлагаемое к расчету значение инкубационного периода самовозгорания угля несколько больше определяемой согласно руководящему документу [14], что дает возможность шахтам для маневра при разработке угольных пластов;
- рассчитываемая по предлагаемой методике группа пожароопасности шахтопластов (участков) находится в основном в тех же пределах, что и найденная согласно [14].

4. Выводы

В результате исследований разработан новый комплексный показатель эндогенной пожароопасности органического материала, названный универсальным, который позволяет по данным анализа проб угля в лабораторных условиях находить все необходимые его характеристики: критический размер пожароопасного скопления, пороговое значение критерия оценки склонности к самовозгоранию, инкубационный период, группу пожароопасности. Предлагаемый показатель не противоречит существующим, а уточняет методы определения параметров эндогенной пожароопасности.

Литература

- [1] Pashkovskiy P.S., *Endogennyye pozhary na ugolnykh shakhtakh*, Knowledge, Donetsk 2013, 791.
- [2] Grekov S.P., Pashkovskiy P.S., Orlikova V.P. *Teplovoe okisleniye ugley i endogennaya pozharoopasnost'*, „Ugol Ukrainy” 2014, 10, 46-50.
- [3] Grekov S.P., Pashkovskiy P.S., Golovchenko Ye.A., *Energiya aktivatsii ugley i endogennaya pozharoopasnost'*, „Gornospasatel'noye delo” 2015, 51, 78-87.
- [4] Pashkovskiy P.S., Grekov S.P., Zinchenko I.N. *Aktualnyye voprosy bor'by s samovozgoraniyem uglya*, Arpi, Donetsk 2012, 656.
- [5] Grekov S.P., Pashkovskiy P.S., Zinchenko I.N., Golovchenko Ye.A., *Opredeleeniye grupy pozharoopasnosti plastov*, „Ugol Ukrainy” 2008, 8, 25-26.
- [6] Pashkovskiy P.S., Levnin N.B., *Mery po preduprezhdeniyu pozharov v ugolnykh shakhtakh*, „Naukovyy visnyk Ukr.” 2002, 2, 55-62.
- [7] Grekov S.P., Kalyuskiy A.Ye., Baklan V.V., Koshovskiy B.I., *Neizotermicheskaya adsorbtsiya veshchestva sfericheskimi mikroporistym zernom, soprovozhdayemaya khimicheskimi reaktsiyami vtorogo poryadka*, „Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii” 1998, 32(2), 122-125.
- [8] Pashkovskiy P.S., Grekov S.P., Cygankiewicz Ya., Shaytan I.A., *Opredeleeniye sklonnosti ugley k samovozgoraniyu*, „Gornospasatel'noye delo” 2000, 10-16.
- [9] Lykov A.V., *Teoriya teploprovodnosti*, Vysshaya shkola, Moskva 1997, 599.
- [10] Grekov S.P., Kalyuskiy A.Ye., Koshovskiy B.I., *Vliyaniye dinamiki khemosorbtsii kisloroda uglyami na ikh sklonnost k samovozgoraniyu*, „Gornospasatel'noye delo” 1995, 21-28.
- [11] Grekov S.P., Orlikova V.P., Vsyakiy A.A., *Okhlazhdeniye uglya za schyet drosselirovaniya vydelyayushchegosya metana*, „Gornospasatel'noye delo” 2013, 60, 97-106.
- [12] Pashkovskiy P.S., Grekov S.P., Zinchenko I.N., *Vliyaniye kineticheskoy aktivnosti i vlazhnosti uglya na protsess samovozgoraniya*, „Gornospasatel'noye delo” 2007, 44, 17-25.
- [13] Saranchuk V.I., Bayev Kh.A. *Endogennyye pozhary na ugolnykh shakhtakh*, Nedra, Moskva 1976, 150.
- [13] Rukovodstvo po preduprezhdeniyu i tusheniyu endogennykh pozharov na ugolnykh shakhtakh Ukrainy KD 12.01.402, Donetsk 2000, 216.

* * *

Греков Святослав Павлович – доктор технических наук, член-корреспондент Международной академии наук высшей школы, Начальник научно-исследовательского отдела борьбы с эндогенными пожарами в шахтах и на породных отвалах, специалист в области тепломассопереноса в горных выработках и пористых средах.

Пашковский Петр Семенович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, первый заместитель директора НИИГД «Респиратор», основатель научной школы борьбы с пожарами на угольных шахтах.

Всякий Александр Александрович – инженер, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела борьбы с эндогенными пожарами в шахтах и на породных отвалах НИИГД «Респиратор».

