

УДК 622.822.22

## Критические параметры самовозгорания угля

Приведено теоретическое обоснование размеров скопления угля, подверженного самовозгоранию, и его инкубационного периода. Определены значения критической толщины скопления угля с учетом теплообмена с окружающей средой. Проведен сравнительный анализ значений инкубационного периода самовозгорания угля, полученных по известному и предлагаемому методам.

**Ключевые слова:** самовозгорание, критическая температура, критическая толщина скопления, инкубационный период.

**Контактная информация:** orlikova.69@yandex.ru

Известно, что эндогенные пожары происходят не постоянно, а эпизодически либо не возникают совсем. Это может быть связано с низкой химической активностью углей или благоприятными условиями для отвода теплоты, образуемой при их окислении. Отсюда необходимость разработки методов определения условий, в которых скопления угля не повышают эндогенную пожароопасность.

Самовозгорание угля – процесс, связанный с условиями накопления и рассеивания теплоты в скоплении угля. Генерация теплоты вследствие поглощения кислорода углем происходит во всем объеме скопления, а отвод теплоты – через поверхность. Следовательно, возможность самовозгорания угля зависит от соотношения между объемом скопления угля и площадью его поверхности.

Практически это подтверждает самовозгорание только относительно большого скопления угля. Анализ мест и причин эндогенных пожаров, выполненный в работе [1], показывает, что наибольшее количество самовозгораний связано со слоевым скоплением, образующимся в результате обрушения угольных пачек и пропластков. Поэтому при определении пожароопасности угольного скопления прежде всего нужно определить его критическую (наименьшую) толщину, при которой самовозгорание еще возможно.

Самовозгорание скоплений угля, толщина которых выше критической, происходит только в том случае, когда генерация теплоты превышает ее потери. Граница безопасной в пожарном отношении ситуации создается при условии, что температура в скоплении угля стабилизируется в пределах критического значения и выше не поднимается. Это соответствует стационарному процессу, когда генерация теплоты равна ее теплоотводу. Определив экспериментальную критическую температуру самовозгорания угля и константу скорости его окисления при критической температуре, можно вычислить критическую толщину



**П. С. ПАШКОВСКИЙ,**  
доктор техн. наук



**С. П. ГРЕКОВ,**  
доктор техн. наук



**В. П. ОРЛИКОВА,**  
инж.

слоевого скопления, опасного по самовозгоранию.

В работе [1] сделано предположение, что отвод теплоты от скопления угля происходит путем теплопроводности, с учетом чего уравнение теплового баланса для стационарного процесса сформулировано в виде

$$\frac{d^2 T}{dy^2} = qk \bar{C} / \lambda; \quad \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0} = \alpha (T - T_0) / \lambda, \quad (1)$$

где  $T_0$  и  $T$  – начальная и текущая температура в скоплении угля, К;  
 $y$  – пространственная координата, м;  
 $q$  – теплота реакции окисления угля, Дж/м<sup>3</sup>;  
 $k$  – константа скорости окисления угля, с<sup>-1</sup>;  
 $\bar{C}$  – среднее значение объемной доли кислорода в угольном скоплении, %;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности угля, Вт/(м·К).

Предположив, что значение  $\lambda/\alpha$  при скоростях воздуха, соответствующих фильтрационным утечкам через выработанное пространство, весьма незначительно, выражение для критической толщины скопления угля получено в виде

$$m_{кр} = \sqrt{2\lambda(T_{кр} - T_0)/(qk\bar{C}\rho)}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – средняя плотность угля, кг/м<sup>3</sup>.

Использование данной модели с оговоренными ограничениями позволило установить критические толщины скоплений угля по 46 шахтопластам за 10-летний период, где произошло около 50 пожаров, и подтвердить правильность модели. Вместе с тем, как видно из выражения (2), это решение не учитывает теплоотдачу, которая присутствует в постановке задачи (вторая из формул (1)), что сужает использование модели.

Целесообразно также в постановке задачи учесть время самовозгорания угля, чтобы одновременно определить инкубационный период самовозгорания. Поэтому предлагаем модель, позволяющую более точно вычислить критическую толщину скопления угля  $m_{кр}$  и установить время достижения углем критической температуры самовозгорания, т. е. инкубационный период.

**Цель** исследования – теоретическое обоснование минимальной толщины скопления угля, подверженного самовозгоранию, и его инкубационного периода.

Используем предложенную в работе [2] на основании теоретических исследований [3] математическую модель самовозгорания материалов за счет химических реакций окисления в виде

$$T = T_0 \left\{ 1 + \Gamma_T \sum_{k=1}^{\infty} B_k [1 - \exp(-(\mu_k^2 - \Gamma_T) Fo)] / (\mu_k^2 - \Gamma_T) \right\}, \quad (3)$$

где  $\Gamma_T$  – комплексный критерий генерации теплоты, определяемый зависимостью

$$\Gamma_T = [\xi a_C^* a_{O_2} qk / (\rho c_V T_0)] (m^2/a); \quad (4)$$

$\xi$  – доля реакционной поверхности угля, принимающей участие в окислении;

$a_C^*$  и  $a_{O_2}$  – концентрации углерода и кислорода в угле, моль/м<sup>3</sup>;

$k$  – константа скорости окисления угля, м<sup>3</sup>/(моль·с);

$c_V$  – теплоемкость угля при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

$m$  – толщина скопления угля, м;

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$Fo$  – критерий Фурье, определяемый по формуле

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

$t$  – время, с;

$B_k$  – коэффициенты, определяемые из уравнения [4]

$$B_k = 6Bi^2 / [\mu_k^2 (\mu_k^2 + Bi^2 - Bi)];$$

$Bi$  – критерий теплообмена,

$$Bi = \alpha m / \lambda; \quad (6)$$

$\mu_k$  – корни уравнения  $\text{tg } \mu = -[\mu / (Bi - 1)]$  [4].

Из анализа выражений (3) – (5) следует, что существенное влияние на изменение температуры угля оказывают, кроме времени, константа скорости окисления, значение критерия  $Bi$  и концентрация кислорода. 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.

Влияние химической активности угля  $k$  на процесс его самонагревания подробно изучен [5]. Значения  $k$  изменяются для различных углей не более чем на один порядок.

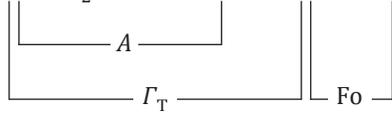
Как показали исследования [2], с достаточной для практических целей точностью можно ограничиться одним членом суммы в уравнении (3) и одним корнем  $\mu$ . Значения  $Bi$ , как правило, менее единицы, что позволяет использовать зависимость  $\mu^2 = 3Bi$  [4].

Для случая  $Bi = 0$  выражение (3) примет вид

$$\ln(T/T_0) = \Gamma_T Fo. \quad (7)$$

Подставляя в уравнение (7) выражения (4) и (5), получим

$$\ln(T/T_0) = [\xi a_c^* a_{O_2} q k / (\rho c_V T_0)] (m^2/a) (a/m^2) t, \quad (8)$$



откуда, принимая  $t = t_{\text{инк}}$ , время инкубационного периода

$$t_{\text{инк}} = \ln(T/T_0) [\rho c_V T_0 / (\xi a_c^* a_{O_2} q k)]. \quad (9)$$

Поскольку величины  $m^2$  и  $a$  (в числителе и знаменателе формулы (8)), сокращаются, то изменение температуры во времени при  $Bi = 0$  не зависит от размеров скопления самоокисляющегося органического материала и является функцией только комплексного параметра  $A$ .

Для случая наличия теплообмена между скоплением самовозгорающегося материала и окружающей средой сделаем некоторые математические преобразования в уравнении (3), приняв  $\mu^2 = 3Vi$ :

$$T/T_0 = 1 + \{[1 - \exp((\Gamma_T Fo)^{-b})]/b\}, \quad (10)$$

где  $b = 3Vi/\Gamma_T - 1$ .

Из выражения (10) следует, что динамика температуры скопления материала, подверженного самонагреванию, зависит от двух безразмерных параметров:  $\Gamma_T Fo = \ln(T_{кр}/T_0)$ , характеризующего температуру угля при  $Bi = 0$ , и  $b$  – определяющего приток  $\Gamma_T$  и отток  $Vi$  теплоты. Здесь  $T_{кр}$  – критическая температура самовозгорания угля.

Используя выражение для  $\Gamma_T Fo$  и решая уравнение (10) относительно  $t$ , получим

$$t_{\text{инк}} |_{Bi \neq 0} = - \left\{ \frac{\ln[-b((T_{кр}/T_0 - 1 - 1/b))/b]}{(\rho c_V T_0) / (\xi a_c^* a_{O_2} q k)} \right\}. \quad (11)$$

Сравнивая уравнения (9) и (11), видим, что при  $b = 1$  ( $Bi = 0$ ) выражение (11) приобретает вид уравнения (9). Таким образом, параметр  $b$  определяет значение  $t_{\text{инк}}$  (с точностью до множителя  $B$ ) при теплообмене скопления угля с окружающей средой.

Выражение (11) при  $Bi = \text{const}$  определяет значением  $t = f(T_{кр}/T_0, b)$ . Функция  $\bar{t}$  имеет четыре характерные точки:

$$\begin{aligned} \bar{t} &= \ln(T_{кр}/T_0) \text{ при } b = -1; \quad \bar{t} = T_{кр}/T_0 - 1 \text{ при } b = 0; \\ \bar{t} &= -\ln(2 - T_{кр}/T_0) \text{ при } b = 1; \quad \bar{t} \rightarrow \infty \text{ при } b = 1/(T_{кр}/T_0 - 1), \end{aligned}$$

$$\text{т. е.} \quad 3Vi/\Gamma_T - 1 = 1/(T_{кр}/T_0 - 1). \quad (12)$$

Графическое использование зависимости  $\bar{t}$  при различных  $T_{кр}/T_0$  и  $b$  для определения инкубационного периода самовозгорания угля показано на рис. 1.

Используя формулы (6) и (8) для  $Vi$  и  $\Gamma_T$ , из формулы (12) найдем уравнение для толщины скопления материала:

$$\begin{aligned} m &= 3(a/\lambda)aB/\{1 + 1/[(T_{кр}/T_0) - 1]\} = \\ &= [(T_{кр} - T_0)/T_{кр}] \cdot 3(a/\lambda)\rho c_V T_0 / (\xi a_c^* a_{O_2} q k). \quad (13) \end{aligned}$$

Полученная зависимость позволяет по данным о теплофизических свойствах самовозгорающегося материала (в частности, угля) и коэффициентам теплоотдачи определить минимальную толщину его скопления, подверженного самовозгоранию.

Используем установленные в работе [5] согласно Методике [6] значения параметра  $a = 0,072$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) для некоторых углей и константы скорости окисления в диапазоне  $5 \cdot 10^{-9} \dots 25 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/(моль·с) [1]. Примем наибольшие и наименьшие значения отношений критических температур самовозгорания угля к начальным равными 1,17...1,35;  $\lambda = 0,3$  Вт/(м·К);  $a = 1,7 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Произведя вычисления по формуле (13), получим значение основных параметров углей (табл. 1), из анализа данных которой

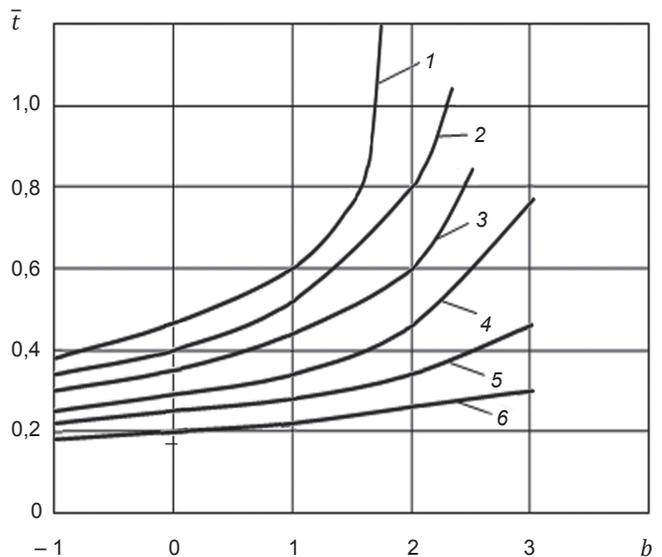


Рис. 1. Зависимость  $\bar{t}$  от  $b$  при различных  $T_{кр}/T_0$ : 1 -  $T_{кр}/T_0 = 1,45$ ; 2 -  $T_{кр}/T_0 = 1,4$ ; 3 -  $T_{кр}/T_0 = 1,35$ ; 4 -  $T_{кр}/T_0 = 1,3$ ; 5 -  $T_{кр}/T_0 = 1,25$ ; 6 -  $T_{кр}/T_0 = 1,1$ .

Таблица 1

Параметр	$T_{кр}/T_0 = 350/300$ при $k \cdot 10^9, \text{ м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$				$T_{кр}/T_0 = 400/300$ при $k \cdot 10^9, \text{ м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$			
	5,2		20		5,2		20	
	$\xi$	0,009	0,003	0,009	0,003	0,009	0,003	0,009
$A \cdot 10^7, \text{ с}^{-1}$	0,38	0,12	1,45	0,48	0,38	0,12	1,45	0,48
$B \cdot 10^{-6}, \text{ с}$	26,5	79,5	6,9	20,7	26,5	79,5	6,9	20,7
$m, \text{ м}$	0,43	1,3	0,11	0,34	0,86	2,5	0,23	0,67
$\Gamma_T$	0,05	0,14	0,01	0,04	0,2	0,54	0,05	0,15
$Bi$	0,1	0,3	0,02	0,08	0,2	0,58	0,07	0,16
$b$	5,0	5,4	5,2	5,0	2,0	2,2	3,2	2,2
$\bar{t}$	0,43	0,42	0,39	0,43	0,54	0,60	0,69	0,6
$t_{инк}  _{Bi=0}, \text{ СУТ}$	47	141	12	36	88	264	22	69
$t_{инк}  _{Bi \neq 0}, \text{ СУТ}$	109	392	30	102	168	552	55	143

следует, что для различных углей критическая толщина их скоплений  $m$ , подверженных самовозгоранию, составляет 0,1–2,5 м, а инкубационный период самовозгорания – от нескольких суток (при малых  $m$ ) до года и более (при больших  $m$ ).

Для каждого вида углей с конкретными параметрами окисления и размерами скопления инкубационный период может быть рассчитан по формуле (11). Для удобства расчетов

значение  $t$  можно определить из рис. 1 по значениям  $\Gamma_T$  и  $Bi$ .

Чтобы сравнить полученные по предлагаемой методике результаты с данными работы [1], рассчитаем критическую толщину скопления самовозгорающегося угля для некоторых шахт по данным табл. 2.

Долю реакционной поверхности угля, вступающей в реакции окисления  $\xi$ , находим

Таблица 2

Шахта; символ пласта	$V^r, \%$	$k \cdot 10^9, \text{ м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$	$T_{кр}/T_0$	$\xi$	$A \cdot 10^7, \text{ с}^{-1}$	$B \cdot 10^{-6}, \text{ с}$	$\Gamma_T$	$Bi$	$b$	$\bar{t}$	Толщина слоевых скоплений угля, м			$t_{инк}, \text{ сут}$	
											фактическая	критическая		$Bi = 0$	$Bi \neq 0$
												по работе [1]	по настоящему расчету		
«Северная»; $l_3$	25	22,8	358/300	0,007	1,73	5,78	0,43	0,16	0,09	0,20	0,65	0,29	0,12	12	13
«Северная»; $m_3$	21	15,1	388/297	0,007	2,32	4,31	0,05	0,05	1,64	0,42	0,2	0,44	0,12	13	21
«Комсомолец»; $l_3$	33	24,8	366/298	0,006	2,12	4,72	1,12	0,23	-0,40	0,22	0,95	0,29	0,11	11	12
Им. А. Ф. Засядько; $m_3$	35	6,95	385/307	0,005	1,53	6,55	0,08	0,07	1,67	0,33	0,30	0,31	0,16	17	25
Им. Г. Г. Капустина; $m_3$	27	18,0	327/298	0,007	1,02	9,79	0,07	0,08	2,42	0,11	0,35	0,21	0,11	10	13
«Александровская»; $l_1$	9	16,0	380/300	0,006	1,99	5,03	0,19	0,10	0,54	0,29	0,40	0,33	0,13	14	17
«Булавинская»; $l_1$	9	15,2	366/298	0,006	1,58	6,32	0,06	0,06	2,09	0,31	0,25	0,23	0,14	15	23

согласно зависимости, приведенной в работе [7]:

$$\xi = -7,24 \cdot 10^{-6} (V^r)^2 + 2,99 \cdot 10^{-4} V^r + 3,76 \cdot 10^{-3},$$

где  $V^r$  – массовая доля летучих веществ в угле, %.

Из анализа представленных в табл. 2 данных следует, что параметры теплообмена угля с окружающей средой влияют на его инкубационный период самовозгорания и критические значения толщины скопления угля, которые во всех анализируемых случаях несколько ниже, чем полученные в работе [1].

**Выводы.** Дано теоретическое обоснование критической толщины скопления угля, подверженного самонагреванию, и его инкубационного периода, основанное на реакции окисления поверхности угля и процессах теплообмена. На конкретных примерах показано, что использование предложенного метода позволяет более точно определить пожаробезопасные размеры скоплений угля и рассчитать инкубационный период самовозгорания за счет соотношения параметров генерации теплоты и его отдачи в окружающую среду.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пашковский П. С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П. С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 791 с.
2. Пашковский П. С. Определение склонности углей к самовозгоранию / П. С. Пашковский, С. П. Греков, Я. Я. Цыганкевич, И. А. Шайтан // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2000. – С. 10–16.
3. Греков С. П. Неизотермическая адсорбция вещества сферическим микропористым зерном, сопровождаемая химическими реакциями второго порядка / С. П. Греков, А. Е. Калюсский, В. В. Баклан, Б. И. Кошовский // Теоретические основы химической технологии. – 1998. – Т. 32, № 2. – С. 122–125.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1997. – 599 с.
5. Греков С. П. Влияние динамики хемосорбции кислорода углями на их склонности к самовозгоранию / С. П. Греков, А. Е. Калюсский, Б. И. Кошовский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 1995. – С. 21–28.
6. Методика определения коэффициентов теплоотдачи. – Донецк: ИФГП НАНУ, 2013. – 12 с.
7. Греков С. П. Особенности низкотемпературного окисления углей и их пожароопасность / С. П. Греков, А. А. Всякий, В. П. Орликова // Уголь Украины. – 2015. – № 7–8. – С. 51–54.

## ПО МАТЕРИАЛАМ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ УКРАИНЫ» ПРОШЛЫХ ЛЕТ

Год 1974

В журнале № 12 в статье Я. П. Гущина, А. М. Костина, А. Н. Тузикова «Новый рекорд проходчиков на шахте «Должанская-Капитальная» описано, что в феврале 1974 г. бригада проходчиков была переведена на шахту «Должанская-Капитальная». Пятилетний план завершен бригадой 1 октября 1974 г. С начала пятилетки производительность труда возросла на 41 %. За три года и 9 месяцев девятой пятилетки бригадой пройдено 9579 м выработок при плане 6094 м; выполнен объем строительно-монтажных работ на сумму 5,1 млн руб. и благодаря сокращению срока строительства получена экономия 471,7 тыс. руб.; достигнута производительность труда одного проходчика 7,8 м в месяц.

За 9 мес. 1974 г. пройдено 9202 м<sup>3</sup> околоствольных выработок. Уровень выполнения норм составил 137 %, производительность труда 2,04 м<sup>3</sup> на выход, что в 2,2 раза превышает среднюю выработку по комбинату.

За высокие достижения в труде 23 члена бригады награждены орденами и медалями, 10 – знаками «Шахтерская слава».