

УДК 622.822.225

Греков Святослав Павлович, доктор технических наук
Пашковский Петр Семенович, доктор технических наук
Всякий Александр Александрович, инженер
НИИГД «Респиратор», г. Донецк

КОМПЛЕКСНЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНОСТИ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ

Проанализированы существующие критерии оценки эндогенной пожароопасности. Выполнен анализ мест и причин возникновения эндогенных пожаров в угольных шахтах. Предложено использовать математическую модель гетерогенного окисления каменных углей с учетом испарения влаги и дросселирования метана для разработки комплексного показателя эндогенной пожароопасности.

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

Основная часть. На способность каменного угля к тепловому самовозгоранию влияет кинетика процесса окисления, параметры, характеризующие структуру и теплофизические свойства угля, а также условия теплообмена между угольным скоплением и окружающей средой. Физико-химические свойства угля влияют на его склонность к самонагреванию и предопределяют опасность развития процесса, а условия нахождения скопления угля и его теплообмена с окружающей средой определяют возможность возникновения пожара, т.е. его пожароопасность.

При исследовании самовозгорания угля в шахтах определены качественные характеристики отдельных факторов пожароопасности угольных скоплений, способствующих повышению вероятности их самовозгорания. Известно, что опасность возникновения эндогенного пожара возрастает в местах нарушения залегания пластов, резкого изменения толщины, при низкой скорости подвигания очистных забоев, активных утечках воздуха через выработанное пространство и т.д. В работе [1] авторами доказано, что уголь некоторых пластов обладает крайне высокой химической активностью и самовозгорается даже при благоприятных условиях залегания и разработки. Другие угли, имеющие

низкую химическую активность, самовозгораются только при крайне неблагоприятных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Наиболее изученными являются методы количественной оценки эндогенной пожароопасности угольных пластов [1, 2]. Один из этих методов позволяет установить категорию опасности выемочного поля (участка) или шахтопласта и выявить условия, от которых зависит повышенная эндогенная пожароопасность отдельных участков. Этот метод включает в себя отдельные горно-геологические и технологические факторы пожароопасности, их значимость и суммарную оценку с учетом показателя весомости каждого фактора.

В методе комплексной количественной оценки эндогенной пожароопасности учитывают следующие группы факторов.

- Склонность угля к самовозгоранию:

S_c – объемная доля серы в угле, %;

A^c – зольность угля, мас. %;

V^r – марка угля (объемная доля летучих веществ), %;

D – коэффициент диффузии кислорода в поры угля, $\text{м}^2/\text{с}$.

- Геологические условия залегания пласта:

H – толщина пласта, м;

Π_b – плотность выемки угля (наличие нерабочих пластов-спутников).

- Условия эксплуатации пласта:

v – скорость подвигания очистного забоя, м/мес;

Q – расход воздуха, подаваемого в забой, $\text{м}^3/\text{с}$;

Γ – наличие междуэтажных целиков;

B – схема проветривания;

M – способ отбойки угля;

Y – способ управления горным давлением.

Вышеизложенный метод, основан на анализе более 100 эндогенных пожаров в угольных шахтах, в нем предложено подразделять выемочные поля (участки) и шахтопласты по пожароопасности на 4 группы:

I группа – весьма пожароопасные участки, комплексный показатель пожароопасности K_0 превышает 0,5;

II группа – пожароопасные участки, комплексный показатель пожароопасности находится в пределах от 0,3 до 0,5;

III группа – умеренно пожароопасные участки, комплексный показатель пожароопасности находится в пределах от 0,1 до 0,3;

IV группа – не пожароопасные участки, комплексный показатель пожароопасности не превышает 0,1.

Эти данные с небольшими видоизменениями вошли в руководящий документ [2]. К недостатку метода относится трудоемкость вычислений.

В работе [3] предложен более простой метод деления шахт по пожарной опасности, в котором на основании статистических исследований определяют влияние взаимосвязанных факторов на

интенсивность возникновения эндогенных пожаров, межпожарный период и вероятность возникновения пожаров. Это позволяет для каждой шахты определить группу пожароопасности шахтопласта.

При проведении статистических исследований выявлено, что за время использования метода в значительной степени изменились: глубина разработки угольных пластов и их газоносность – возросли; толщина разрабатываемых пластов – как правило, снизилась; длина очистного забоя – возросла. Кроме того, существующая методика группирования шахтопластов по пожарной опасности не учитывает влияния потерь угля в геологических нарушениях, являющихся одним из существенных факторов вероятности возникновения эндогенных пожаров. Поэтому в 2008 г. была предложена другая методика, которая позволяет определять интенсивность возникновения эндогенных пожаров на основании физических предпосылок, рассчитывать вероятность возникновения эндогенных пожаров и группировать шахтопласти по пожарной опасности [4].

Рассмотренные методы позволяют найти только одну характеристику – группу пожароопасности. Определение другого комплексного параметра, отражающего способность углей к самовозгоранию – склонность к самовозгоранию, проводят по другим методам.

Цель настоящей работы – разработка комплексного показателя пожароопасности каменного угля, позволяющего одновременно определять склонность к самовозгоранию, группу пожароопасности, инкубационный период и пороговое значение критерия склонности на основе ранее предложенной модели низкотемпературного окисления органических материалов, полученного ее решения и экспериментальных данных о эндогенных пожарах за длительный период времени, собственных и литературных данных о свойствах пожароопасных органических материалов.

Проанализировав и обобщив материалы по углям с различными физико-химическими свойствами, их химической активностью, критическими температурами самовозгорания, а также результатов исследований мест возникновения эндогенных пожаров, размеров и их количества, условий теплоотдачи, предложено использовать математическую модель гетерогенного окисления углей для разработки комплексного показателя эндогенной пожароопасности каменных углей.

Используя приведенное в работе [5] решение задачи самонагревания органического материала за счет химических реакций окисления его кислородом воздуха, и учитывая выделение метана и испарение влаги будем иметь:

$$t|_{Bi \neq 0} = -\frac{\ln \left[-\left(\frac{T_{kp}}{T_0} - 1 - \frac{1}{\Gamma_v} \right) \Gamma_v \right]}{\Gamma_v} \cdot \frac{\rho c_v T_0}{a_c^* (\xi c_{O_2} q_1 k_{kp} - q_{dp} J_m - q_b k_b W)} \quad (1)$$

где t – время, с;

T_0 и T_{kp} – начальная и критическая температуры материала, К;

Γ_v – критерий генерации и отвода тепла, имеющий вид

$$\Gamma_v = \frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1, \quad (2)$$

Bi – критерий теплообмена Био, равный

$$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda}, \quad (3)$$

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

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

Γ_T – комплексный критерий генерации и отвода тепла

$$\Gamma_T = \frac{1}{B} \frac{r^2}{a}, \quad (4)$$

ξ – доля реакционной поверхности, вступающей в реакции окисления;

C_{O_2} – концентрация кислорода в материале, моль/м³;

q_1 – теплота реакции окисления, Дж/моль;

k_{kp} – константа скорости окисления, с⁻¹;

ρ – плотность материала, кг/м³;

c_v – теплоемкость материала при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

r – радиус скопления материала, м;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

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

J_m – интенсивность выделения метана, моль/(м³·с), равная

$$J_m = \frac{G}{t_n}, \quad (5)$$

G – газоносность пласта, моль/м³;

t_{Π} – пороговое время самовозгорания угля, принимают равным $3 \cdot 10^6$ с;

k_v – константа скорости испарения влаги, с⁻¹;

q_v – теплота испарения влаги, Дж/моль;

W – концентрация влаги в угле, моль/м³.

В выражение (1) параметр \bar{t} учитывает величину Γ_v , характеризующую тепловыделение Γ_t из скопления самонагревающегося органического материала и теплоотвод B_i , а также соотношение критической T_{kp} и начальной T_0 температуры материала. Эти величины полностью характеризуют физико-химические свойства и параметры скопления органического материала. Поэтому параметр \bar{t} можно считать обобщенным комплексным показателем склонности материалов к самовозгоранию.

Для выяснения влияния величин Γ_v и T_{kp}/T_0 на изменение комплексного показателя \bar{t} воспользуемся данными об угле – одному из органических веществ, для которого имеется обширный экспериментальный материал [1] по более чем 200 проанализированным случаям самовозгорания 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, проходимых 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 скоплений угля заключались в проведении комплекса шахтных и лабораторных экспериментов, что позволило рассчитать значение критической величины пожароопасного скопления угля, результаты определения которого на ряде шахт Донбасса приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры угольных скоплений, их критические размеры, инкубационный период самовозгорания и комплексный показатель пожароопасности

Шахта	Символ	V , %	$k_{kp} \cdot 10^3$, c^{-1}	T_{kp} , К	ξ	$J_m \cdot 10^4$, моль/ m^3	W , моль/ m^3	Велич. скопл.		\bar{t}	t , сут	Кол-во эндоген. пожаров, N	Группа эндоген. пож-ти
								факт., R_{kp}	крит., R_{kp}				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
«Северная»	l_3	25	2,82	358	0,0067	1,93	975	0,65	0,11	0,195	8,2	3	I
«Комсомолец»	l_3	33	3,07	366	0,0057	3,86	1212	0,95	0,10	0,218	11,4	10	I
Им. А.Ф. Засядько	m_3	35	2,97	385	0,0054	4,21	1071	0,3	0,16	0,427	24,1	3	III
Им. Г.Г. Капустина	m_3	27	1,88	327	0,0066	3,602	1661	0,35	0,12	0,096	5,0	29	I
«Александровская»	l_1	9	2,0	380	0,0059	2,083	2489	0,40	0,13	0,326	18,3	3	II
«Булавинская»	l_1	9	1,89	366	0,0059	3,17	2446	0,25	0,15	0,341	19,8	5	III
Им. В.И. Ленина	l_4	32	0,50	373	0,0059	4,127	1218	0,40	0,17	0,319	21,7	1	II
	l_3	29	1,59	360	0,0063	4,091	1527	0,80	0,16	0,201	10,3	8	I
	l_2^1	28	1,17	375	0,0065	3,869	1733	0,40	0,21	0,296	15,7	5	II
	k_4^1	21	1,39	374	0,0068	3,584	966	0,30	0,17	0,319	15,8	2	II
Им. Ю.А. Гагарина	m_2	25	1,20	373	0,0067	1,545	3533	0,60	0,22	0,254	12,6	1	II
«Комсомолец Донбасса»	m_3	26	2,0	373	0,0066	6,063	1584	0,95	0,22	0,239	11,9	10	II
	l_3	33	3,07	366	0,0057	4,648	1886	0,60	0,11	0,231	12,2	15	I
Им. М.И. Калинина	l_5	20	0,64	370	0,0068	3,979	2154	0,80	0,17	0,238	13,7	4	II
	l_4	19	1,81	375	0,0068	4,826	940	0,40	0,17	0,290	14,7	1	II
	k_7	17	1,49	360	0,0068	4,826	940	0,40	0,13	0,228	12,1	12	I
Им. К.А. Румянцева	k_7	18	0,93	375	0,0068	2,598	2910	0,50	0,17	0,277	14,8	1	II
	l_8	20	1,42	375	0,0068	2,569	2287	0,55	0,18	0,265	12,8	2	II
	l_5	22	2,04	375	0,0068	2,594	1937	0,60	0,19	0,258	11,8	5	II
	l_3	23	1,41	375	0,0068	2,586	2451	0,70	0,20	0,255	12,5	-	-
«Александр-Запад»	l_1	10	1,98	352	0,0060	3,840	1358	0,50	0,07	0,186	10,0	15	I
	l_3	14	1,31	371	0,0065	4,262	1591	0,20	0,13	0,542	30,8	-	-

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
«Торецкая»	l_4	32	0,92	380	0,0059	1,176	3000	0,30	0,20	0,407	24,2	1	III
«Победа»	h_8^1	33	3,87	370	0,0057	1,159	1298	0,22	0,15	0,345	16,0	-	-
	k_2^h	34	3,21	357	0,0056	1,730	1436	0,20	0,13	0,284	14,1	-	-
Им. XXV съезда КПСС	k_2^2	26	2,47	373	0,0066	3,377	1335	0,50	0,20	0,259	11,8	2	II
Им. Ильича	l_2^1	20	0,73	374	0,0068	1,399	1000	0,30	0,16	0,338	18,4	1	III
«Вергилевская»	l_4	9	2,07	380	0,0059	2,430	1972	0,30	0,10	0,389	22,0	1	III
Им. И.В. Чеснокова	l_8	30	1,73	372	0,0062	1,681	1698	0,45	0,18	0,269	13,7	3	II
«Бутовка-Донецкая»	n_1	38	1,26	370	0,0047	2,144	4294	0,40	0,14	0,313	22,8	2	II
Им. А.Ф. Засядько	l_1	34	2,83	373	0,0056	3,124	1458	0,50	0,17	0,267	14,0	4	II
«Красногвардейская»	l_1	32	2,24	372	0,0059	2,879	1290	0,40	0,17	0,277	14,0	13	II
«Святителя Василия»	l_7	38	1,83	340	0,0047	1,624	10026	0,40	0,14	0,156	11,9	14	I
«Кураховская»	k_8	41	1,0	340	0,0038	2,149	7294	0,30	0,08	0,198	19,2	7	I
«Новодруженская»	k_8^H	42	1,33	340	0,0035	1,741	8594	0,29	0,08	0,208	21,0	15	I
«Кременная»	k_8^H	38	1,69	350	0,0047	2,153	6794	0,35	0,13	0,210	14,9	8	I
	l_1^1	40	1,67	370	0,0041	2,442	8535	0,30	0,15	0,487	40,4	2	III
«Никанор-Новая»	l_4	9	2,63	360	0,0059	2,536	552	0,30	0,08	0,253	13,7	2	II
Им. Артема	l_2^1	13	2,69	360	0,0064	2,862	1567	0,35	0,09	0,225	10,0	17	I
«Углегорская»	k_7^1	7	2,48	368	0,0055	4,771	1936	0,40	0,09	0,273	16,2	-	-
	l_1	8	9,90	355	0,0057	2,667	1999	0,35	0,07	0,204	9,1	16	I
«Булавинская»	l_1	8	1,89	366	0,0057	3,299	2792	0,35	0,08	0,286	17,9	5	II
Им. К. Маркса	k_4^H	14	1,83	375	0,0065	4,074	2282	0,40	0,12	0,291	14,8	1	II
«Юнком»	k_8	10	3,0	370	0,0060	4,319	1382	0,50	0,10	0,254	12,9	1	II
«Северная»	l_3	20	2,82	358	0,0068	2,708	3683	0,65	0,14	0,194	8,2	3	I
«Александровская»	l_1	9	2,0	350	0,0059	1,935	2311	0,40	0,06	0,184	9,6	3	I

Анализ данных, приведенных в таблице 1, показывает, что эндогенные пожары происходят, как правило, в скоплениях углей, имеющих величину выше критической. На 46 обследованных шахтопластах за 10 лет произошло 244 эндогенных пожара. При этом 236 пожаров, т.е. 96 %, произошло на тех 36 шахтопластах, где фактическая величина угольных скоплений превышают критические. Взаимосвязь числа произошедших пожаров N с предлагаемым комплексным показателем склонности угля к самовозгоранию \bar{t} по всем анализированным случаям представлена на рисунке 1.

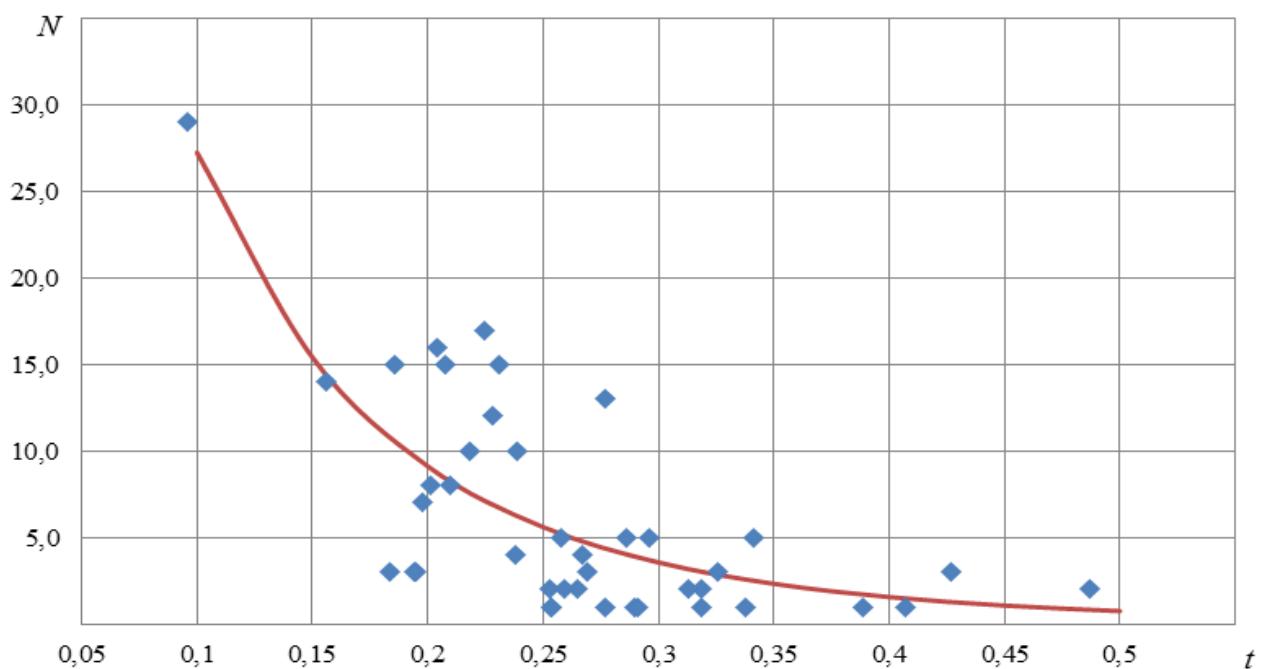


Рис. 1. Зависимость числа эндогенных пожаров N от комплексного показателя пожароопасности \bar{t} и группы пожароопасности

Из представленных данных следует, что имеется определенная связь между числом пожаров и величиной \bar{t} , причем с увеличением \bar{t} количество пожаров снижается и может быть описано зависимостью

$$N = 0,57(\bar{t} + 0,46)^{-6,65}. \quad (6)$$

Так как при получении зависимости (6) были использованы данные лабораторных исследований углей и фактические данные о произошедших с ними пожарах в шахтах при самых различных горно-геологических условиях и горнотехнических факторах, определяющих пожароопасность

разработки пластов, то предлагаемый показатель \bar{t} можно считать показателем не только склонности, но и пожароопасности пластов.

Данные рис. 1 свидетельствуют о том, что большинство пожаров (68,4 %) произошло при значении комплексного показателя пожароопасности $\bar{t} \leq 0,23$, 26,6 % при \bar{t} от 0,23 до 0,33 и 5 % при \bar{t} от 0,33 до 0,53.

С учетом ранее выполненных исследований [1] и на основании полученных результатов предлагается следующее разделение шахтопластов по группам эндогенной пожароопасности в зависимости от комплексного показателя \bar{t} :

I – особо опасные шахтопласти (участки), $\bar{t} \leq 0,23$;

II – пожароопасные пласти (участки), $0,23 < \bar{t} \leq 0,33$;

III – малоопасные пласти (участки), $0,33 < \bar{t} \leq 0,53$.

Предлагаемая градация шахтопластов не противоречит руководящему документу [2].

При определении склонности углей к самовозгоранию в настоящее время используют критерий $t_{\text{п}}$ – пороговое время, при превышении которого предполагают, что угольные пласти будут не склонны к самовозгоранию [1].

В приведенных исследованиях пороговый комплексный показатель склонности угля к самовозгоранию является безразмерной величиной $\bar{t}_{\text{п}} = 0,4$, выше которой не было ни одного пожара. Чтобы сравнить его с применяемым в настоящее время критерием, достаточно $\bar{t}_{\text{п}}$ умножить на среднее значение параметра B в уравнении (1). Получаем значение $2,8 \cdot 10^6$ с, что близко к используемому в настоящее время значению $t_{\text{п}} = 3 \cdot 10^6$ с.

Еще одним параметром пожароопасности является инкубационный период самовозгорания угля. Согласно настоящим исследованиям он находится умножением комплексного показателя \bar{t} на величину B , характерную для каждого угля. В исследованных случаях инкубационный период t составлял от 8 до 30 суток (см. табл. 1).

С использованием найденного показателя \bar{t} были рассчитаны минимальные скопления угля, подверженного самовозгоранию, согласно зависимостям, приведенным в работе [5]. Эти значения несколько меньше вычисленных авторов [1], что дает запас расчета допустимых величин потерь угля в шахтах при разработке пластов, склонных к самовозгоранию.

Результаты: Показано, что существенное влияние на изменение температуры угля оказывают константа скорости реакции окисления и испарения влаги, теплота дросселирования метана, газоносность пласта, теплота испарения влаги, критерий B_1 и концентрация кислорода в угле. Получена зависимость для комплексного критерия пожароопасности с учетом выделения теплоты и ее отдачи, применимая для различных углей. Обоснованы параметры разделения шахтопластов по группам

пожароопасности на основе математической модели и данных о более 200 произошедших пожаров. Даны зависимости для определения инкубационного периода самовозгорания, критической величины скопления, порогового значения критерия склонности к самовозгоранию каменных углей.

Практическая значимость: Полученные зависимости можно использовать для опытно-промышленного определения эндогенной пожароопасности угольных пластов.

Литература

1 Пашковский П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах. Донецк, 2013.– 792 с.

2 Классификация угольных пластов по их естественной пожароопасности / В.Т. Хорольский, А.М. Кушнарев, И.П. Белик, Я.М. Семений, И.А. Шайтан // Вопросы предупреждения и ликвидации аварий на угольных шахтах: Сб. статей / ВНИИГД. – Киев: Техника, 1970. – С. 9-13.

3 Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины КД 12.01.402 – 2000. – Донецк, 2000. – С. 214.

4 Определение группы пожароопасности пластов / С.П. Греков, П.С. Пашковский, И.Н. Зинченко, Е.А. Головченко // Уголь Украины. – 2008. – № 8. – С. 25-26.

5 Пашковский П.С. Минимальное скопление органического материала, подверженного самовозгоранию / П.С. Пашковский, С.П. Греков, В.П. Орликова // Уголь Украины. – 2016. – №1. – С. 23 – 27