

УДК 622.822.22:536.244

*С.П. Греков, д-р техн. наук, замзавотделом, В.П. Орликова, ст. науч. сотр.,
А.А. Всякий, науч. сотр. НИИГД «Респиратор», Донецк*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКЛОННОСТИ УГЛЕЙ К САМОВОЗГОРАНИЮ

*S.P. Grekov, Dr. Sci. (Tech.), deputy department head, V.P. Orlikova, senior researcher,
A.A. Vsyaky, research worker (NIIGD “Respirator”, Donetsk)*

DETERMINATION OF LIABILITY OF COALS TO SPONTANEOUS COMBUSTION

Цель. Расчет времени достижения углем критической температуры самовозгорания с учетом влияния испарения влаги и теплопроводности вмещающих пород, а также напорного истечения из угля метана и вызванного этим охлаждения.

Методика. Время определения критического значения температуры самовозгорания угля рассчитывается на основе результатов лабораторных исследований хемосорбции кислорода углем с использованием математического описания этого процесса.

Результаты. Найдено математическое описание определения времени достижения углем критической температуры самовозгорания с учетом влияния испарения влаги. Конкретными примерами проиллюстрировано, что значение времени достижения углем критической температуры с учетом влияния испарения влаги для всех случаев несколько больше, что следует считать запасом расчета. Рассмотрен случай охлаждения угля за счет дросселирования из него под напором метана и выведена величина, характеризующая задержку времени начала самонагревания угля на время окончания напорного выделения метана и связанного с этим охлаждения угля. Предложена формула для расчета общего времени нагревания угля до критической температуры с учетом его самонагревания на основе реакции окисления, охлаждения за счет испарения влаги, дросселирования метана и теплообмена с окружающей средой.

Научная новизна. Установлено, что динамика концентрации кислорода в угле и теплоотдача его скопления в шахте в окружающие породы в ряде случаев может значительно влиять на время достижения углем критической температуры самовозгорания.

Практическая значимость. Установленное влияние испарения влаги и напорного выделения метана из угля, а также теплообмена скопления угля с окружающими его породами на самонагревание позволит более объективно оценивать время достижения углем критической температуры самовозгорания.

Ключевые слова: инкубационный период самовозгорания, химическая активность, газоносность пласта, влажность, дросселирование.

Постановка проблемы. Последние достижения и публикации. Заключение о склонности углей к самовозгоранию делают на основании сравнения времени достижения ими критического значения температуры самовозгорания $t_{кр}$, с, с пороговым значением $t_{п}$, с, принятым равным $3 \cdot 10^6$ с (36 сут). Время определения критического значения температуры самовозгорания угля рассчитывают на основе математического описания хемосорбции кислорода углями и их нагревания [1]. Исследование полученных зависимостей и результатов экспериментов в лабораторных условиях показало, что концентрация углерода в угле a_C^* , мало изменяющаяся по мере его окисления, не влияет на величину $t_{кр}$. Адсорбционные процессы протекают

более интенсивно, чем тепловые. Было принято, что концентрация кислорода в твердой фазе $a_{O_2} = \gamma C_{ст}$ (где γ – константа Генри; $C_{ст}$ – концентрация кислорода в межкусковом пространстве в газовой фазе на уровне насыщения, равная концентрации в омывающем уголь воздухе, моль/м³), а теплообмен скопления угля с окружающей его средой отсутствует.

В этом случае известное решение уравнения теплообмена частицы с окружающей средой при наличии источников (стоков) теплоты может быть записано в виде

$$T/T_0 = \exp[\Gamma_T Fo], \quad (1)$$

где Γ_T – комплексный критерий генерации теплоты, определяемый зависимостью

$$\Gamma_T = \frac{a_C^* a_{O_2} q_c k_y m^2}{\rho c_v T_0 a}; \quad (2)$$

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

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

q_c – теплота реакции окисления, Дж/моль;

k_y – 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);

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

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

Fo – критерий Фурье, который определяют по формуле

$$Fo = at / m^2; \quad (3)$$

t – время, с.

Из анализа выражений (1) – (3) следует, что существенное влияние на изменение температуры T оказывает, кроме времени t , реакция окисления k_y и концентрация кислорода в угле a_{O_2} . Концентрацию в угле кислорода 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_y на процесс его самонагревания подробно изучено ранее [2]. Значения k_y изменяются для различных углей не более чем на один порядок величин. Влияние дробимости и фракционного состава исследовано в работе [3]. Дробимость изменяется, как правило, в

диапазоне от 10 до 35 (безразмерный параметр), а в качестве наиболее пожароопасных частиц принимается размер, равный 0,001...0,002 м.

Существенными параметрами, влияющими на концентрацию кислорода в угле a_{O_2} , являются коэффициент внутренней диффузии D и концентрация кислорода в межкусковом пространстве $C_{ст}$.

Коэффициенты диффузии изучали многие авторы [4]. Полученные значения для различных углей, найденные по различным методикам, имеют существенные отличия, иногда на несколько порядков, от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-12}$ м²/с. Поэтому, если все другие параметры, от которых зависит скорость окисления углей, определяют в лабораторных условиях достаточно точно, то, учитывая сказанное выше, становится очевидным необходимость выяснения влияния коэффициента внутренней диффузии на концентрацию кислорода в угле и, в конечном счете, на динамику температуры нагревающегося скопления угля.

Принятый в действующей методике способ определения склонности угля к самовозгоранию предполагает принятие концентрации кислорода в угле равным $a_{O_2} = \gamma C_{ст}$. При этом предусмотрено, что параметр γ находят лабораторным путем по экспериментам с поглощением углем кислорода для каждого исследуемого образца. Эта процедура длительна и трудоемка, из-за чего на практике принимали его значение согласно литературным данным в пределах 0,01 – 0,02, что вносило ошибку в определение Γ_T и соответственно времени достижения углем критической температуры.

В исследованиях [8] предложено определять величину a_{O_2} через интенсивность поглощения углем кислорода и параметр массопередачи β . Это привело к существенному увеличению точности определения времени достижения углем критической температуры самовозгорания. Тем не менее оставались невыясненными вопросы влияния процесса испарения влаги и напорного выделения из угля метана на процесс нагревания угля.

Все сказанное предопределило следующие исследования.

Цель работы: установить влияние испарения из угля влаги и напорного выделения метана, а также теплообмена скопления угля с окружающими его породами на самонагревание.

Изложение материала исследований. Примем модель самовозгорания угля такой, как она предложена в работе [1]. Рассмотрим вначале более простой случай, когда при нагревании скопления угля не учитывают теплоотдачу во вмещающие его породы.

Такая модель детально изучена в работе [8], где получено выражение для вычисления показателя генерации теплоты при самонагревании угля в виде

$$\Gamma_{T1} F_0 = \frac{a_c^* a_{O_2} q_c k_y t_1}{\rho c_v T_0}, \quad (4)$$

$$\text{где } a_{\text{O}_2} = \frac{\bar{a}_{\text{O}_2}^0}{\bar{b}} \ln \frac{\bar{b}}{\tilde{\beta}}; \quad (5)$$

$\bar{a}_{\text{O}_2}^0$ – начальная скорость поглощения углем кислорода, моль/(м³·с);

\bar{b} – показатель снижения скорости поглощения кислорода углем с учетом реакции окисления и массоотдачи, 1/с;

$\tilde{\beta}$ – показатель снижения скорости поглощения кислорода углем с учетом влаги, 1/с.

Параметры $\bar{a}_{\text{O}_2}^0$, \bar{b} и $\tilde{\beta}$ определяют по зависимостям, приведенным в статье [8].

Рассмотрим теперь более общий случай, когда за счет испарения влаги происходит некоторое снижение температуры угля и тем самым увеличение длительности достижения им критического времени.

Примем в выражении (1) безразмерный комплекс, отражающий теплоотвод за счет испарения влаги в виде

$$\Gamma_{T_2} F_0 = \frac{a_C^* q_B k_B w t_2}{\rho c_V T_0}, \quad (6)$$

где q_B – теплота испарения влаги, Дж/моль;

w – концентрация влаги в угле, моль/м³;

$k_B = 2,9 \cdot 10^{-9}$ – константа скорости испарения влаги, найденная в работе [9], м³/(с·моль).

Тогда, объединяя формулы (1), (4) и (6), выполнив логарифмирование и полагая $T = T_{\text{кр}}$, найдем параметр t в виде

$$t = t_1 + t_2 = \ln \left(\frac{T_{\text{кр}}}{T_0} \right) \frac{\rho c_V T_0}{a_C^*} \left(\frac{1}{a_{\text{O}_2} q_C k_Y} + \frac{1}{q_B k_B w} \right). \quad (7)$$

Проиллюстрируем полученное решение примером.

Пример 1. Примем $q_B = 150$ Дж/моль, $k_B = 2,9 \cdot 10^{-9}$ м³/(с·моль). Тогда, используя данные об угле по шахте им. А.А. Капустина, которые приведены в табл. 1, и данные табл. 2, будем иметь $t = 4,7 \cdot 10^6$ с.

Аналогичным образом, произведя вычисления по формуле (7) для остальных углей, которые представлены в табл. 1, получим значения времени достижения углями критической температуры самовозгорания, указанные в табл. 2.

Найденное значение времени достижения углем критической температуры для всех случаев несколько больше, чем рассчитанное по методике [8], что следует считать запасом расчета.

Таблица 1

Данные для расчетов показателя склонности угля к самовозгоранию по различным методикам

Шахта	Пласт	q , М ³ /Т моль/М ³	W_0 , % моль/М ³	$T_0, K /$ $T_{кр}, K$	D_p	$k_{cy} \cdot 10^9$, М ³ /(с·моль)	α_s , Вт/(М ² ·К)	λ_{cy} , Вт/(М ² ·К)	$\lambda_{нр}$, Вт/(М ² ·К)	В _г
Пласты угля, не склонные к самовозгоранию										
Им. Г. Г. Капустина	k_8^H	$\frac{5,0 \dots 10,0}{450}$	$\frac{6,5}{5200}$	301/350	6,7	5,17	0,39	0,29	0,17	0,024
	k_8	$\frac{11,0}{660}$	$\frac{4,5}{3600}$	306/378	27,2	6,94	0,36	0,29	0,20	0,021
«Северная»	l_6	$\frac{10,0}{600}$	$\frac{4,5}{3600}$	305/371	29,5	7,32	0,36	0,29	0,20	0,021
	l_2^1	$\frac{1,0}{60}$	$\frac{4,0}{3200}$	297/365	8,8	5,59	0,26	0,20	0,13	0,057
«Добропольская»	m_4^0	$\frac{16,0}{960}$	$\frac{6,0}{4800}$	296/393	10,6	8,48	0,26	0,20	0,13	0,058
	k_8^B	$\frac{9,0 \dots 17,0}{780}$	$\frac{9,5}{7600}$	297/383	14,0	5,78	0,25	0,20	0,13	0,014
«Полтавская»	k_8	$\frac{20,0}{1200}$	$\frac{7,5}{6000}$	303/398	3,7	7,79	0,24	0,20	0,12	0,040
Пласты угля, склонные к самовозгоранию										
«Карбонит»	m_3	$\frac{0,3 \dots 5,0}{159}$	$\frac{12,6}{10080}$	298/368	19,5	8,70	0,25	0,20	0,13	0,015
	l_8^1	$\frac{10,8 \dots 26,2}{1110}$	$\frac{7,5}{6000}$	302/383	35,8	9,52	0,26	0,20	0,14	0,015
«Северная»	l_5	$\frac{12,0}{720}$	$\frac{4,4}{3520}$	309/370	31,6	7,45	0,26	0,20	0,14	0,015
	l_7^B	$\frac{10,0}{600}$	$\frac{2,6}{2080}$	306/373	25,3	14,70	0,35	0,29	0,20	0,021
Им. Ф. Э. Дзержинского	l_3	$\frac{10,0}{600}$	$\frac{4,5}{3600}$	303/388	25,9	11,50	0,36	0,29	0,20	0,021
	l_2^1	$\frac{20,0 \dots 22,0}{1260}$	$\frac{4,5}{3600}$	303/370	45,9	14,90	0,38	0,29	0,21	0,022
«Северная»	m_3	$\frac{27,0 \dots 38,0}{1950}$	$\frac{7,5}{6000}$	297/388	39,4	15,10	0,29	0,20	0,15	0,048

Таблица 2

Результаты вычислений и сравнения рассчитанных по разным методикам показателей склонности углей к самовозгоранию с пороговым значением $t_{п} = 3 \cdot 10^6$ с

Шахта	Пласт	$\bar{b} \cdot 10^3$, 1/с	$\bar{\beta} \cdot 10^6$, 1/с	$\bar{a}_{O_2}^0 \cdot 10^5$, моль/(м ³ ·с)	$\bar{a}_{O_2} \cdot 10^2$, моль/м ³	Время достижения углем критической температуры $t \cdot 10^{-6}$, с				
						Метод НИИГД	Расчет по формуле (8)	Расчет по формуле (7)	Расчет по формуле (16)	Расчет по формуле (18)
Пласты угля, не склонные к самовозгоранию										
Им. Г.Г. Капустина	k_8^H	5,37	9,60	6,6	7,7	3,6	4,4	4,7	4,9	7,4
«Северная»	k_8	30,7	2,66	49	15	3,8	2,4	3,0	3,2	4,6
	l_6	34,2	2,20	56	16	3,4	2	2,6	2,7	3,9
«Украина»	l_2'	8	5,99	11	9,9	4,6	4,3	4,9	5,0	1,1
«Добропольская»	m_4^0	14,4	1,15	22	15	4,1	2,6	3,2	3,4	7,1
«Карбонит»	k_8^P	12,7	11,20	17	9,4	5,9	5,4	5,7	6,1	8,1
«Полтавская»	k_8	17,3	14,50	56	23	4,4	1,8	2,3	2,4	4,3
Пласты угля, склонные к самовозгоранию										
«Карбонит»	m_3	26,5	2,16	36	13	2,99	2,2	2,4	2,4	3,3
«Щегловская-Глубокая»	l_8'	52,3	4,25	90	16	3,1	1,8	2,2	2,4	3,2
	l_5	36,7	2,34	61	16	3,1	1,8	2,3	2,5	3,4
«Северная»	l_7^P	57,2	1,97	81	15	1,7	1,1	2,1	2,2	3,2
Им. Ф.Э. Дзержинского	l_3	46,9	2,66	81	17	2,7	1,5	2,2	2,3	3,4
	l_2'	110,0	1,97	180	17	1,7	0,9	1,5	1,6	2,4
«Северная»	m_3	93,0	6,21	20	20	2,2	1	1,4	1,6	3,0

Рассмотрим далее охлаждение угля за счет дросселирования из него под напором метана. В этом случае для функции (1) будем иметь

$$\Gamma_{T_3} F_0 = \frac{q_{др} I_M t}{\rho c_v T_0}, \quad (8)$$

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

I_M – скорость выделения метана из угля, моль/(м³·с), определяемая зависимостью [10]

$$I_M = q\mu e^{-\mu t}, \quad (9)$$

где q – газоносность пласта, моль/м³.

Для упрощения расчетов усредним I_M по времени и примем среднеинтегральное значение

$$I_{Mcp} = \frac{q\mu \int_0^t e^{-\mu t} dt}{t}. \quad (10)$$

Для больших значений времени, которое характеризует инкубационный период самовозгорания угля, можно принять

$$\int_0^t e^{-\mu t} dt = \int_0^{\infty} e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu}. \quad (11)$$

Тогда, подставляя уравнение (11) в (10), получим

$$I_{Mcp} = \frac{q}{t}. \quad (12)$$

Подставляя формулу (12) в (8), будем иметь

$$\Gamma_{T_3} F_0 = \frac{q_{др} q}{\rho c_v T_0}. \quad (13)$$

Выражение (13) характеризует задержку начала самонагревания угля t_1 на значение времени окончания напорного выделения метана и связанного с этим охлаждения угля. В этом случае формула (1) после логарифмирования примет вид

$$\ln \frac{T_{кр}}{T_0} = \Gamma_{T_1} F_0 - \Gamma_{T_3} F_0 = \frac{a_C^* a_{O_2} q_c k_y t_1}{\rho c_v T_0} - \frac{q_{др} q}{\rho c_v T_0}, \quad (14)$$

откуда новое \bar{t}_1 определяют по формуле

$$\bar{t}_1 = \frac{\left(\ln \frac{T_{кр}}{T_0} + \frac{q_{др} q}{\rho c_v T_0} \right) \rho c_v T_0}{a_C^* a_{O_2} q_c k_y}, \quad (15)$$

а общее время нагревания угля до критической температуры с учетом испарения влаги будет равно

$$t = \bar{t}_1 + t_2 = \frac{\rho c_v T_0}{a_C^*} \left(\frac{\left[\ln \left(\frac{T_{кр}}{T_0} \right) + \frac{q_{др} q}{\rho c_v T_0} \right]}{a_{O_2} q_c k_y} + \frac{\ln \left(\frac{T_{кр}}{T_0} \right)}{q_B k_B w} \right). \quad (16)$$

Пример 2. Вычислить время достижения углем критической температуры самовозгорания для примера 1, приняв $q_{др} = 10000$ Дж/моль.

Используя зависимость (16), имеем $t = 4,9 \cdot 10^6$ с.

Найденное значение t несколько больше, чем значение t без учета дросселирования метана, что свидетельствует о запасе расчета.

Значения величины t , вычисленные по формуле (16), для шахт, которые представлены в табл. 1 и 2, даны в табл. 2. Везде принято $q_{др} = 10000$ Дж/моль.

Рассмотрим, наконец, случай, когда, кроме всех источников тепловыделения и отвода теплоты, присутствует теплоотдача скопления угля в окружающую среду. В этом случае величина $\ln(T_{кр}/T_0)$ в функции критерия Bi для $Bi < 1$ и параметра $\Gamma_T F_0$ может быть записана в виде

$$\ln \left(\frac{T_{кр}}{T_0} \right) = \Gamma_T F_0 \Big|_{Bi=0} \exp(-4,9 Bi^{0,65}), \quad (17)$$

а время t найдено по зависимости

$$t \Big|_{Bi \neq 0} = \frac{\rho c_v T_0}{a_C^*} \left(\frac{\left[\ln \left(\frac{T_{кр}}{T_0} \right) \exp(4,9 Bi^{0,65}) + \frac{q_{др} q}{\rho c_v T_0} \right]}{a_{O_2} q_c k_y} + \frac{\ln \left(\frac{T_{кр}}{T_0} \right) \exp(4,9 Bi^{0,65})}{q_B k_B w} \right). \quad (18)$$

В этом случае необходимо определение параметров теплоотдачи скопления угля, которые определяют следующим образом:

- находят коэффициент порозности скопления угля ε по зависимости

$$\varepsilon = 0,48 / (1 + D_p/75), \quad (19)$$

где D_p – дробимость угля;

- определяют приведенный коэффициент теплопроводности $\lambda_{пр}$, Вт/(м·К), по зависимости

$$\lambda_{пр} = \varepsilon\lambda_{в} + (1 - \varepsilon)\lambda_{у}, \quad (20)$$

где $\lambda_{в}$ и $\lambda_{у}$ – теплопроводность воздуха и угля, Вт/(м·К); в табл.3 приведены значения $\lambda_{у}$;

- рассчитывают коэффициент теплоотдачи от скопления угля к окружающей среде по формуле

$$\alpha \approx k_{\tau} = \frac{\lambda_{пр}}{m} \left(0,375 + \frac{m}{\sqrt{\pi a t_{п}}} \right), \quad (21)$$

где m – толщина скопления угля, м;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

k_{τ} – коэффициент нестационарного теплообмена, Вт/(м²·К);

$t_{п} = 3 \cdot 10^6$ – пороговое время самовозгорания угля, с;

- находят параметр Bi по формуле

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda_{п}} \frac{m}{2}, \quad (22)$$

где $\lambda_{п}$ – теплопроводность породы, Вт/(м·К).

Таблица 3

Средние значения теплофизических величин горной породы

Горная порода	Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^7$, м ² /с	Теплопроводность угля $\lambda_{у}$, Вт/(м·К)
Донецкий бассейн		
Песчаник	12,1	2,56
Глинистый и песчаный сланец	8,1	1,76
Уголь	2,1	0,29

Окончание табл. 3

Горная порода	Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	Теплопроводность угля $\lambda_y, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
Центральный район Донбасса		
Песчаник	9,3	0,5...2,3
Глинистый и песчаный сланец	3,75	0,7...0,83
Уголь	1,45	0,2
Донецко-Макеевский район		
Песчаник	5,4	0,4...1,4
Глинистый и песчаный сланец	3,6	0,6
Уголь	1,3	0,2
Красноармейский район		
Песчаник	2,4...3,7	0,3...0,6
Глинистый и песчаный сланец	3,2	0,7
Уголь	1	0,2

Пример 3. Определить время достижения критической температуры самовозгорания для скопления угля с учетом его самонагрева в связи с реакцией окисления, охлаждения за счет испарения влаги и дросселирования метана и теплообмена с окружающей средой для шахты им. А.А. Капустина:

- коэффициент порозности ε – по формуле (19) равен $\varepsilon = 0,44$;
- приведенный коэффициент теплообмена скопления угля с окружающей средой $\lambda_{\text{пр}}$ – по формуле (20) равен $\lambda_{\text{пр}} = 0,17$;
- коэффициент теплоотдачи от скопления угля к окружающей среде α – по формуле (21) $\alpha = 0,377$;
- параметр Bi – по формуле (22) $Bi = 0,023$;
- время достижения углем критической температуры t – по формуле (18) $t = 7,4 \cdot 10^6 \text{ с}$.

Найденное в примере время достижения углем критического значения с учетом теплообмена угольного скопления с окружающими его породами больше, чем без учета этого фактора (пример 2), что свидетельствует о значительном влиянии теплоотдачи в окружающие уголь породы. Для более детального изучения воздействия этого фактора рассчитали влияние теплоотдачи скопления угля породам для других случаев, представленных в табл. 1 и 2.

Выводы и направления дальнейших исследований. Динамика концентрации кислорода в угле и теплоотдача его скопления в шахте в окружающие породы в ряде случаев может значительно влиять на время достижения углем критической температуры самовозгорания. Для более детального изучения этого вопроса необходимо накопление экспериментального материала и проведение дополнительных исследований.

Список литературы / References

1. Неизотермическая абсорбция вещества сферическим зерном, сопровождаемая химическими реакциями второго порядка / С.П. Греков, А.Е. Калюсский, Б.И. Кошовский, В.В. Баклан // Теоретические основы химической технологии. – 1998. – Т. 32, № 2. – С. 122 – 125.

Grekov, S.P., Kalyussky, A.Ye., Koshovsky, V.I. and Baklan, V.V. (1998), *Neisotermicheskaia absorptsiiia veschtchestva zernom, soprovozhdaemaia khimicheskimi reaktsiiami vtorogo poriadka* [Non-isothermal absorption of the substance with the spherical grain accompanying with second-order chemical reactions]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*, vol. 32, no. 2, pp. 122 – 125.

2. Греков С.П. Влияние динамики хемосорбции кислорода углями на их склонность к самовозгоранию / С.П. Греков, А.Е. Калюсский, Б.И. Кошовский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 1995. – С. 21 – 28.

Grekov, S.P., Kalussky, A.Ye. and Koshovsky, V.I. (1995), *Vliianie dinamiki khemosorbtsii kisloroda ugljami na ikh sklonnost k samovozgoraniuu* [Influence of the dynamics of oxygen chemical adsorption with coals on their liability to spontaneous combustion], NIIGD “Respirator”, Donetsk, Ukraine.

3. Влияние параметров окисления угля и его фракционного состава на самонагревание в скоплении / С.П. Греков, В.К. Костенко, Б.И. Кошовский, О.Э. Толкачев // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 1999. – С. 113 – 122.

Grekov, S.P., Kostenko, V.K., Koshovsky, V.I. and Tolkachyov O. E. (1999). *Vliianie parametrov okisleniia uglia i ego fraktsionnogo sostava na samonagrevanie v skoplenii* [Influence of oxidation parameters of coal and its fraction composition on the spontaneous heating in a coal accumulation], NIIGD “Respirator”, Donetsk, Ukraine.

4. Истечение метана из частиц угля / С.П. Греков, Б.И. Кошовский, М.В. Илык, И.Н. Смоланов // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2002. – С. 74 – 88.

Grekov, S.P., Koshovsky, V.I., Pyk, M.V. and Smolanov, I.N. (2002), *Istechenie metana is chastits uglia* [Methane outflow from the coal particles], NIIGD “Respirator”, Donetsk, Ukraine.

5. Греков С.П. Динамика сорбции кислорода углями разных степеней метаморфизма при окислении в диапазоне температур 30÷100 °С / С.П. Греков, Б.И. Кошовский, А.А. Всякий // Вісник Донецького гірничого інституту: сб. тр. – Донецк, 2011. – № 2. – С. 106 – 112.

Grekov, S.P., Koshovsky, V.I. and Vsyaky, A.A. (2011), *Dinamika sorbtsii kisloroda ugljami raznykh stepenei metamorfizma pri okislenii v diapazone temperatur 30÷100 °C* [Dynamics of oxygen sorption with the coals of various degrees of metamorphism by oxidation in a temperature range of 30÷100 °C], Donetsk, Ukraine.

6. Греков С.П. Динамика содержания кислорода в межкусковом пространстве скопления отторгнутого от массива угля и опасность его самовозгорания / С.П. Греков, Г.Б. Тында, И.Н. Зинченко // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка – Донбасс, 2005. – С. 279 – 286.

Grekov, S.P., Tynda, G.B. and Zinchenko, I.N. (2005), *Dinamika sodержaniia kisloroda v mezhkuskovom prostranstve skopleniia ottorgnutogo ot massiva uglia i opasnost ego samovozgoraniia* [Dynamics of the oxygen content in the space between the pieces of the accumulation of coal separated from the massif and hazard of its spontaneous combustion], MakNII, Makeyevka, Ukraine.

7. Определение склонности углей к самовозгоранию / П.С. Пашковский, С.П. Греков, Я. Цыганкевич, И.А. Шайтан // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2000. – С. 10 – 16.

Pashkovsky, P.S., Grekov, S.P., Cygankiewicz, Ja. and Shaytan, I.A. (2000), *Opredelenie sklonnosti uglei k samovozgoraniiu* [Determination of liability of coals to spontaneous combustion], NIIGD “Respirator”, Donetsk, Ukraine.

8. Новый метод определения склонности углей к самовозгоранию / П.С. Пашковский, С.П. Греков, Б.И. Кошовский, А.М. Луганский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2012. – Вып. 49. – С. 61 – 72.

Pashkovsky, P.S., Grekov, S.P., Koshovsky, B.I. and Lugansky, A.M. (2012), *Novyi metod opredeleniia sklonnosti uglei k samovozgoraniiu* [A new method of determination of liability of coals to spontaneous combustion], NIIGD “Respirator”, Donetsk, Ukraine.

9. Пашковский П.С. Влияние химической активности и влажности угля на процесс самонагревания / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2007. – Вып. 44. – С. 17 – 25.

Pashkovsky, P.S., Grekov, S.P. and Zinchenko, I.N. (2007), *Vliianie khimicheskoi aktivnosti i vlazhnosti uglia na protsess samonagrevaniia* [Influence of chemical activity and humidity of coal on the process of spontaneous heating], NIIGD “Respirator”, Donetsk, Ukraine.

10. Греков С.П. Охлаждение угля за счет дросселирования выделяющегося метана / С.П. Греков, В.П. Орликова, А.А. Всякий // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 97 – 106.

Grekov, S.P., Orlikova, V.P. and Vsyaky, A.A. (2013), *Okhlazhdenie uglia za schot vydeliiaushtchegosia metana* [Cooling of coal at the expense of the releasing methane], NIIGD “Respirator”, Donetsk, Ukraine.

Ціль. Розрахунок часу досягнення вугіллям критичної температури самозаймання з урахуванням впливу випаровування вологи та теплопровідності вміщуваних порід, а також напірного стікання з вугілля метану і охолодження, що визвано цим.

Методика. Час визначення критичного значення температури самозаймання вугілля розраховують на підставі результатів лабораторних досліджень хемосорбції кисню вугіллям із використанням математичного опису цього процесу.

Результати. Знайдено математичний опис визначення часу досягнення вугіллям критичної температури самозаймання з урахуванням впливу випаровування вологи. Конкретними прикладами проілюстровано, що значення часу досягнення вугіллям критичної температури з урахуванням впливу випаровування вологи для всіх випадків трохи більше, що слід вважати запасом розрахунку. Розглянутий випадок охолодження вугілля за рахунок дроселювання з нього під натиском метану та виведена величина, що характеризує затримку часу початку самозаймання вугілля на час закінчення напірного виділення метану та пов'язаного з цим охолодження вугілля. Запропонована формула для розрахунку загального часу нагрівання вугілля до критичної температури з урахуванням його самозаймання на підставі реакції окислення, охолодження із-за випаровування вологи, дроселювання метану та теплообміну з навколишнім середовищем.

Наукова новизна. Установлено, що динаміка концентрації кисню у вугіллі та тепловідведення його скупчення в шахті до оточуючих порід в різних випадках може значно впливати на час досягнення вугіллям критичної температури самозаймання.

Практична значущість. Встановлений вплив випаровування вологи напірного виділення метану з вугілля, а також теплообмін скупчення вугілля з оточуючими його породами на самозаймання дозволить більш об'єктивно оцінювати час досягнення вугіллям критичної температури самозаймання.

Ключові слова: інкубаційний період самозаймання, хімічна активність, газоносність пласта, вологість, дроселювання.

Purpose. Calculation of the time of achievement of the critical spontaneous combustion temperature by coal with due regard for moisture evaporation and heat conductivity of enclosing rocks as well for pressure outflow of methane from coal and cooling provoked with this fact.

Methodology. The time of determination of the critical value of the coal spontaneous combustion temperature is calculated on the basis of results of laboratory investigations of chemical adsorption of oxygen by coal with the use of the mathematical description of this process.

Results. The mathematical description of determination of the time of achievement of the critical spontaneous combustion temperature by coal with due regard for influence of moisture evaporation is found. It is illustrated by means of the concrete examples that the time value of achievement of the critical temperature by coal with due regard for moisture evaporation is slightly larger for all the cases, what should be considered as the reserve of the calculation. The case of the cooling of coal at the expense of the throttling of methane under pressure from is examined and the value characterizing time delay of the beginning of coal spontaneous heating for a time of the finishing of the methane pressure release and of the coal cooling connected with it is deduced. The formula for calculation of the total time of coal heating up to the critical temperature with due regard for its spontaneous heating on the basis of the oxidation reaction, cooling at the expense of moisture evaporation, methane throttling and heat exchange with the environment is proposed.

Scientific novelty. It is established that dynamics of the oxygen content in coal and heat irradiation of its accumulation to the enclosing rocks in the mine may considerably influence on the time of achievement of the critical spontaneous combustion temperature by coal in some cases.

Practical value. The established influence of moisture evaporation and pressure methane release from coal as well of heat exchange of the coal accumulation with the enclosing rocks on the spontaneous heating allows us to estimate more objectively the time of achievement of the critical spontaneous combustion temperature by coal.

Keywords: incubation period of spontaneous combustion, chemical activity, gas-bearing capacity of the seam, humidity, throttling.