

УДК 622.822.22:536.244:011.103

С.П. Греков, д-р техн. наук, П.С. Пашковский, д-р техн. наук, проф., В.П. Орликова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОЧАГА САМОНАГРЕВАНИЯ УГЛЯ И ВРЕМЕНИ ЕГО ЗАРОЖДЕНИЯ ПО КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЖАРНЫХ ГАЗОВ

Рассмотрена математическая модель самонагрева в слое угля как пористой среде, апробированная на экспериментах НИИГД (Украины) и ФРГ в диапазоне температур 340 – 400 К на углях разной степени углефикации. Предложено использовать для определения температуры угля отношение оксида углерода к израсходованному на реакции окисления кислорода.

Ключевые слова: гетерогенный процесс, доля реакционной поверхности, низкотемпературное окисление, скорость реакции, энергия активации, самовозгорание.

S. Grekov Doc. of Sc. (Eng.), P. Pashkovskiy Prof., Doc. of Sc. (Eng.), V. Orlykova

TEMPERATURE DETERMINATION OF THE SPONTANEOUS COMBUSTION OF COAL SOURCE AND TIME OF ITS ORIGIN BY FIRE GASES CONCENTRATION

The mathematical model of self-heating model in the layer of coal as in the porous medium approved during the tests in the RMROI "Respirator" (Research mine rescue operations institute, Ukraine) and the Federal Republic of Germany in a temperature range of 340...400 K with the use of coals of various coalification degree is proposed. The ratio of carbon oxide to oxygen used for the oxidation reactions is proposed to determine the coal temperatures.

Keywords: heterogeneous process, part of the reactionary surface, low-temperature oxidation, reaction rate, activation energy, spontaneous combustion.

Эффективность борьбы с эндогенными пожарами, возникающими в выработанном пространстве угольных шахт, в значительной степени зависит от своевременности обнаружения и полноты информации о процессе самовозгорания угля. В процессе развития эндогенного пожара выделяют стадию самонагрева, раннюю стадию самовозгорания и стадию горения угля.

Самонагревание угля начинается, как только создаются условия для аккумуляции теплоты. Стадия самонагрева в основном определяет длительность инкубационного периода процесса самовозгорания и протекает в интервале температур, начиная со значений, характерных для условий данной выработки, и до критической температуры самовозгорания. По достижении критической температуры начинается ранняя стадия самовозгорания угля. Кроме изменения температуры в очаге пожара, происходят существенные изменения состава воздуха аварийного участка: уменьшается содержание кислорода, увеличивается выделение оксидов углерода, водорода, предельных и непредельных углеводородов, содержание которых значительно превышает фоновые значения. Признаком самонагрева угля на контролируемом участке является устойчивое превышение объемной доли СО и Н₂ над фоновым их содержанием. Однако по результатам определения превышения оксида углерода и водорода над фоновым их содержанием невозможно отличить стадию самонагрева от ранней стадии самовозгорания. Вместе с тем определение стадии развития эндогенного пожара имеет большое значение, поскольку ранняя стадия самовозгорания угля при благоприятных условиях может длиться всего несколько часов. Эти стадии на шахтах Украины определяются по температуре угля в очаге эндогенного пожара на основании данных о соотношении этилена С₂Н₄ и ацетилена С₂Н₂ в пробах воздуха аварийного участка,

так как на стадии самонагрева и ранней стадии самовозгорания, вплоть до температуры воспламенения летучих веществ, рост доли этилена опережает рост доли ацетилена, вследствие чего соотношение этих компонентов закономерно увеличивается [1].

Вместе с тем, показатели соотношения этилена и ацетилена не дают полной картины развития процесса самонагрева угля, так как не позволяют определить время зарождения очага самонагрева, что имеет определенное значение для распознавания места очага и, следовательно, его тушения.

Контроль стадии развития пожара по соотношению этилена и ацетилена не отражает сути процесса низкотемпературного окисления угля, что может быть сделано на основании контроля содержания кислорода на аварийном участке.

Известные методы оценки процесса самонагрева угля основаны на анализе продуктов реакции кислорода с углем, в то время как согласно теории «уголь-кислородного» комплекса на начальной стадии кислород физически сорбируется поверхностью угля с незначительным выделением теплоты. Затем с повышением температуры начинается расщепление неустойчивых кислородных комплексов с образованием конечных продуктов окисления угля – оксидов углерода, воды, при котором выделение теплоты возрастает в 1,5 - 2 раза [2]. Таким образом, контроль концентрации кислорода дает возможность проследить весь процесс низкотемпературного окисления и, следовательно, является наиболее чувствительным индикатором раннего появления очага самонагрева угля.

Влияние содержания кислорода резко возрастает с повышением температуры: чем она выше, тем при меньшем содержании кислорода может протекать процесс окисления. Зависимость процесса самовозгорания от содержания кислорода в рудничной атмосфере является одним из главных факторов, влияющих на пожароопасность горных работ при переходе их на глубокие горизонты [3].

Между тем существующая система контроля на угольных шахтах, ограничивающаяся газовым анализом шахтного воздуха в действующих выработках, зачастую оказывается малоэффективной при обнаружении самовозгорания и практически не дает информации о местонахождении очага пожара. Отсутствие необходимой информации об эндогенном пожаре, особенно о местонахождении очага в выработанном пространстве, затрудняет использование активных методов тушения и становится причиной применения способа изоляции участков с признаками самовозгорания.

Целью работы является использование математических методов описания процесса низкотемпературного окисления угля для получения информации о динамике развития очага самонагрева, на основании которой возможно определение времени зарождения очага пожара и его температуры по данным анализа проб пожарных газов.

Ранее нами были рассмотрены тепловая и диффузионная задачи самонагрева угля, предполагая известными функциональные зависимости плотности источников и стоков от температуры и концентрации [4]. Сформулирована физическая и адекватная ей математическая модель процесса в слое различной толщины. Предложен способ численного решения задачи. Сложность вычислений и временами неадекватность полученного решения по разработанной программе из-за неустойчивости численного метода позволили нам предложить упрощенную математическую модель, позволяющую получить аналитическое решение задачи самонагрева угля в слое зернистого материала и его температуру, помещенную в статью [5] и имеющую вид:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{T - T_0}{l} \right) = \frac{\alpha \Pi}{S} (T_c - T) + w, \quad (1)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³;

c – удельная теплоемкость газов при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

T – температура в очаге пожара, К;

T_0 – температура до пожара, К;

T_c – температура пород, окружающих скопление угля, К;
 u – скорость движения воздуха, м/с;
 l – длина зоны горения, м;
 α – коэффициент теплообмена между скоплением угля и окружающими его породами, Вт/(м²·К);
 Π – периметр скопления угля, м;
 S – площадь поперечного сечения скопления угля, м²;
 w – интенсивность источника тепла при горении, Вт/м³.

Для квазистационарного случая уравнение (1) примет вид:

$$\tilde{u} \frac{T-T_0}{l} = \frac{\alpha \Pi}{\rho_0 c S} (T_c - T) + \frac{w}{\rho_0 c}, \quad (2)$$

где $\tilde{u} = \rho u / \rho_0$ – массовая скорость воздуха, м/с;
 ρ_0 – плотность газа при температуре T_0 , кг/м³.

Принимая $T_c = T_0$ и решив уравнение (2) относительно температуры имеем

$$T = T_0 \left(1 + \frac{\bar{w} l}{\tilde{u} + \bar{\alpha}} \right), \quad (3)$$

где: $\bar{\alpha} = \frac{\alpha \Pi}{\rho_0 c S}$ – удельный коэффициент теплообмена скопления угля с окружающими его породами, м/с;
 $\bar{w} = \frac{q}{\rho_0 c S}$ – удельная интенсивность тепловыделения в зоне горения, 1/с.

Анализ выражения (3) показал, что величина параметра \tilde{u} на 1-2 порядка менее параметра $\bar{\alpha}$. Поэтому, пренебрегая величиной \tilde{u} и подставляя в (3) размерный вид для \bar{w} и $\bar{\alpha}$, получим

$$T = T_0 + \frac{w S}{\alpha \Pi}. \quad (4)$$

Удельная интенсивность тепловыделения w , Дж/(м³·с) согласно ранее предложенной математической модели [6], подтвержденной проведенными экспериментальными наблюдениями, может быть представлена в виде:

$$w = \xi a_{O_2} a_C^* k q, \quad (5)$$

где a_{O_2} и a_C^* – концентрации кислорода и углерода, моль/м³;
 k – константа скорости окисления, м³/(с·моль);
 ξ – доля концентрации кислорода, вступающего в реакции окисления с углем;
 q – теплота реакции окисления, Дж/моль.

Концентрация кислорода a_{O_2} , вступающего в реакции окисления с углем на его поверхности $S_{уд}$, меняется во времени по мере проникновения кислорода в межкусковое пространство скопления угля и диффузии в поры угля.

В работе [7] исследовано изменение во времени доли ξ концентрации кислорода a_{O_2} , вступающего в реакции окисления на реакционной поверхности $S_{уд}$ и получено выражение в виде:

$$\xi = 1 - \exp(-vt) + \frac{v}{\mu - v} [\exp(-\mu t) - \exp(-vt)], \quad (6)$$

где μ и v – константы выделения метана, 1/ч, и скорости образования поверхностного комплекса, 1/ч, выражения для которых имеют вид:

$$\mu = \frac{3,33 \cdot 10^{-7} J_0}{R^{0,2}} \exp(-6,66 \cdot 10^{-6} (V^T)^{-0,3} t), \quad (7)$$

где J_0 – газоносность пласта, м³/т;
 R – радиус частиц угля, м;
 V^T – концентрация горючих веществ в угле, %;
 t – время, с,

$$v = 2,2 \cdot 10^{11} E^{-3,66}, \quad (8)$$

где E – энергия активации, Дж/моль, определяемая зависимостью:

$$E = -T_{кр} R [\ln k_{кр} - \ln k_0], \quad (9)$$

где $T_{кр}$ – критическая температура самовозгорания угля, К;
 $k_{кр}$ – константа скорости реакции окисления угля при критической температуре самовозгорания, м³/(с·моль);
 k_0 – предэкспоненциальный множитель, м³/(с·моль);
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

С целью возможности последующего моделирования процесса низкотемпературного окисления угля и разработки таблиц (графиков) для определения температур скопления угля и времен начала зарождения процесса его самонагревания целесообразно все данные, используемые для этого, выразить через наиболее общий для углей показатель – V^T .

В работе [8] авторами выполнено исследование природы критической температуры самовозгорания угля, показавшее, что она зависит от внутренних свойств угля. По этим данным критические температуры – это температуры, при которых происходит изменение взаимодействия кислорода с углем и характера аккумуляции теплоты в процессе окисления.

Поэтому можно предположить, что критические температуры угля зависят от соотношения параметров скорости выделения тепла v_{q_0} , Дж/(моль·с) и коэффициентов внутренней диффузии D , м²/с.

Для выявления этой зависимости воспользуемся данными автора [1] по изучению свойств углей около 30 шахтопластов Донбасса (табл. 1)

Таблица 1 – Характеристики углей

Шахта	V^T , %	Индекс пласта	$T_{кр}$, К	$k_{кр} \cdot 10^2$, 1/с	E , Дж/моль	k_0 , 1/с	$\ln \left(\frac{k_{кр}}{k} \right)$	D , м ² /с	$\frac{v_{q_0} \cdot 10^{-3}}{\text{Дж}} \cdot \text{моль} \cdot \text{с}$	$\frac{v_{q_0} \cdot 10^{-9}}{\frac{\text{Дж}}{\text{Дж}}} \cdot \text{моль} \cdot \text{м}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
«Комсомолец»	30	I_3	366	0,31	16866	0,79	-5,54	2,6	2,4	8,1
Им. А.И. Гаевого	22	I_3	360	0,40	17950	1,51	-6	2,5	2,5	10,0
Им. Ю.А. Гагарина	25	I_1	358	0,14	18363	0,67	-6,11	1,9	3,7	9,4
«	25	I_3	358	0,43	18363	2,06	-6,17	2,54	2,7	10,6
Им. М.И. Калинина	20	I_6	370	0,15	16252	0,3	-5,29	1,9	2,4	12,6

Продолжение таблицы 1

Шахта	$V, \%$	Индекс пласта	$T_{кр}, K$	$k_{кр} \cdot 10^2, 1/c$	$E, Дж/моль$	$k_o, 1/c$	$\ln\left(\frac{k_{кр}}{k}\right)$	$D, м^2/c$	$\frac{v_{q_0} \cdot 10^{-3}, Дж}{моль \cdot c}$	$\frac{v_{q_0} \cdot 10^{-9}, Дж}{D \cdot м^2}$
«Северная»	20	l_1	358	0,28	18363	1,34	-6,17	2,3	3,1	13,4
«	25	l_3	355	0,43	19042	2,73	-6,45	2,54	3,0	11,8
«Торецкая»	28	l_3	372	0,25	15972	0,44	-5,17	2,24	1,9	8,5
Им. А.Ф. Засядько»	36	l_1	373	0,23	15837	0,38	-9,1	2,18	5,9	27,1
«	34	m_3	375	0,28	15581	0,41	-5	1,9	2,4	12,6
«Куйбышевская»	36	l_4	366	0,90	16866	2,3	-5,54	2,87	4,1	14,3
«Моспинская»	-	h_4	370	0,9	16252	1,78	-5,3	2,87	-	-
Им. А.А. Скочинского	31	h_6	353	0,82	19537	1,56	-5,25	2,84	3,2	11,2
Им. Челюскинцев	33	m_3	360	0,65	17950	2,62	-6	2,74	3,0	10,9
Им. В.М. Бажанова	27	m_3	368	0,36	16550	0,8	-5,4	2,43	3,0	13,3
«Калиновская - Восточная»	20	l_1	370	0,1	16252	2,17	-5,28	3,4	2,9	8,5
Им. К.И. Поченкова	34	m_3	357	0,33	18580	1,59	-6,17	2,4	3,5	14,6
«	25	l_1	370	0,6	1625	1,18	-5,28	2,7	2,9	10,7
«Чайкино»	30	l_3	357	0,47	18580	2,47	-6,25	2,58	3,2	12,4
«Александровская»	9	l_1	375	0,2	15581	0,3	-5	2,1	1,4	6,7
«Булавинская»	10	l_3	366	0,25	16866	0,64	-5,55	2,03	1,9	7,2
«Красный Октябрь»	15	l_1	370	0,3	16252	0,59	-5,28	2,35	2,4	10,2
«Полтавская»	7	l_1	380	0,23	14999	0,26	-4,72	2,18	1,4	6,4
«	8	l_3	382	0,24	14788	0,26	-4,68	2,211	1,5	6,7
«Ольховатская»	8	l_3	365	0,18	17032	0,49	-5,6	2,04	1,6	7,8
«Юнком»	15	l_1	357	0,3	18580	1,57	-6,26	2,55	2,3	9,0
«Донецкая»	7	h_4	379	0,8	15109	0,97	-4,8	2,87	3,2	11,3

Воспользуемся работой [7], в которой найдены скорости выделения тепла для углей шахт, представленных в таблице 1, и работой [9], где даны коэффициенты внутренней диффузии, и построим зависимость $T_{кр}$, от v_{q_0}/D , (рис.1).

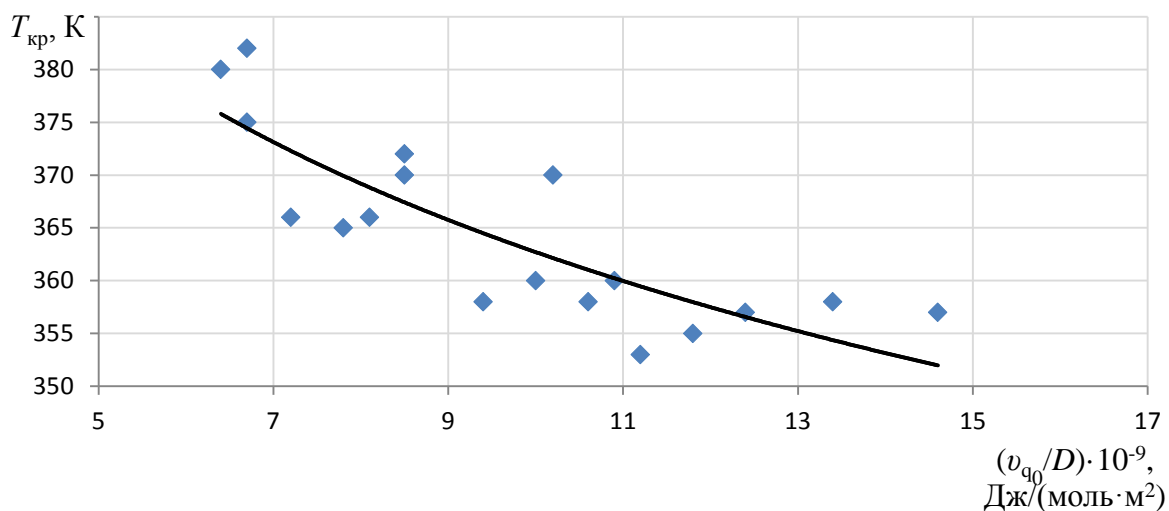


Рисунок 1 – Зависимость критической температуры самовозгорания угля от отношения скорости тепловыделения и коэффициента внутренней диффузии

Эта зависимость описывается выражением:

$$T_{кр} = 1835 \left(\frac{v_{q_0}}{D} \right)^{-0,07} \quad (10)$$

Здесь согласно работе [7] выражение для v_{q_0} имеет вид

$$v_{q_0} = 572(V^r)^{0,5}, \quad (11)$$

а согласно [9] зависимость для D , выражается формулой:

$$D(V_\phi) = \left\{ -\ln \left[1,017V_\phi \pm 0,133(V_\phi - 0,018)^{0,5} + 1,36 \cdot 10^{-2} \right] \right\} / 1,3 \cdot 10^7, \quad (12)$$

используемой со знаком «минус» при $V^r > 20\%$ и со знаком «плюс» при $V^r < 20\%$.
В формуле (12) V_ϕ – фильтрационный объем пор, $\text{см}^3/\text{г}$, представлен в виде

$$V_\phi = 0,058 - 0,004V^r + 0,0001(V^r)^2. \quad (13)$$

Далее, для определения энергии активации по формуле (9), найдем выражения для $\ln k_{кр}$ и $\ln k_0$.

Полагаем, как это сделано в работе [1], что $k_{кр}$ зависит от V^r , а k_0 – от энергии активации. Тогда, пользуясь данными таблицы 1, построим эти зависимости (рис. 2 и 3).

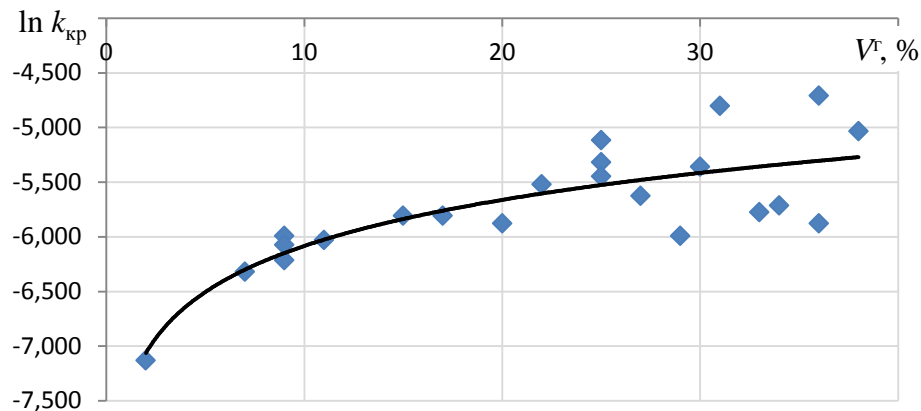


Рисунок 2 – Зависимость $\ln k_{кр}$ от летучих горючих

Аналитическое выражение для $\ln k_{кр}$ имеет вид:

$$\ln k_{кр} = -0,001(V^r)^2 + 0,093V^r - 6,943. \quad (14)$$

где $k_{кр}$ выражено в размерности $1/\text{с}$.

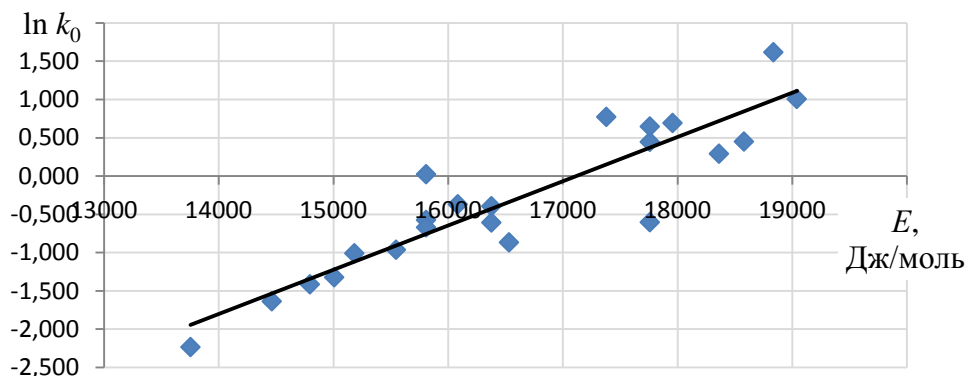


Рисунок 3 – Зависимость $\ln k_0$ от энергии активации

Аналитическое выражение для $\ln k_0$ имеет вид

$$\ln k_0 = 0,0006E - 10,323, \quad (14)$$

где k_0 выражено в размерности 1/с.

Таким образом, выражение (9) для вычисления E через величины концентрации горючих в углях с использованием (10), (14) и (15) имеет вид:

$$E = \frac{\ln k_{кр} + 10,323}{0,0006 - 1/(T_{кр}R)}. \quad (16)$$

Итак, с помощью формул (8-16) изменение во времени доли ξ вступающего в реакции окисления кислорода, описываемого зависимостью (6), может быть вычислено по данным о величинах в угле горючих V^f .

Следующим параметром, необходимым для определения удельной интенсивности тепловыделения согласно формуле (5), является величина концентрации кислорода a_{O_2} в межкусковом пространстве и диффундирующая в угольное вещества. Эту концентрацию возможно находить исходя из данных исследований [10] по зависимости

$$a_{O_2} = C_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{0,76}{0,83 + J_0 \rho} 1,1 \cdot 10^{-5} t\right) \right], \quad (17)$$

где J_0 – газоносность пласта, м³/т;

ρ – плотность угля, т/м³;

C_0 – концентрация кислорода в шахтном воздухе, моль/м³;

t – время, с.

Концентрация углерода a_c^* , моль/м³, входящая в формулу (5) может быть найдена по формуле:

$$a_c^* = 138715(V^f)^{-0,07}. \quad (18)$$

Скорость окисления углей k , входящая в формулу (6), для определения интенсивности тепловыделения находится из формулы (14) для $k_{кр}$ в виде:

$$k = k_{кр} = \exp[-0,001(V^f)^2 + 0,093V^f - 6,943]. \quad (19)$$

Наконец, теплота реакции окисления углей q , Дж/моль, была нами изучена в работе [7] и представлена зависимостью

$$q = 6980 k^{-0,82}, \quad (20)$$

где величина k выражена в размерности 1/с.

Таким образом, все величины, входящие в формулу (5), нами выражены через параметр V^r , определяющий степень метаморфизма угля, и время от начала процесса зарождения очага его самонагревания.

Для вычисления температуры очага самонагревания угля по формуле (4) кроме удельной интенсивности тепловыделения необходимо знать еще размеры скопления угля, определяемые параметрами S и Π и коэффициентом теплоотдачи α . Величины S и Π для дальнейших исследований принимаются постоянными и равными $S = 0,028 \text{ м}^2$ и $\Pi = 0,68 \text{ м}$, полагая сечение угольного скопления равным $0,17 \times 0,17 \text{ м}$, как минимальное при котором возможно согласно [1] самовозгорание угля.

Коэффициент теплоотдачи α зависит от материала вмещающих уголь пород. Однако, в связи с тем, что окисление угля начинается, обычно, в каком-то месте, расположенном в середине его скопления, то теплоотдача от очага идет не к породе, а к углю и поэтому колеблется в зависимости от его степени метаморфизма незначительно, а следовательно, может быть принята постоянной величиной.

Вычисления по формуле (4) позволяют также определить долю концентрации кислорода ξa_{O_2} , моль/м³, вступающего в реакции окисления с углем.

Результаты определения ξa_{O_2} представлены в таблице 2 на примере данных шахты «Комсомолец» с $V^r=30\%$.

Таблица 2 – Динамика параметров окисления угля по шахте «Комсомолец»

Показатель	Время, t , ч							
	300	400	500	525	550	600	650	700
ξ	0,0139	0,0212	0,0289	0,0308	0,0328	0,0367	0,0406	0,0445
$\Delta C_{O_2} = \xi a_{O_2}$, моль/м ³	0,0565	0,106	0,167	0,184	0,21	0,234	0,268	0,301
ΔC_{O_2} , %	0,127	0,238	0,375	0,413	0,471	0,525	0,661	0,675
T , К	305	316	334	340	347	361	380	400
C_{CO} , моль/м ³	-	-	-	0,0031	0,006	0,009	0,013	0,016
C_{CO}	-	-	-	0,0069	0,0135	0,02	0,029	0,036
$C_{CO}/\Delta C_{O_2}$	-	-	-	0,0168*	0,028	0,037	0,048*	0,053

*- по данным [11]

Так как для нахождения температуры очага самонагревания угля необходим еще один индикаторный компонент, используем оксид углерода, довольно точно определяется в шахтном воздухе как экспресс-методом с помощью индикаторных трубок, так и лабораторным путем.

Воспользуемся для расчета оксида углерода, выделяющего при низкотемпературном окислении угля, данными авторов [11], изучавших склонность к самовозгоранию углей различных марок при температурах 40 °С и 80 °С. Обобщая эти данные для различных V^r , нами получены зависимости:

- для температуры 340 К

$$\frac{C_{CO}}{\Delta C_{O_2}} = (0,0001V^T + 3 \cdot 10^{-5})t^{-0,003V^T+0,384}, \quad (21)$$

- для температуры 380 К

$$\frac{C_{CO}}{\Delta C_{O_2}} = 0,007t^{0,18+0,004V^T}. \quad (22)$$

Будем сравнивать найденные по этим формулам параметры $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$, зависящие от времени, с данными, вычислениями по формулам (5 – 21) для температур и времен с целью нахождения взаимосвязи $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$ с температурой очага самонагревания.

Выполним расчеты на примере шахты «Комсомолец». Для температуры 340 К и ΔC_{O_2} (по формулам 4 – 20) имеем:

- по формуле (21) с использованием $t = 525$ ч, соответствующего температуре 340 К (табл. 2)

$$\frac{C_{CO}}{\Delta C_{O_2}} = (0,0001 \cdot 30 + 3 \cdot 10^{-5})340^{-0,003 \cdot 30+0,384} = 0,0168.$$

Принимая согласно табл. 2 $\Delta C_{O_2} = 0,184$ моль/м³, имеем $C_{CO} = 0,0168 \cdot 0,184 = 0,0031$ моль/м³.

- по формуле (22) с использованием $t = 650$ ч, соответствующим температуре 380 К (табл. 2)

$$\frac{C_{CO}}{\Delta C_{O_2}} = 0,007 \cdot 650^{0,18+0,004 \cdot 30} = 0,049.$$

Принимая согласно табл. 2 $\Delta C_{O_2} = 0,268$ моль/м³, имеем $C_{CO} = 0,049 \cdot 0,268 = 0,013$ моль/м³.

Полагаем, что концентрации C_{CO} изменяются синхронно с концентрациями ΔC_{O_2} . Тогда для других значений T и t получим величины C_{CO} , представленные в табл. 2. В этой же таблице представлены расчетные значения $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$ для изученного диапазона температуры.

Таким образом, с помощью теоретических зависимостей процесса низкотемпературного окисления углей и опытных данных изменения содержания C_{CO} и ΔC_{O_2} возможно находить температуры очага по соотношению $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$. В табл. 3 даны для сравнения расчеты температуры по предлагаемому методу и по соотношению неперелых углеводов.

Таблица 3 – Сравнения расчетных величин температуры очага самовозгорания угля марки Ж по соотношениям $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$ и $C_{ЭТ}/C_{ац}$

Температура, К	340	350	360	370	380	390
$C_{CO}/\Delta C_{O_2}$	0,02	0,028	0,037	0,043	0,048	0,05
$C_{ЭТ}/C_{ац}$	1	2	3	4	5	6
$\frac{C_{ЭТ}/C_{ац}}{C_{CO}/\Delta C_{O_2}}$	100	72	81	93	104	120

Довольно близкое соотношение прогноза температур по обеим методикам свидетельствует в пользу верности расчетов температур самонагревания угля по предлагаемому методу.

Предложенный расчет температур по соотношению $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$, представленный в таблице 2, позволяет также определить время от начала зарождения очага до момента замеров температур в шахте. Так, используя данные таблицы 2, найдем связь T со временем, которая для угля марки Ж имеет вид кривой (рис. 4).

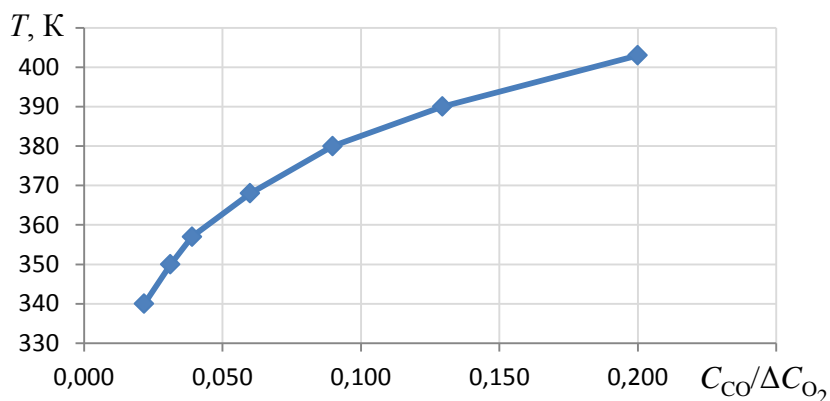


Рисунок 4 – Изменение температуры очага самонагревания угля марки Ж во времени с начала его зарождения согласно расчету по соотношению $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$

Аналогичным образом могут быть сделаны вычисления и получены температуры и время зарождения очага пожара для всех других типов угля.

Выводы. Предложен метод определения температуры очага самонагревания угля и времени его образования по анализу пожарных газов на окись углерода и убыль кислорода на окисления путем разработки математической модели процесса и использования экспериментальных данных НИИГД и ФРГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашковский П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 791 с.
2. Кучер Р.В. Структура ископаемых углей и их способность к окислению / Р.В. Кучер, В.А. Компанец, Л.Ф. Бугузова. – Киев: Наук. думка, 1980. – 168 с.
3. Линденау Н.И. Происхождение и тушение эндогенных пожаров в угольных шахтах / Н.И. Линденау, В.М. Маевская, В.Ф. Крылов. – М.: Недра, 1977. – 320 с.
4. Неизотермическая кинетика гетерогенного окисления углей кислородом воздуха и их самонагревания / С.П. Греков, Я. Цыганкевич, Б.И. Кошовский, А.А. Березовский // Химия твердого топлива. – 2000. – № 6. – С.27 – 37.
5. Греков С.П., Пашковский П.С., Орликова В.П. Определение температуры самовозгорания угля по соотношению оксида углерода и убыли кислорода на аварийном участке // ВіТР. Безопасність і пожежна техніка. – Польща, 2(2015).
6. Греков С.П. Определение склонности углей к самовозгоранию / С.П. Греков, В.П. Орликова, А.А. Всякий // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, – 2014. – Вып. 51. – С. 88 – 99.

7. Греков С.П. Тепловой эффект окисления угля и эндогенная пожароопасность / С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова // Уголь Украины. – 2014. – № 10. – С. 46 – 50.
8. Пашковский П.С. О природе критической температуры самовозгорания угля / П.С. Пашковский, Б.И. Кошовский, В.Ф. Липницкий // Рабочее совещание по проблемам техник безопасности и охраны окружающей среды при подземной добыче угля: Докл. – Щирк, Польша, 1994. – С. 291 – 296.
9. Пашковский П.С., Греков С.П., Салахутдинов Т.Г. Расчет коэффициентов диффузии в углях с использованием хроматографического метода. // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, – 2014.
10. Греков. С.П. Динамика содержания кислорода в межкусковом пространстве скопления отторгнутого от массива угля и опасности его самовозгорания. / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында // Скорости и средства безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах // Ст. науч. тр. МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ, 2005. – С. 279 – 286.
11. Miinzner V.H., peters w. zur Kinetik der Kohleoxydation im Temperaturbereich 30 °C – 100 °C. Eingegangen am 26. August 1965. p. 399 – 407.

