

тоянном уровне: $\Delta t_r = 0$; $m = 70$ кг; $h = 170$ см; $\Delta t_n = 2,0$ °С. Кроме того, с целью упрощения работы пользователя для энергетической оценки нагрузки Φ_m вместо численных значений в компьютер вводится дискретно при помощи меню один из четырех ее уровней: отдых (160 Вт), работа средней тяжести (320 Вт), тяжелая работа (480 Вт) или очень тяжелая работа (640 Вт). Влияние на теплообмен дыхательного аппарата учитывается тепловым потоком Φ_d , заранее рассчитанным для трех возможных типов дыхательных аппаратов. На дисплей компьютера выводится таблица, в которой приводятся значения τ и τ_n для температуры воздуха от 25 до 50 °С через один градус. Таким образом, результаты данной работы позволяют детально проанализировать влияние на теплообмен организма человека многих факторов, а также определить значения безопасных параметров его работы при эрготермических нагрузках.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Городинский С.М., Кузнец Е.И., Малкиман И.И. и др. Физиологические критерии оценки теплового состояния человека в условиях нагревающего микроклимата// Медико-технические проблемы индивидуальной защиты человека. Сборник научных трудов. Выпуск 10.–М.: Медицина.–1972.–С. 3-9.*
2. *Шеррер Ж. Физиология труда: Перевод с франц. – М.: Медицина. – 1973. – 496 с.*
3. *Kerslake D. The stress of hot environment.– Great Britain. Cambridge: At the University Press.– 1972.– 355 p.*
4. *Einsatzdauer der Grubenwehr in Grubenbauen mit feuchtenwarmen Wetter: Technischer Schlussbericht/Forschungsinstitut des Steinkohlenbergbauvereins.– Essen, 1989.– 80 s.*
5. *ISO 7933. Ambiances thermiques chaudes – Determination analytique et interpretation la contrainte thermique fondees sur le calcul de la sudation requise. Premiere edition.– 1989–19 p.*
6. *ДНАОП 1.1.30–4.01–97 Устав ГВГСС по организации и ведению горноспасательных работ.– Киев. 1997.– 223 с.*
7. *Физиолого-гигиенические требования к изолирующим средствам индивидуальной защиты: Утв. Минздравом СССР 23.06.80/ М., 1981. – 28 с. УДК 614.84.*

УДК 614.841

В.Ю. Пудрик (Научно-исследовательский институт горноспасательного дела и пожарной безопасности «Респиратор»)

ЛОКАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ ОПАСНОСТИ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ В ШАХТНЫХ УСЛОВИЯХ

Теоретические и экспериментальные исследования процесса самонагревания угольного скопления с использованием горногеологических и горнотехнических условий разработки пластов, а также полученных в лабораторных условиях параметров массоотдачи, коэффициентов диффузии кислорода в углях, критических температур самовозгорания, инкубационных периодов позволили разработать метод локального прогноза опасности самовозгорания угля в шахтных условиях. Предложены новые зависимости расчета критического размера угольного скопления и инкубационного периода

Исследованиями процессов, приводящих к самовозгоранию угля в шахтах, установлено, что возникновение эндогенного пожара возможно при одновременном осуществлении следующих трех условий:

- уголь должен быть склонным к самовозгоранию;

- к скоплениям угля должен поступать кислород;
- условия, в которых находится окисляющийся уголь, должны быть благоприятными для накопления теплоты реакции взаимодействия кислорода с углем.

Эти основные физические условия самовозгорания угля сформулированы и обоснованы в работах В.С. Веселовского [1-3].

К настоящему времени предложено большое количество методов оценки пожароопасности, которые можно разделить на следующие группы:

- эмпирические или практические;
- статистические;
- основанные на изучении отдельных факторов пожароопасности;
- комбинированные.

Однако практически все известные методы прогноза пожароопасности не являются универсальными и не могут, без соответствующих уточнений, использоваться для оценки пожароопасности угольных скоплений, находящихся в других условиях. Они не учитывают динамику пожароопасности в пределах выемочного участка.

Принцип, который положен в основу разрабатываемого метода прогноза эндогенной пожароопасности угля в пределах выемочного участка в процессе ведения горных работ, заключается в определении степени влияния горногеологических и горнотехнических факторов при отработке пластов угля. Это позволило разработать математическую модель процесса самонагрева угольного скопления в конкретных горно-геологических условиях с учетом физико-химических параметров окисления угля, возможные размеры и максимальную температуру скопления и сопоставить результаты с «критическими значениями» для данного угля.

Алгоритм прогноза опасности самовозгорания угля представлен на рисунке 1. Согласно алгоритму устанавливается склонность угля к самовозгоранию [4]. Затем выявляются возможные потери угля в пределах выемочного участка и, при их наличии, выполняется расчет критической мощности угольного скопления по формуле:

$$h_{кр} = 3 \cdot 10^{-23} \frac{\alpha_{\sigma} \sqrt{T_{кр} - T_{ок}}}{\beta_{\sigma}^{2/3} K_{10}^2 V_f}, \quad (1)$$

где α_{σ} - коэффициент теплообмена между слоем скопления угля и горными породами почвы и кровли, Вт/(м²·К); $T_{кр}$ - критическая температура самовозгорания угля, К; $T_{ок}$ - температура воздуха в месте контакта с поверхностью угля, К; β_{σ} - коэффициент массообмена, м/с; K_{10} - предэкспонента в реакции окисления кислорода углем, м³/(с·моль); V_f - скорость прососа воздуха через скопления угля, м/с; $h_{ф}$ - фактическая мощность оставшейся пачки угля, м.

При $h_{кр} \leq h_{ф}$ устанавливается распределение утечек воздуха в выработанном пространстве.

На линейные скорости воздуха в выработанных пространствах действующих очистных забоев наибольшее влияние оказывают схемы проветривания, способы управления горным давлением, степень обрушиваемости пород кровли, мощность пласта.

В Донецком бассейне мощности отрабатываемых пластов, как правило, колеблются в небольших пределах (1-2 м). Управление кровлей производится полным обрушением.

Поэтому, для исследования процесса массопереноса, целесообразно рассмотреть распределение линейных скоростей воздуха по выработанному пространству в зависимости от схем проветривания и типа пород кровли. Для этого были использованы материалы депрессионных съемок, выполненных работниками ВГСЧ.

Линейные скорости движения воздуха были определены для выемочных участков с породами кровли легкообрушивающимися, трудно обрушивающимися и средней обрушиваемости при прямоточной, возвратноточной на целик и возвратноточной на выработанное пространство схемах проветривания.

Эмпирические уравнения, описывающие распределение скоростей воздуха в выработанных пространствах действующих очистных забоев, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Эмпирические уравнения для расчета линейных скоростей воздуха в выработанных пространствах очистных забоев шахт

Степень обрушиваемости пород кровли	Скорость воздуха (V_0 , м/с) на различном расстоянии ($x, м$) от забоя
Возвратноточная схема проветривания на выработанное пространство	
Легкообрушивающиеся породы	$V_0=0,5e^{-0,0703x}$
Породы средней обрушиваемости	$V_0=0,6e^{-0,0667x}$
Труднообрушиваемые породы	$V_0=0,7e^{-0,0627x}$
Возвратноточная схема проветривания на целик	
Легкообрушивающиеся породы	$V_0=0,3e^{-0,0833x}$
Породы средней обрушиваемости	$V_0=0,4e^{-0,0847x}$
Труднообрушиваемые породы	$V_0=0,5e^{-0,0834x}$
Прямоточная схема проветривания	
Легкообрушивающиеся породы	$V_0=0,4e^{-0,0757x}$
Породы средней обрушиваемости	$V_0=0,5e^{-0,0732x}$
Труднообрушиваемые породы	$V_0=0,6e^{-0,0734x}$

Для трех способов управления кровлей были приняты следующие функции, характеризующие удельные аэродинамические сопротивления выработанного пространства:

а) полное обрушение:

$$r(x)=370 l^{0,014x}, \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}^5;$$

б) самообрушивание:

$$r(x)=231 l^{0,011x}, \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}^5;$$

в) частичная закладка:

$$r(x)=1670 l^{0,0107x}, \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}^5.$$

Полученные значения скоростей фильтрации использовались при расчетах для определения распределения температурных полей в выработанном пространстве и максимально возможных температур.

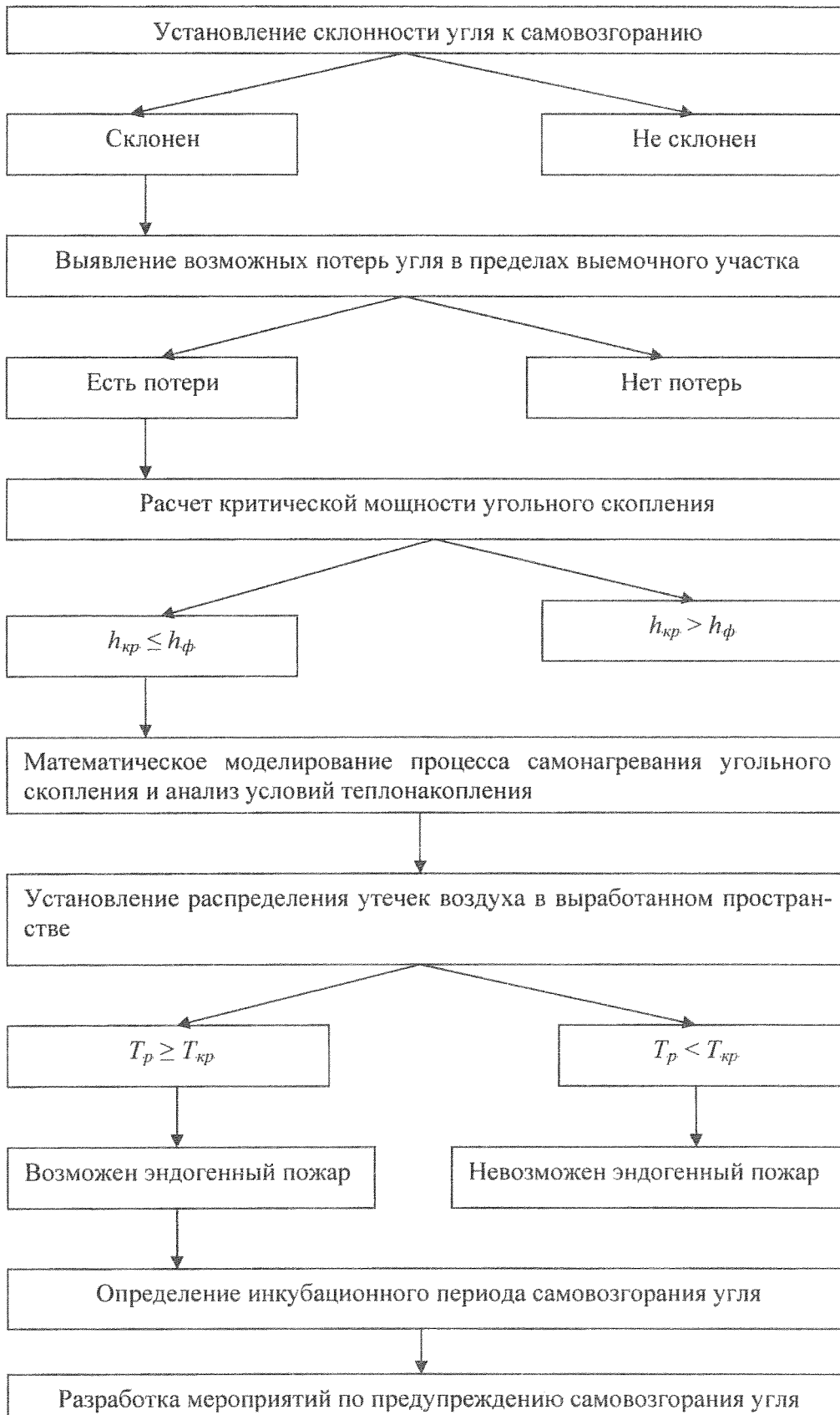


Рис. 1. Алгоритм прогноза опасности самовозгорания угля

В основе самовозгорания лежит окисление кислородом воздуха углей. В результате окисления химическая энергия угля превращается в тепловую. Если образующееся тепло не успевает рассеиваться в окружающее пространство, то уголь самонагревается и, когда его температура повышается до критического значения, происходит самовозгорание.

Накопление и рассеивание теплоты зависит от ряда горногеологических и горнотехнических условий. Например, при поступлении на выемочный участок большого количества воздуха есть возможность выноса тепла в окружающую среду. Не успевает накапливаться тепло и при большой скорости подвигания очистного забоя ($V > 50$ м/мес.).

Скорость накопления теплоты существенно зависит от химической активности угля, мощности пласта и литологии вмещающих пород.

Так, если вмещающими породами являются глинистые сланцы, теплопроводность которых близка к теплопроводности угля, то максимальная температура для данных значений параметров равна или превышает критическое значение, а если известняки и песчанистые сланцы – температура в скоплении угля не превышает 50°C , что объясняется значительно большей (в 5–10 раз) их теплопроводностью.

Следовательно, при прогнозе эндогенной пожароопасности должны учитываться как физико-химические, так и горногеологические и горнотехнические факторы. Причем они взаимосвязаны друг с другом. Поэтому комплексный показатель пожароопасности должен отражать совокупное влияние всех факторов. Таковым является температура T в скоплении угля.

Для приближенной оценки температуры угольного скопления можно использовать следующее выражение:

$$T_p = T_0 + 1,5 \cdot 10^{16} \cdot K \lambda_{\text{пор}}^{-0,64} \cdot \mathcal{G}^{1,4} \beta^{0,13} \cdot t^{0,4h}, \quad (2)$$

где T_0 – начальная температура угля, К; K – предэкспонента в уравнении реакции кислорода с углем, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{моль})$; $\lambda_{\text{пор}}$ – коэффициент температуропроводности пород, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; \mathcal{G} – скорость прососа воздуха через угольное скопление, м/с; β – коэффициент массоотдачи, м/с; h – толщина угольного скопления, м; t – время от начала процесса самонагревания угля, сут.

При $T_p \geq T_{\text{кр}}$ возможен эндогенный пожар. Поэтому целесообразно установить инкубационный период самовозгорания угля.

Из уравнений теплового баланса для адиабатического процесса и теплоты, выделившейся на нагревание, испарения воды и десорбцию метана определено время инкубационного периода самовозгорания угля:

$$t_u = 1,16 \cdot 10^{-5} \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5}{Q \bar{c} \sigma \bar{k} \alpha}, \quad (3)$$

где Q_1, Q_2, Q_3 – соответствующие теплоты, необходимые для нагревания угля, влаги и воздуха, идущего на окисление, от температуры вмещающих пород (T_0) до критической температуры самовозгорания угля ($T_{\text{кр}}$), Дж; Q_4, Q_5 – соответствующие теплоты десорбции метана и испарения воды, Дж; Q – теплота, выделяющаяся в результате поглощения углем 1 см^3 кислорода, Дж/см³; \bar{c} – средняя объемная доля кислорода в смеси его с газом-носителем или в воздухе; σ – средний объем смеси дозы кислорода с газом-носителем, см³; \bar{k} – средняя логарифмическая константа скорости окисления, с⁻¹; α – коэффициент снижения концентрации кислорода за счет температурного расширения и разбавления воздуха парами воды и метаном.

Количество теплоты Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 определяется из следующих выражений:

$$Q_1 = \Delta T c_y q (1 - 10^{-2} W^r); \quad (4)$$

$$Q_2 = 10^{-2} \Delta T W^r c_w q; \quad (5)$$

$$Q_3 = \frac{2,66 \cdot 10^{-4} \Delta T S c_p}{Q}; \quad (6)$$

$$Q_4 = 0,74 q x; \quad (7)$$

$$Q_5 = 10^{-2} q W^r \lambda, \quad (8)$$

где $\Delta T = T_{кр} - T_0$ – разность между критической температурой самовозгорания угля и температурой вмещающих пород, К; c_y – удельная теплоемкость угля, Дж/г·К; q – навеска угля в хроматографической колонке, г; W^r – влажность угля, %; c_w – удельная теплоемкость воды, Дж/(г·К); $S = Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_5$; c_p – удельная теплоемкость воздуха, Дж/моль·К; x_l – природная газоносность, $\text{дм}^3/\text{кг}$; λ – удельная теплота испарения влаги, Дж/г.

Теплоту, выделяющуюся в результате окисления угля Q , определяют на микрокалориметре ДАК-1-1. В случае отсутствия калориметрических данных Q можно принять равным $12 \text{ Дж}/\text{см}^3$. Среднюю объемную долю кислорода можно принять равной $0,126$ исходя из того, что в поступающем на окисление воздухе его объемная доля $0,21$, а наиболее пожароопасной скоростью фильтрации считается та скорость, при которой в воздухе на выходе из скопления угля объемная доля кислорода в пять раз меньше, чем в поступающем воздухе, т.е. $0,042$.

Среднее значение σ рассчитывают из выражения:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \quad (9)$$

где σ_1 и σ_2 – объем смеси дозы кислорода с газом носителем на входе в хроматографическую колонку и на выходе из нее, соответственно, см^3 .

Поскольку константа скорости окисления изменяется с температурой по логарифмическому закону, то в формулу (3) необходимо взять ее среднее логарифмическое значение между константами скорости окисления при критической температуре ($k_{кр}$) и температуре вмещающих пород (k_0):

$$\bar{k} = \frac{k_{кр} - k_0}{\ln k_{кр} - \ln k_0}. \quad (10)$$

Коэффициент снижения концентрации кислорода за счет температурного расширения и разбавления воздуха парами воды и метаном рассчитывается из выражения:

$$\alpha = \frac{595 S_l}{[2,18 S_l + (4,55 q W^r + 0,366) Q] T_{кр}} \quad (11)$$

где $S_j = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$.

Константа скорости окисления рядового угля, критическая температура самовозгорания угля и тепловой эффект окисления определяются по данным лабораторных испытаний проб угля.

Для определения инкубационного периода самовозгорания угля, образовавшегося в результате внезапного выброса, необходимо константу скорости окисления, входящую в знаменатель уравнения (3), умножить на коэффициент β , который учитывает разность во фракционных составах выброшенного угля и угля, взятого для определения константы скорости окисления. Для определения этого коэффициента необходимо доставленный из шахты уголь тщательно перемешать, отобрать из него пробу угля массой не менее 200 г и определить ее гранулометрический состав, рассеяв на следующие фракции, мм: 10,0...20,0; 5,0...10,0; 3,0...5,0; 2,5...3,0; 2,0...2,5; 1,0...2,0; 0,5...1,0; 0,2...0,5; 0,1...0,2; 0...0,1. После этого определить массу каждой фракции и рассчитать коэффициент β из выражения:

$$\beta = \sum_i \frac{D_c m_i}{D_i \cdot m} \quad (12)$$

где D_c – средний диаметр частиц угля, который был взят для определения константы скорости окисления, мм; m_i – масса данной фракции, г; m – масса угля взятого для рассеивания, г; D_i – средний диаметр данной фракции, мм.

В зависимости от длительности инкубационного периода разрабатываются мероприятия по предупреждению самовозгорания угля.

Опытно-промышленная проверка метода локального прогноза опасности самовозгорания угля проведена на 17 шахтах Донбасса в 2000-2003 гг. На этих шахтах отработано 25 очистных забоев по которым выполнен прогноз эндогенной пожароопасности и определены критические температуры самовозгорания угля и максимально возможные.

Всего в 25 очистных забоях возникло два эндогенных пожара, в 81-й западной лаве пласта I₄ шахты "Черноморка" ГХК "Лисичанскуголь" и 7-й западной лаве пласта h₁₀ шахты "Глубокая".

81-я западная лава пласта I₄ отработывалась буровзрывным способом. Мероприятиями предусматривалось ограждение части выработанного пространства от попадания выброшенного угля во время взрывных работ, а отбитый уголь должен быть убран в течение суток. Пожар возник из-за оставленного отбитого угля в выработанном пространстве лавы, т.е. из-за некачественного выполнения профилактических мероприятий.

На шахте "Глубокая" эндогенный пожар возник в полости выброшенного угля вследствие некачественной изоляции.

Таким образом, из 25 отработанных участков на двух возникли эндогенные пожары, что свидетельствует о достаточной надежности разработанного метода локального прогноза опасности самовозгорания угля ($k_n=0,92$).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Веселовский В.С., Алексеева Н.Д., Виноградова Л.П., Орлеанская Г.А., Терпюгосова Е.А. Самовозгорание промышленных материалов. – М.: Наука, 1964. – 246 с.
2. Веселовский В.С., Орлеанская Г.Л., Терпюгосова Г.А., Виноградова Л.П., Алексеева Н.Д. Научные основы борьбы с самовозгоранием углей. – М.: Наука, 1964. – 208 с.
3. Веселовский В.С. Прогноз и профилактика эндогенных пожаров // Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского. – М., 1972. – Вып. 947. – С. 113-117.
4. КД 12.01.04.009-2000 Склонность к самовозгоранию углей, шахтных пород и отходов углеобогащения. Методика определения. – Донецк, 2000. – 28 с.