

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ НАГРЕВАНИИ И ВОСПЛАМЕНЕНИИ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ, НАХОДЯЩИХСЯ В МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В РАЙОНЕ ОЧАГА ПОЖАРА

¹**Минеев С.П., ¹Демченко С.В.**

¹*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины*

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ ПРИ НАГРІВАННІ І ЗАЙМАННІ ВУГІЛЬНИХ ЧАСТИНОК, ЯКІ ЗНАХОДЯТЬСЯ У МЕТАНО-ПОВІТРЯНІЙ СУМІШІ В РАЙОНІ ОСЕРЕДКУ ПОЖЕЖІ

¹**Мінєєв С.П., ¹Демченко С.В.**

¹*Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України*

MODELING OF PROCESSES OCCURRED DURING HEATING AND IGNITION OF COAL PARTICLES IN METHANE-AIR MIXTURE IN THE AREA OF FIRE

¹**Minieiev S.P., ¹Demchenko S.V.**

¹*Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine*

Аннотация. Изучение процессов горения при высокой температуре связано с двумя основными проблемами. Первой из них является определение состава и количества возможных продуктов горения, а также выяснение термодинамических свойств смеси при различных условиях горения. Второй проблемой является определение количества тепла, выделенного при горении, максимальной достижимой температуры горения или работы, которая может быть получена при соблюдении установленных упрощений и при условиях, в которых происходит горение.

При выполнении в шахтных условиях работ по тушению и оценке процесса развития пожаров большое значение уделяется прогнозу температурных показателей в очаге пожара. Эти показатели являются важными для фактической оценки состояния среды в очаге его тушения, поскольку являются контрольными для определения остывания пород массива и, в конечном счете, косвенно оценивают факт потухшего пожара.

В статье приводится методика расчета параметров процесса горения твердого топлива, которая основывается на результатах теоретических и экспериментальных исследований в области теории горения пылевидного топлива. При расчете параметров процесса горения определяются: теоретический расход воздуха, необходимого для сгорания единицы количества топлива; объем продуктов сгорания; состав продуктов сгорания; энтальпия продуктов сгорания при требуемых температурах и избытках воздуха, а также калориметрическая и теоретическая температуры сгорания твердого топлива.

Используя известные зависимости, обоснован прогноз температуры в зоне пожара для дальнейших разработок новых и усовершенствования существующих способов.

Рассмотрен ряд разработанных предложений по усовершенствованию оценок параметров состояния горного массива в процессе тушения пожара.

В лабораторных условиях предлагается дополнительно до пожара в качестве, например, профилактических мероприятий при определении индикаторных газов и оценивая их динамику отбирать пробы угля, которые в муфельных печах постепенно нагревают до возгорания угля и оценивают динамику по лабораторному эксперименту, а затем по динамике изменения фактически измеренных индикаторных газов определяют реальное состояние пожара. Это предложение не является нормативным, требует доработки, промышленной проверки и обсуждения.

Ключевые слова: угольные частицы, прогноз температуры, очаг пожара, теплообмен, воздух, состав атмосферы.

При выполнении работ по тушению пожара в шахтах и при оценке процесса его развития большое значение уделяется прогнозу температурных показателей в очаге пожара. Эти показатели являются важными для фактической оценки состояния среды в очаге его тушения, поскольку являются

контрольными для определения остывания пород массива и, в конечном счете, косвенно оценивают факт наличия или отсутствия пожара.

Поэтому оценка температуры в районе очага пожара является актуальной. Авторами данной статьи на основе известных зависимостей произведена попытка подготовить обоснование прогноза температуры в зоне пожара для дальнейшей разработки новых и усовершенствования существующих способов прогноза. Следует отметить, что в последнее время выполнено большое количество исследований разными авторами на данную тему [1-6]. Как известно, при рассмотрении нагрева и остывания горного массива необходимо учитывать анизотропность его теплофизических свойств, поскольку они неодинаковы по различным направлениям, как вдоль угольных пластов и вмещающих пород, так и по кливажу или вкрест ему. На рассматриваемые процессы в горном массиве большое влияние также оказывает тип источника горения: точечный, линейный или объемный. Так, к примеру, при точечном источнике горения (метана или угля в выработанном пространстве) независимо от времени горения процесс остывания массива, желательно по возможности, рассматривать в трех измерениях, а при линейном источнике горения (древесины или конвейерной ленты в горной выработке) - в двух или одном измерении в зависимости от конкретной аварийной ситуации.

Как известно [1, 2, 4], процесс остывания массива берет начало с момента прекращения горения (пламенного - при концентрации кислорода менее 10 %, тления – при концентрации кислорода – 2...3 %). Размеры очага пожара, а, следовательно, и тип источника горения, определяются по данным разведки, лабораторного анализа проб воздуха и т.д. А продолжительность горения устанавливается с момента возникновения пожара до его ликвидации, как при активном способе тушения, так и средствами изоляции с применением вентиляционного воздействия: путем выравнивания давления; рециркуляции пожарных газов или многократного местного реверсирования вентиляционных струй.

С учетом изложенного ниже приведена методика и результаты моделирования процесса воспламенения угольной частицы в метановоздушном потоке.

Как известно, твердые топлива можно рассматривать с той же самой точки зрения, что и обычные жидкие и газообразные топлива. Многие характеристики процесса горения твердых топлив, в нашем случае углепородного материала, размещенного в выработанном пространстве, подобны характеристикам жидких и газообразных топлив. Важными характеристиками являются количество энергии, выделяемой в результате химической реакции, температура пламени, а также природа продуктов сгорания и тяга, зависящая от количества движения потока метановоздушных газов [7-10].

Так, изучение горения углерода в камере сгорания показало, что окисление сопровождается газификационным процессом. Процесс сгорания углерода протекает по следующим первичным реакциям



Многочисленными опытами доказано, что углекислота CO_2 и окись углерода CO образуется одновременно. Количественное соотношение CO и CO_2 зависит от режимных условий. Так, при температуре до 1570 К отношение $CO:CO_2 = 1$, а при повышении температуры оно увеличивается [6 - 8].

Почти всегда при горении углерода, кроме первичных реакций, протекают и вторичные



Из написанных выше реакций три являются гетерогенными, а последняя – гомогенной. Следует отметить, что частичка угля, движущаяся в метановоздушном потоке полости сгорания, быстро разогревается и из неё бурно выделяются летучие вещества, сгорающие в пожарном объёме. Процесс горения обычно условно разбивается на две стадии: подогрев смеси воздуха и угольной пыли до температуры воспламенения (с одновременным пирогенетическим разложением топлива) и собственно процесс горения летучих и кокса. На поверхности частицы одновременно горит и газифицируется кокс (углерод). Скорость прогрева и окисления кокса зависит от удельной поверхности взвешенного топлива, которая очень велика. Так, например, удельная поверхность угля при диаметре частиц $d = 30$ мкм составляет $50 \text{ м}^2/\text{кг}$, что в 1000 раз превышает удельную поверхность кускового угля (отдельные куски диаметром $30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$).

Воспламенение твёрдых топлив во многом зависит от тех же факторов, которые являются важными при воспламенении жидких и газообразных топлив. Топливо и окислитель получают энергию от источника воспламенения до тех пор, пока температура станет такой, что реакция сможет пойти самопроизвольно. Температура, при которой происходит воспламенение, в большей степени определяется скоростями реакций. Процесс воспламенения может осуществляться либо путём использования местных источников энергии высокой интенсивности, например таких, как взрыв, искра, нагретый стержень или химический воспламенитель, либо путём использования большого количества тепла при наименьшем уровне энергии, например при нагревании топливо-воздушной смеси стенками камеры сгорания. Энергия, требующаяся для воспламенения, будет функцией типа топлива, формы камеры сгорания, а также источника воспламенения.

Общее количество тепла, отданное пожаром горному массиву, определяется известными методами по данным расхода воздуха или его утечках через изолированный участок, а также по данным анализа состава атмосферы воздуха на исходящей вентиляционной струе. Учитывая изложенное, рассмотрим такую физику процесса. В ней будем рассматривать процесс остывания горного массива с анизотропными теплофизическими свойствами в n -мерном пространстве, описываемый нижеприведенным уравнением [1 - 4]

$$\frac{dT}{d\tau} = \sum_{i=1}^n a_i \frac{d^2T}{dx_i^2}, \quad (1)$$

где T – температура пород, К; a_i – коэффициент температуропроводности пород в зависимости от направления, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – время с момента прекращения горения, с; x_i – пространственная координата, м; n – общее число взаимно перпендикулярных направлений или координат ($i = 1, 2, \dots, n$).

В случае трех направлений ($n = 3$) в изотропной среде ($a_1 = a_2 = a_3 = a$) получим обычно используемое уравнение теплопроводности

$$\frac{dT}{d\tau} = a \left(\frac{d^2T}{dx_1^2} + \frac{d^2T}{dx_2^2} + \frac{d^2T}{dx_3^2} \right),$$

которое аналогично (1) может быть представлено в виде

$$\frac{dT}{d\tau} = a \sum_{i=1}^3 \frac{d^2T}{dx_i^2}.$$

Воспламеняемость пылевого облака угля, содержащего частицы различных размеров, будет, в большей степени, определяться частицами наименьших размеров, так как они воспламеняются наиболее легко.

Получение твёрдым топливом тепла от газа и стенок полости сгорания (подогрев холодного топлива до температуры воспламенения) в результате излучения и теплопроводности является существенным не только для процесса воспламенения, но также и для самого процесса горения. Вопрос теплопроводности углепородного материала является весьма серьезным в понимании всего процесса. Поэтому далее проведены теоретические и экспериментальные исследования. Теоретические исследования по вопросу теплового воспламенения основаны на упрощённых моделях этого процесса. Ниже будет рассматриваться главным образом процесс воспламенения одной частицы угля в отличие от более общей проблемы воспламенения пылевых облаков.

Математическое моделирование процесса теплового воспламенения сферической угольной частицы, взвешенной, например, в потоке высокотемпературного газа, основывалось на решении уравнений теплообмена в сопряжённой постановке, т.е. одновременно для газовой и твёрдой фаз. Весьма важным упрощением задачи может быть предположение о том, что газовая и твёрдая фазы находятся в динамическом равновесии, т.е. у них нет запаздывания по скорости. Тогда время пребывания твёрдой фазы в полости горения можно приравнять времени пребывания продуктов сгорания.

Количества тепла, поглощённого твердой частицей в полости горения (проявляющегося в повышении температуры частицы), складывается из двух частей: тепла, передаваемого в результате непосредственного соприкосновения газа и твёрдой частицы или так называемой конвективной части, и тепла, передаваемого путём излучения газа или так называемой радиационной (лучистой) части. Отсюда

$$q_T = q_k + q_p; \quad T_T = T_k + T_p \quad (2)$$

где q_k и q_p – конвективный и радиационный тепловые потоки, Вт; T_k и T_p – конвективная и радиационная температуры частицы, К.

Расчёт температуры путём конвекции между частицами угля и газом проводился на основе рассмотрения энергетического баланса приравниванием скорости увеличения количества внутренней энергии частицы и скорости передачи тепла от газа к частице [6, 9]:

$$\left(\frac{4}{3} \pi r_T^3 \rho_T \right) c_T \frac{dT_T}{d\tau} = \alpha_T (4\pi r_T^2) (T_G - T_T), \quad (3)$$

или

$$\frac{dT_T}{d\tau} = \frac{3\alpha_r}{r_T \rho_T c_T} (T_G - T_T), \quad (4)$$

где τ – время пребывания твёрдых частиц в камере сгорания, с; r – радиус твердой частицы, м; ρ – плотность твердой частицы, кг/м³; c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); T – температура, К; α – коэффициент теплоотдачи от газа к частице, Вт/(м²·К). Индексы: G – газ; T – твёрдая частица.

После интегрирования уравнение (4) принимает вид

$$\frac{T_G - T_{T.H.}}{T_G - T_T} = \exp\left(\frac{3\alpha_T \tau}{\rho_T r_T c_T}\right), \quad (5)$$

где $T_{T.H.}$ – температура твёрдой частицы в начале полости сгорания, К.

Радиационная температура частицы определяется из уравнения скорости подвода энергии излучением

$$\frac{dE_{II}}{d\tau} = 4\pi r_T^2 \varepsilon_T \varepsilon_G c_0 T_G^4, \quad (6)$$

где ε_T и ε_Γ – коэффициенты соответственно черноты частицы и излучательной способности газа; $c_0 = 5,76 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела.

Для сферических частиц скорость нарастания температуры

$$\frac{dT_T}{d\tau} = \frac{3\varepsilon_T\varepsilon_\Gamma c_0 T_\Gamma^4}{\rho_T c_T r_T}. \quad (7)$$

Интегрируя от начальной температуры $T_{T.H.}$ до температуры T_T , по истечении времени τ получаем

$$T_T = T_{T.H.} + \frac{3\varepsilon_T\varepsilon_\Gamma c_0 T_\Gamma^4 \tau}{\rho_T c_T r_T}. \quad (8)$$

Угольные частицы, находящиеся в полости горения вместе с воздухом, участвуют в реакции окисления и могут приобретать температуру, равную температуре продуктов сгорания. Поэтому первостепенной задачей является определение температуры твёрдой фазы на входе в полость горения.

Время пребывания угольной частицы в полости горения будем находить из соотношения [10]

$$\tau = \frac{V_\kappa P_\kappa}{RT_\Gamma m_\Gamma}, \quad (9)$$

где V_κ – объём камеры сгорания, м³; P_κ – давление газа в камере сгорания, Па; $R = 8,314$ Дж/(кг·К) – удельная газовая постоянная; m_Γ – расход газа, кг/с.

Для генератора тепла ТБВ-56 (показатели: $m_\Gamma=0,06$ кг/с; $T_\Gamma=2170$ К; $\alpha_\Gamma=5000$ Вт/(м²·К); $W_\Gamma=54,5$ м/с; $d_{кр}=16 \cdot 10^{-3}$ м; $d_\kappa=39 \cdot 10^{-3}$ м; $l_\kappa=0,25$ м) время пребывания угольной частицы диаметром $d_T=0,05 \cdot 10^{-3}$ м в камере сгорания равно $4,5 \cdot 10^{-3}$ с. Тогда конвективная и радиационная температуры частицы, вычисленные по формулам (5) и (8), равны соответственно 1515 К и 360 К, а температура, которую приобретает угольная частица в полости горения, $T_T=1875$ К (рисунок 1).

Уравнение (9) показывает, что с уменьшением радиуса частицы скорость подвода тепла увеличивается и, естественно, возрастает температура нагрева частиц. Как показали расчеты, температура горения самых малых угольных частиц, которые могут быть применены в качестве топлива для потока тепла, не достигает в полости температуры горения, например, пылевоздушной смеси ($T_{max}=1970$ К) (рисунок 2).

Представляет интерес определение времени пребывания угольных частиц в полости генерирования тепла при условии их полного сгорания, когда температура продуктов сгорания приблизительно составляет $T_\Gamma \approx 1800$ К.

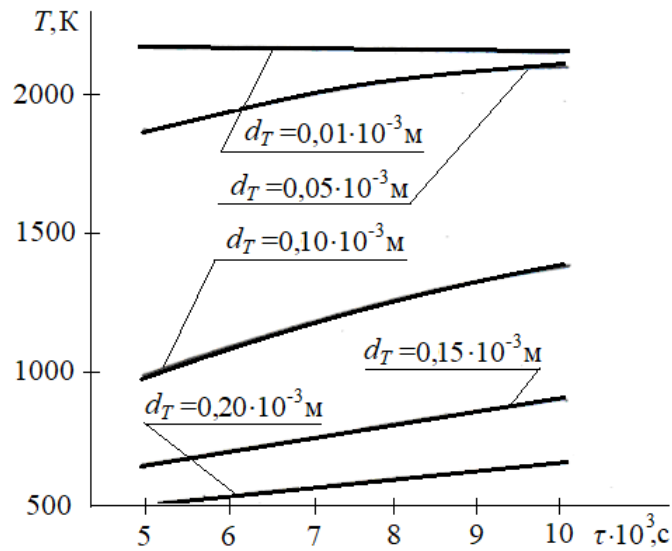


Рисунок 1 – Зависимость температуры угольной частицы от ее размера и времени нагрева в камере сгорания

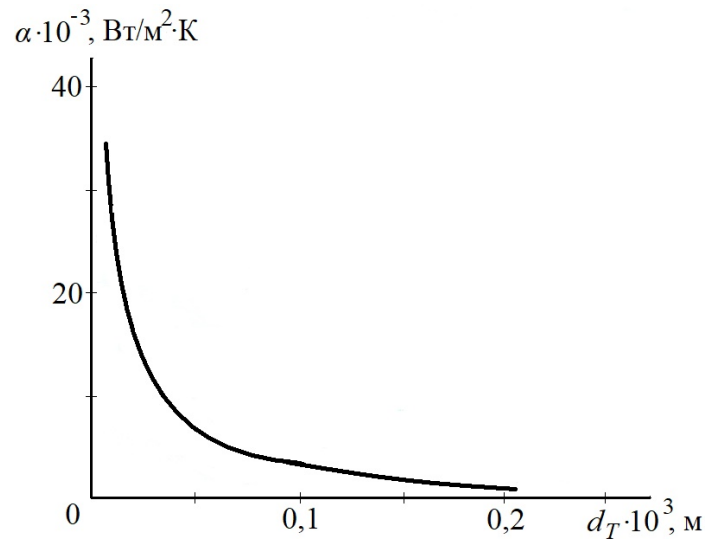


Рисунок 2 – Зависимость скорости подвода тепла от газа к частице от ее размера

Время пребывания частиц в полости горения состоит из времени нагрева до температуры воспламенения частицы и собственно времени горения угольной частицы с образованием CO_2 .

Время нагрева угольных частиц до температуры воспламенения $T_{\text{в}}=980\text{K}$ [10] определяется из уравнения (9), которое записывается в виде

$$\ln \frac{T_{\Gamma} - T_{T.H.}}{T_{\Gamma} - T_T} = \frac{3\alpha_{\Gamma}\tau}{\rho_T r_T c_T}. \quad (10)$$

Коэффициент теплоотдачи от газа к угольным частицам определяется из уравнения

$$Nu = 2 + c Re_T^n Pr^m, \quad (11)$$

где c , m , n - сохраняют постоянное значение в определенном диапазоне чисел Рейнольдса Re_T ; Nu , Pr – критерии Нуссельта и Прандтля.

При низких концентрациях материала, когда столкновения между частицами в потоке незначительно влияют на скорость мелких частиц и, следовательно, относительная скорость последних невелика, конвективная составляющая в уравнении (11) для частиц размером до 200 мкм не играет существенной роли, и в этом случае можно принимать $Nu=2$. Тогда при изменении α_T от 1000 до 5000 Вт/(м²·К) (реальный случай при работе термоинструмента ТБВ-56 на различных режимах) время нагрева угольных частиц диаметром $d_T=0,05 \cdot 10^{-3}$ м уменьшается от 0,0113 до 0,0023 с. При этом длина камеры сгорания составит соответственно 0,615 м и 0,125 м.

Время горения угольных частиц размером $d_T=0,05 \cdot 10^{-3}$ м составляет 0,055 с [9]. Следовательно, общее время пребывания угольной частицы в камере до ее полного сгорания равно 0,06 с, а длина камеры сгорания составит $l_k=3,27$ м.

Расчеты показывают, что в камере сгорания генератора тепла ТБВ-56 ($l_k=0,25$ м) не происходит полное сгорание частиц угля. Производство генератора тепла с камерой сгорания длиной $l_k=3,27$ м нецелесообразно ввиду невозможности организации ее надежного воздушного охлаждения.

Существуют условия, при которых достигается полное сгорание твердого топлива в полости.

Подача в полость горения дополнительного окислителя воздуха будет по возможности способствовать завершению процесса окисления углерода до образования CO_2 с максимальной температурой $T_{max} \geq 2000$ К. Далее рассмотрим упрощенную методику прогнозной оценки температуры в очаге шахтного пожара.

После выполнения ряда преобразований и с учетом мощности шахтного пожара получим решение уравнения (1) в виде [1, 2]

$$T = \frac{T_1 - T_0}{(4\pi\tau)^{n/2}} \prod_{i=1}^n (l_i / a_i^{1/2}) \exp \left[- \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^0)^2 / (4a_i\tau) \right]. \quad (12)$$

где T_1 - температура в очаге пожара, К; T_0 - температура окружающих пород, К; П – символ произведения; l_i - размеры очага пожара вдоль координат, м.

Проверим, сохраняется ли количество тепла, отданное массиву очагом пожара, в анизотропном пространстве, для чего проинтегрируем решение уравнения (12) по всем направлениям по x_i от $-\infty$ до $+\infty$ и получим [2, 4, 8]

$$\int_{-\infty}^{\infty} T dx_1 dx_2 \dots dx_n = (T_1 - T_0) \prod_{i=1}^n l_i \cdot \prod_{i=1}^n \frac{1}{2\sqrt{\pi a_i \tau}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-(x_i - x_i^o)^2 / (4a_i \tau)\right] dx_i. \quad (13)$$

Так как все интегралы в правой части равенства (6) равны единице под знаком символа Π , то количество тепла, отданное очагом пожара, сохраняется и в анизотропном пространстве и равно первоначальному значению

$$\int_{-\infty}^{\infty} T dx_1 dx_2 \dots dx_n = (T_1 - T_0) \cdot \prod_{i=1}^n l_i. \quad (14)$$

Покажем, что используя фундаментальное решение (12) можно составить их комбинацию с тем, чтобы удовлетворить не только уравнению (1), но и граничным условиям. Далее рассматривается задача теплопроводности в полупространстве, в котором координата x_1 меняется от 0 до ∞ . Тогда на границе (при $x_1=0$), можно задать некоторые условия. Такими условиями будут [2]:

- равенство температуры на стенках массива и в окружающем его воздухе

$$T|_{x_1=0} = T_0, \quad (15)$$

- теплоизоляция массива

$$\left. \frac{dT}{dx_1} \right| = 0, \quad (16)$$

- равенство тепловых потоков на контакте массива с воздухом

$$\lambda_1 \left. \frac{dT}{dx_1} \right|_{x_1=0} = \alpha_1 (T|_{x_1=0} - T_0), \quad (17)$$

где λ_1 - коэффициент теплопроводности массива в направлении координаты x_1 , Вт/(м·К); α_1 - коэффициент теплообмена воздуха с массивом, Вт/(м²·К); T_0 - температура воздуха на контакте с массивом, К.

Очевидно, граничное условие (17) является наиболее общим. Так, при интенсивном теплообмене воздуха с массивом ($\alpha_i \rightarrow \infty$), получим первое граничное условие (15), а при отсутствии теплообмена ($\alpha_i = 0$) - второе граничное условие (16).

Рассмотрим задачу нагрева и остывания массива сначала для одного измерения $n=1$ с последующим обобщением полученных результатов для n -мерного пространства.

Во время горения примем температуру воздуха T_g равной температуре горения T_1 , и вместо условия (15) будем иметь

$$T(0, \tau) = T_1. \quad (18)$$

Начальную температуру массива или окружающих воздух пород примем равной

$$T(x_1, 0) = T_0. \quad (19)$$

Решение уравнения (1) при $n=1$ и краевых условиях (18) и (19) имеет вид [11]

$$T(x_1, \tau) = T_1 - (T_1 - T_0) \Phi \left(\frac{x_1}{2\sqrt{a_1\tau}} \right), \quad (20)$$

где функция Φ представляет собой интеграл вероятности

$$\Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x_1}{2\sqrt{a_1\tau}}} e^{-r^2} dr. \quad (21)$$

По окончании горения распределение температуры в породе будет описываться зависимостью (20) при $\tau=\tau_c$

$$f(x_1) = T(x_1, \tau_c) = T_1 - (T_1 - T_0) \Phi \left(\frac{x_1}{2\sqrt{a_1\tau_c}} \right). \quad (22)$$

Это распределение температуры в породе является начальным условием для получения решения уравнения (1) на период остывания пород при $n=1: T(x_1, 0) = f(x_1)$.

Для практики особый интерес представляет остывание пород не в начальной, а в последующей и конечной стадиях тушения пожара, поэтому важно знать не начальное распределение температуры после окончания горения, а сколько в целом тепла получили породы.

Общее количество тепла за время горения $\tau=\tau_c$ аккумулировано с температурой $(T_1 - T_0)$ на площадке длиной

$$l_1 = 2\sqrt{\frac{a\tau_c}{\pi}}. \quad (23)$$

Приложим импульс тепла, равный G_z , к середине этой площадки

$$x_1^0 = \sqrt{\frac{a_1 \tau_z}{\pi}}. \quad (24)$$

После ряда преобразований с учетом того, что при максимальном теплообмене ($\alpha_i \rightarrow \infty$) имеем согласно (17) условие (15) и $B=-1$, а при отсутствии теплообмена ($\alpha_i=0$) имеем, согласно (17) условие (16) и $B=1$ получим

$$T(x_1, \tau) = T_0 + \frac{(T_1 - T_0)l_1}{2\sqrt{\pi a_1 \tau}} \left\{ \exp\left(-\frac{(x_1 - x_1^0)^2}{4a_1 \tau}\right) + B \cdot \exp\left(-\frac{(x_1 + x_1^0)^2}{4a_1 \tau}\right) \right\}, \quad (25)$$

где B - коэффициент, определяющий условия теплообмена воздуха с породами.

Проверим, насколько точно описывает решение (25) распределение температур в массиве при его остывании. Для этого используем известное решение уравнения (1) при $n=1$, если задано начальное условие прогрева массива на глубину l_1 [2]

$$T(x_1, 0) = T_1, \text{ если } 0 \leq x \leq l_1; \quad T(x_1, 0) = T_0, \text{ если } x > l_1. \quad (26)$$

Решение уравнения (1) с начальным условием (26) и граничным (16) имеет вид [11]

$$T(x_1, \tau) = T_0 + \frac{T_1 - T_0}{2} \left[\Phi\left(\frac{x_1 + l_1}{2\sqrt{a_1 \tau}}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - l_1}{2\sqrt{a_1 \tau}}\right) \right]. \quad (27)$$

Сравнивая два решения (25) при $B=1$ и (27) по данным табл. 1, приходим к выводу, что формула (25) с достаточной степенью точности (не более 5 % погрешности) описывает процесс остывания массива с источником тепловыделения сосредоточенным в середине отрезка $x_i^0 = 0,5l_1$.

Таблица 1 - Динамика остывания массива на его контакте с воздухом

$\sqrt{a_1 \tau} / l_1$	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	Данные расчета по формулам
$T - T_0 / T_1 - T_0$	0,843	0,650	0,520	0,359	0,276	0,223	(27)
	0,879	0,673	0,530	0,366	0,278	0,223	(25) при $B=1$

Из таблицы 1 следует, что, начиная со времени остывания $\tau \geq l_1^2/4a_1$, данные расчета по формуле (25) при $B=1$ практически ничем не отличаются от данных расчета по формуле (27), что позволяет использовать метод источников тепловыделения для прогноза температуры в очаге пожара.

Распространим полученные результаты на случай n -мерного анизотропного пространства. При распространении тепла только в одном направлении граничные условия (15) - (17) задаются в точке $x_1=0$. Если заданы две координаты x_1 и x_2 , то тепло будет распространяться в плоскости, а граничные условия задаются на прямой $x_1=0$. И, наконец, для трехмерного пространства граничные условия задаются на плоскости $x_1=0$. Используя решение (12) уравнения (1), удовлетворим условиям (15) - (17) и получим решение уравнения (1) аналогичное (25) для случая n -мерного анизотропного пространства. В частном случае, при $n=1$ из формулы (27) после преобразований поскольку

$$\exp[x_1 x_1^0/a_1\tau] \cdot \exp[-(x_1 - x_1^0)^2/4a_1\tau] = \exp[-(x_1 + x_1^0)^2/4a_1\tau].$$

Преобразуем его к более удобному виду

$$T = T_0 + \frac{T_1 - T_0}{(4\pi\tau)^{n/2}} \prod_{i=1}^n \left(\ell_i / a_i^{1/2} \right) \left\{ 1 + B \cdot \exp[-x_1 x_1^0 / a_1 \tau] \times \right. \\ \left. \times \exp\left[-\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^0)^2 / 4a_i \tau\right] \right\} \quad (28)$$

Как известно, в эпицентре тепловыделения, т.е. в точке с координатами $x_i = x_i^0$, температура пород при их остывании может быть определена согласно (28) по формуле

$$T = T_0 + \frac{T_1 - T_0}{(4\pi\tau)^{n/2}} \prod_{i=1}^n \left(\ell_i / a_i^{1/2} \right) \left\{ 1 + B \cdot \exp[-x_1^0^2 / a_1 \tau] \right\}. \quad (29)$$

Так как длина зоны горения по координатам x_i аналогично (23) равна

$$l_i = 2\sqrt{a_i \tau_c / \pi}, \quad (30)$$

то формула (29) с учетом (24) принимает вид

$$T = T_0 + \frac{T_1 - T_0}{\pi^n (\tau/\tau_c)^{n/2}} \left(1 + B \cdot e^{-\tau_c/\pi\tau} \right). \quad (31)$$

Известно [12], что коэффициент теплообмена α зависит от числа Рейнольдса, $Re=ud/v$, где u - скорость воздуха на его контакте с массивом, м/с; d - приведенный диаметр выработки или активно проветриваемой зоны выработанного пространства, м; v - коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с.

Обычно вместо скорости движения воздуха используется его расход в выработке или утечка через выработанное пространство (Q , м³/с), а вместо диаметра - отношение площади (S , м²) поперечного сечения вентиляционного потока к его периметру P : $d=4S/P$, тогда зависимость коэффициента B от числа Рейнольдса аналогична зависимости его от отношения Q/P , т.е.

$$B = f(Q/P). \quad (32)$$

Результаты сравнения данных расчета по формуле (28) и (31) при $n=1$ с результатами численных экспериментов при моделировании тепловых процессов с использованием уравнения (1) с условием (17) показали, что зависимость (32) имеет вид

$$B = \frac{1-6Q/P}{1+20Q/P}. \quad (33)$$

Установлено, что полученная зависимость совместно с (22) может быть использована с некоторой достаточной степенью точности для прогноза температуры в очаге пожара при времени с момента прекращения горения $\tau \geq \tau_c$. При этом, как и ранее [1, 3, 13], принимается для экзогенного пожара в выработке $T_1=1000$ °C, а для эндогенного пожара $T_1=1200$ °C.

Определим значение энергии активации процесса окисления угля по формуле [14]

$$E = \frac{R(\ln k_{кр} - \ln k_n)}{T_0^{-1} - T_{кр}^{-1}} \quad (34)$$

где E - энергия активации, Дж/моль; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); $k_{кр}$, k_n , м³/(°C · моль) - константы скорости окисления угля при критической температуре его самовозгорания $T_{кр}$, °C и начальной температуре процесса окисления T_0 , °C.

На основании приведенной выше теоретической части обоснования ниже приведена методика определения температуры в очаге изолированного пожара. В качестве исходных данных для определения температуры в очаге пожара используются такие данные: Q - расход газовой смеси через изолированный участок, м³/с; S - средняя площадь поперечного сечения выработок, м²; τ_c - время горения от начала до его полного прекращения, сут.; τ - время с момента прекращения горения, сут.; m - мощность вынимаемой толщи пласта, м; x_0 - ширина активно проветриваемой зоны выработанного

пространства (ориентировочно равная 20 м); T_0 - материнская температура пород, $^{\circ}\text{C}$.

Предлагаемый порядок расчета следующий, в нем поочередно определяются:

1. P , м - периметр активно проветриваемой зоны выработанного пространства по формуле $P = 2(x_0 + m)$, при экзогенном пожаре принимается $P = 4\sqrt{S}$.

2. I , $\text{м}^2/\text{с}$ - параметр, эквивалентный числу Рейнольдса, $I = 4Q/P$.

3. B - коэффициент теплообмена воздуха с окружающими породами горного массива, определяющийся по формуле: $B = (1 - 1,5 \cdot I) / (1 + 5 \cdot I)$.

4. $\bar{\tau}$, с - относительное время с момента прекращения горения, $\bar{\tau} = \tau / \tau_{\Gamma}$.

5. $\bar{T}$, $^{\circ}\text{C}$ - относительная температура в очаге пожара по формуле $\bar{T} = \left(1 + B \exp\left(-\frac{1}{\pi \tau}\right) \right) / \pi \sqrt{\tau}$.

6. T , $^{\circ}\text{C}$ - температура в очаге пожара, определяется на основании полученных данных, $T = T_1 + (T_1 - T_0) \bar{T}$.

Сформулированный метод определения температуры в очаге изолированного пожара может быть использован совместно с другими методами определения температуры, например, по непредельным углеводородам. Такие методики предлагаются нормативными документами, ВНИГД «Респиратор» и другими различными организациями [13-16]. Так, в работах, выполненных ГВГСС Украины с участием ИГТМ НАН Украины, предлагаются некоторые методики по возможному усовершенствованию оценок состояния массива в процессе тушения пожара [17-19], заключающиеся в следующем.

Для повышения точности определения температуры в очаге пожара по отношению объемных частей этилена и ацетилена пробы рекомендуется отбирать около кровли (для этилена) и около почвы выработки (для ацетилена), с учетом необходимого статистически надежного количества отобранных проб воздуха [18].

Следует иметь ввиду, что если максимально возможная температура меньше критической, то самовозгорание не происходит. При этом максимально возможная температура определяется по формуле

$$T_{\text{м}} = \frac{q}{(k_1 + a)(k_2 + a)} \left[\left(\frac{e^{-al} - e^{k_2 l}}{e^{k_1 l} - e^{k_2 l}} \right) e^{k_1 \gamma} + \left(\frac{e^{k_1 l} - e^{-al}}{e^{k_1 l} - e^{k_2 l}} \right) e^{k_2 \gamma} - e^{-a\gamma} \right] + T_0 \quad (35)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{P}{2} - \sqrt{f + \frac{P^2}{4}}; \quad k_2 = \frac{P}{2} + \sqrt{f + \frac{P^2}{4}}; \quad P = \gamma c_p \frac{\omega}{\lambda}; \quad f = \frac{4}{d^2}; \quad q = \frac{k_p Q \gamma c_0}{\lambda};$$

$$a = \frac{k_p \gamma}{d},$$

где γ – плотность воздуха, кг/м³; c_p – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); w – линейная скорость воздуха, м/с; λ – коэффициент теплопроводности массы шахтных пород или отходов углеобогащения, Вт/(м·К); d – диаметр ствола, м; l – засыпаемая часть ствола, м; T_0 – температура породы; k_p – константа скорости окисления шахтных пород и отходов углеобогащения, м³/(кг·с); γ – плотность породы, кг/м³; Q – теплота хемосорбции кислорода, Дж/м³; D – эффективный коэффициент диффузии, м²/с; Co – объемная часть кислорода.

При выполнении способа оценки температуры в очаге возникшего пожара ее замеры осуществляют в выработке с боку пожара. Причем замеры должны производиться вначале со стороны вентиляционного потока во вмещающих породах на доступном расстоянии. А после сооружения изоляционных перемычек периодически измеряют установившуюся температуру воздуха вблизи перемычки. Окончательную оценку температуры рекомендуется осуществлять по формуле

$$T_i = \frac{t_i}{t_1 T_1},$$

где T_i – оценочная температура горного массива, вблизи очага пожара, °С; T_1 – температура породы около пожара, замеренная первоначально, °С; t_1 – температура воздуха вблизи перемычки, замеренная первоначально, °С; t_i – температура воздуха вблизи перемычки, замеренная через промежутки времени, °С.

Вывод. Предлагается дополнительно в качестве, например, профилактических мероприятий при определении индикаторных газов и для оценки их динамику отбирать пробы угля, которые в лабораторных условиях в муфельных печах постепенно нагревать до возгорания угля и оценивать динамику по лабораторному эксперименту, а затем по динамике изменения фактически измеренных индикаторных газов определять реальное состояние пожара. Это предложение не является нормативным, требует доработки, промышленной проверки и обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоланов С.Н. Ликвидация сложных подземных аварий методами вентиляционного воздействия. Днепропетровск: Наука и образование, 2002. 272 с.
2. Минеев С.П., Смоланов С.Н., Беликов И.Б., Самопаленко П.М. Методология прогнозирования температуры в очаге пожара / Modern scientific researches. 2018. №5. С 30-39.
3. Топчиенко Б.И., Зинченко И.Н. Расчет температуры пожарных газов при их рециркуляции в изолированном участке / Разработка месторождений полезных ископаемых. 1984. №68. С. 95-99.
4. Пашковский П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах. Донецк: Ноулидж (донецкое отделение), 2013. 792 с.
5. Ярембаш И.Ф., Зинченко И.Н., Ревякин А.В. Компьютерное моделирование динамики температуры в изолированном выемочном участке при рециркуляции пожарных газов / Горноспасательное дело. Донецк: НИИГД, 1999. С. 126-131.
6. Демченко С.В. Расчет параметров процесса газификации угля в камере генератора газовой струи / Геотехническая механика. Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2007. №72. С. 118-124.

7. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / под общей ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1988. Т2. 557с.
8. Герштейн М., Коффин К. Горение твердых топлив / Процессы горения. М.: Физматгиз, 1961. С. 372-391.
9. Теплотехника: 2-е изд. перераб. / под ред. И.Н. Сушкина. М.: Metallurgy, 1973. 479 с.
10. Кнорре Г.Ф. Тепловые расчеты по газовому анализу. М.: Госэнергоиздат, 1947. 160 с.
11. Уорн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
12. Осипов С.Н., Жадан В.М. Вентиляция шахт при подземных пожарах. М.: Недра, 1973. 152 с.
13. Руководство по применению инертных газов при ликвидации пожаров в шахтах: Утв. Центральным штабом ВГСЧ 19.07.89. Донецк: НИИГД, 1989. 190 с.
14. КД 12.01.04.009 – 2000. Склонность к самовозгоранию углей шахтных пород и отходов углеобогащения. Методика определения. Донецк: НИИГД, 2000. 31 с.
15. Эндогенные пожары на угольных шахтах Донбасса. Предупреждение и тушение. Инструкция. Донецк: НИИГД, 1996. 72 с.
16. Устав по организации и ведению горноспасательных работ ГВГСС. Донецк: МЧС ДНР, 2015. 270 с.
17. Спосіб оцінки стану осередку пожежі: пат. 125592 UA / Булат А.Ф. та ін. № у 2018 00270; заявл. 09.01.2018; опубл. 10.05.2018, Бюл.№9. 3 с.
18. Спосіб контролю стану осередку пожежі: пат. 125593 UA / Мінеєв С.П. та ін. № у 2018 00271; заявл. 09.01.2018; опубл. 10.05.2018, Бюл.№9. 3 с.
19. Спосіб оцінки стану осередку пожежі: пат. 127313 UA / Мінеєв С.П. та ін. № у 2018 01875; заявл. 23.02.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. №14. 3 с.

REFERENCES

1. Smolanov, S.N. (2002), *Likvidatsiya slozhnykh podzemnykh avariiv metodami ventilyatsionnogo deystviya* [Elimination of complex underground accidents using ventilation methods], Nauka i obrazovanie, Dnepropetrovsk, UA.
2. Mineev, S.P., Smolanov, S.N., Belikov, B.I. and Samopalenko, P.M. (2018), "Methodology for predicting the temperature in the fire source", *Modern scientific researches*, no. 5, pp. 30-39.
3. Topchiyenko, B.I., Zinchenko, I.N. (1984), "Calculation of the temperature of fire gases during their recirculation in an isolated area", *Razrabotka mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh*, no. 68, pp. 95-99.
4. Pashkovskiy, P.S. (2013), *Endogennyye pozhary v ugolnykh shakhtakh* [Endogenous fires in coal mines], Noulidzh, Donetsk, UA.
5. Yarembash, I.F., Zinchenko, I.N. and Revyakin, A.V. (1999), "Computer simulation of the temperature dynamics in an isolated excavation area during the recirculation of fire gases", *Gornospasatelnoe delo*, pp. 126-131.
6. Demchenko, S.V. (2007), "Calculation of the parameters of the coal gasification process in the chamber of the gas jet generator", *Geo-Technical Mechanics*, no. 72, pp. 118-124.
7. Grigorev, V.A. and Zorin, V.M. (1988), *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki. Teplotekhnicheskiy eksperiment* [Theoretical foundations of heat engineering. Heat engineering experiment], Energoatomizdat, Moscow, RU.
8. Gershtejn, M., Koffin, K. (1961,) "Combustion of solid fuels", *Protsessy goreniya*, pp. 372-391.
9. Sushkin, I.N. (1973), *Teplotekhnika* [Heat engineering], Metallurgiya, Moscow, RU.
10. Knorre, G.F.(1947), *Teplovye raschety po gazovomu analizu* [Thermal calculations by gas analysis], Gosenergoizdat, Moscow, RU.
11. Uorn, G. and Korn, T. (1974), *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [A guide to mathematics for scientists and engineers], Nauka, Moscow, RU.
12. Osipov, S.N. and Zhadan, V.N. (1973), *Ventilyatsiya shakht pri podzemnykh pozharakh* [Ventilation of mines in case of underground fires], Nedra, Moscow, RU.
13. Register (Code) of Government Regulations on Labor Protection (1989), *Rukovodstvo po primeneniyu inertnykh gazov pri likvidatsii pozharov v shakhtakh* [Guidelines for the use of inert gases in the elimination of fires in mines], VNIIGD, Donetsk, UA.
14. Ministry of Coal Industry of Ukraine (2000), *KD 12.01.04.009 – 2000 Sklonnost k samovozgoraniyu uglei shakhtnykh porod i otkhodov ugleobogashcheniya. Metodika opredeleniya* [KD 12.01.04.009 – 2000 The tendency to spontaneous combustion of coal mine rocks and waste coal preparation. Determination method], NIIGD, Donetsk, UA.
15. Register (Code) of Government Regulations on Labor Protection (1996), *Endogennyye pozhary na ugolnykh shakhtakh Donbassa. Preduprezhdeniye i tusheniye. Instruktziya* [Endogenous fires at coal mines in Donbass. Prevention and extinguishing. Instructions], NIIGD, Donetsk, UA.
16. Register (Code) of Government Regulations on Labor Protection (2015), *Ustav po organizatsii i vedeniyu gornospasatelnykh rabot GVGSS* [Charter for the organization and conduct of mine rescue operations of the GVGSS], MCHS DNR, Donetsk, UA.
17. Bulat, A.F., Yashchenko, I.O., Mineev, S.P. and others, IGTM NAS of Ukraine (2018), *Sposib otsinky stanu osередku pozhеzhi* [The method of assessing the condition of the fire], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat № 125592.
18. Mineev, S.P., Seleznev, A.M., Drozd, S.V. and Belikov, I.B., IGTM NAS of Ukraine (2018), *Sposib kontrolyu stanu osередku pozhеzhi* [The method of monitoring the condition of the fire], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat № 125593.
19. Mineev, S.P., Seleznev, A.M., Yashchenko, I.O., Meshcheryakov, M.O., IGTM NAS of Ukraine (2018), *Sposib otsinki stanu osередku pozhеzhi* [The method of assessing the condition of the fire], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat № 127313.

Про авторів

Мінєєв Сергій Павлович, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу керування динамічними проявами гірничого тиску, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, sergminee@gmail.com

Демченко Сергій Вячеславович, магістр, молодший науковий співробітник відділу керування динамічними проявами гірничого тиску, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, demchikigtm@gmail.com

About the authors

Minieiev Serhii Pavlovych, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Pressure Dynamics Control in Rocks, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, sergminee@gmail.com

Demchenko Serhii Viacheslavovych, Master of Science, Junior Researcher in Department of Pressure Dynamics Control in Rocks, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, demchikigtm@gmail.com

Анотація. Вивчення процесів горіння при високій температурі пов'язано з двома основними проблемами. Першою з них є визначення складу і кількості можливих продуктів горіння, а також з'ясування термодинамічних властивостей суміші при різних умовах горіння. Другою проблемою є визначення кількості тепла, звільненого при горінні, максимальної температури горіння або роботи, яка може бути отримана при дотриманні встановлених спрощень і для умов, в яких відбувається горіння.

При виконанні в шахтних умовах робіт з гасіння та оцінки процесу розвитку пожеж велике значення приділяється прогнозу температурних показників в осередку пожежі. Ці показники є важливими для фактичної оцінки стану середовища в осередку його гасіння, оскільки є контрольними для визначення охолодження порід масиву і, в кінці побічно оцінюють факт загасання пожежі.

У статті наводиться методика розрахунку параметрів процесу горіння твердого палива, яка ґрунтується на результатах теоретичних і експериментальних досліджень в області теорії горіння пилоподібного палива. При розрахунку параметрів процесу горіння визначаються: теоретична витрата повітря, яка необхідна для згоряння одиниці кількості палива; об'єм продуктів згоряння; склад продуктів згоряння; ентальпія продуктів згоряння при потрібних температурах і надлишку повітря, а також калориметрична і теоретична температури згоряння твердого палива.

Використовуючи відомі залежності, обґрунтовано порядок прогнозу температури в зоні пожежі для подальших розробок нових і вдосконалення існуючих способів.

Розглянуто ряд розроблених пропозицій щодо вдосконалення оцінок параметрів стану гірського масиву в процесі гасіння пожежі.

Пропонується додатково до пожежі в якості, наприклад, профілактичних заходів при визначенні індикаторних газів і оцінки їх динаміки відбирати проби вугілля, які в лабораторних умовах в муфельних печах поступово нагрівають до загоряння вугілля і оцінювати динаміку за лабораторним експериментом, а потім по динаміці зміни фактично виміряних індикаторних газів визначати реальний стан пожежі. Ця пропозиція не є нормативною, потребує доопрацювання, промислової перевірки та обговорення.

Ключові слова: вугільні частинки, прогноз температури, осередок пожежі, теплообмін, повітря, склад атмосфери.

Abstract. The study of combustion processes at high temperatures is associated with two main problems. The first of them is to determine composition and amount of possible combustion products, and to clarify thermodynamic properties of the mixture under various combustion conditions. The second problem is to determine amount of heat released during combustion and maximum attainable temperature of combustion or work which can be obtained if to apply the established simplifications and under the conditions in which combustion occurs.

Great importance is given to predicting temperature indicators in the fire site when performing work in mine conditions on extinguishing and assessing the development of fires in mines. These indicators are important for the actual assessment of the state of the environment in the focus of its extinguishing, since they are control indicators for determining the cooling of the rocks of the massif and, ultimately, indirectly assess the fact of an extinct fire.

In the article, the authors present a method for calculating parameters of the process of solid fuel combustion, which is based on the results of theoretical and experimental studies in the field of the theory of combustion of dusty fuel. By this method, the following parameters of combustion process are calculated: theoretical air consumption required for combustion of a unit of fuel quantity; volume of combustion products; composition of combustion products; enthalpy of

combustion products at required temperatures and excess air; and calorimetric and theoretical temperatures of solid fuel combustion.

By using the known dependences, the forecast of the temperature in the fire zone is substantiated for further development of new and improvement of existing methods.

Some proposals developed for improving the estimates of the parameters of the state of the rock massif in the process of extinguishing a fire are considered.

It is proposed, for example, as preventive measures, while determining indicator gases and evaluating their dynamics, to take additionally samples of coal before a fire and gradually heat them in laboratory conditions in muffle furnaces until the coal ignites, whereupon to evaluate their dynamics according to a laboratory experiment; then, when a fire occurs, it is possible to determine its real state by the dynamics of changes in the factually measured indicator gases. This proposal is not normative and requires further development, industrial verification and discussion.

Keywords: coal particles, temperature forecast, area of fire, heat exchange, air, atmospheric composition.

Стаття надійшла до редакції 07.12.2020