

Andrzej STRUMIŃSKI

KGHM Cuprum Sp. z o.o. – Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław

Barbara MADEJA-STRUMIŃSKA

Politechnika Wrocławska, Wrocław

Instytut Górnictwa

OCENA ZMIAN CZASOWYCH TEMPERATURY OGNISKA POŻARU W FAZIE GASZENIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę przybliżonej oceny zmian czasowych temperatury ogniska pożaru w czasie jego wygasania. Zakłada się przy tym, że temperatura wygasającego ogniska jest w przybliżeniu równa temperaturze gazów pożarowych generowanych w tym czasie z tego ogniska. W metodzie tej korzysta się z graficznego modelu pożaru podziemnego H. Bystronia oraz pomiarów stężeń tlenku węgla w powietrzu kopalnianym w sąsiedztwie ogniska pożarowego. Opracowaną metodę zilustrowano na przykładzie wziętym z praktyki górniczej.

EVALUATION OF TIME CHANGES OF THE FIRE CENTER TEMPERATURE DURING THE FIRE FIGHTING

Summary. The paper presents the method of rough evaluation of time changes of the fire center temperature during its putting down. It is assumed thereat that the temperature of the put down fire center is approximately dual to the temperature of fire gases generated at that time from the center. The method uses graphical model of underground fire proposed by H. Bystron and measurements of carbon monoxide concentration in the mine air close to the fire center. The developed method was presented in the case study from mining practice.

1. Wstęp

W czasie pożaru podziemnego w powietrzu kopalnianym pojawiają się gazy niewystępujące w powietrzu atmosferycznym. Gazami tymi są głównie: tlenek i ditlenek węgla, metan, wodór oraz węglowodory alifatyczne. Ponadto, w czasie pożarów podziemnych mogą wydzielać się substancje toksyczne, takie jak: aceton, alkohol metylowy, amoniak,

benzen, chlorowodór, cyjanowodór, aldehydy itp. [3, 5]. Wymienione substancje wydzielają się podczas spalania często obecnie używanych w górnictwie takich materiałów, jak: poliuretan spieniony miękki lub twardy, masy spienione wykonane na bazie poliuretanów, wełny mineralne, włókniny podkładowe impregnowane itp.

W związku z tym skład gazów pożarowych może być bardzo różny i jest on zależny od wielu czynników, z których największe znaczenie mają ilość i jakość palącego się materiału, warunki w ognisku pożaru oraz stadium rozwoju pożaru [1, 2, 3, 5, 6].

W przypadku niepowodzenia aktywnego zwalczania pożaru podziemnego [3, 4, 5] zaognioną część kopalni izoluje się od czynnych wyrobisk górniczych tamami pożarowymi. Powstające w ten sposób otamowane pola pożarowe stanowią często poważne zagrożenie dla załóg dołowych kopalń, zwłaszcza w razie wyjścia ognia przed tamy pożarowe. Aby zmniejszyć zagrożenie dla załóg górniczych oraz odzyskać uwięzione w tych polach zasoby węgla i urządzenia, konieczne jest możliwie szybko ugaszenie pożaru w otamowanej przestrzeni, a następnie zlikwidowanie pola pożarowego.

Skuteczność gaszenia pożaru w otamowanej przestrzeni może być oceniana w różny sposób, a w szczególności na podstawie: krzywych K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , krzywej R , depresji cieplnej pożaru, temperatury gazów pożarowych itp. [5].

Praktyka górnicza dowodzi, że dotychczas stosowane metody oceny stanu pożaru w otamowanej przestrzeni w wielu przypadkach nie pozwalają na właściwą ocenę tego stanu. Jest to związane głównie z brakiem informacji co do temperatury ogniska pożaru w fazie gaszenia. Dlatego też dla pogłębienia tej oceny proponuje się wyznaczanie temperatury na podstawie modelu samozagrzewania, pożaru i gaszenia H. Bystronia [2].

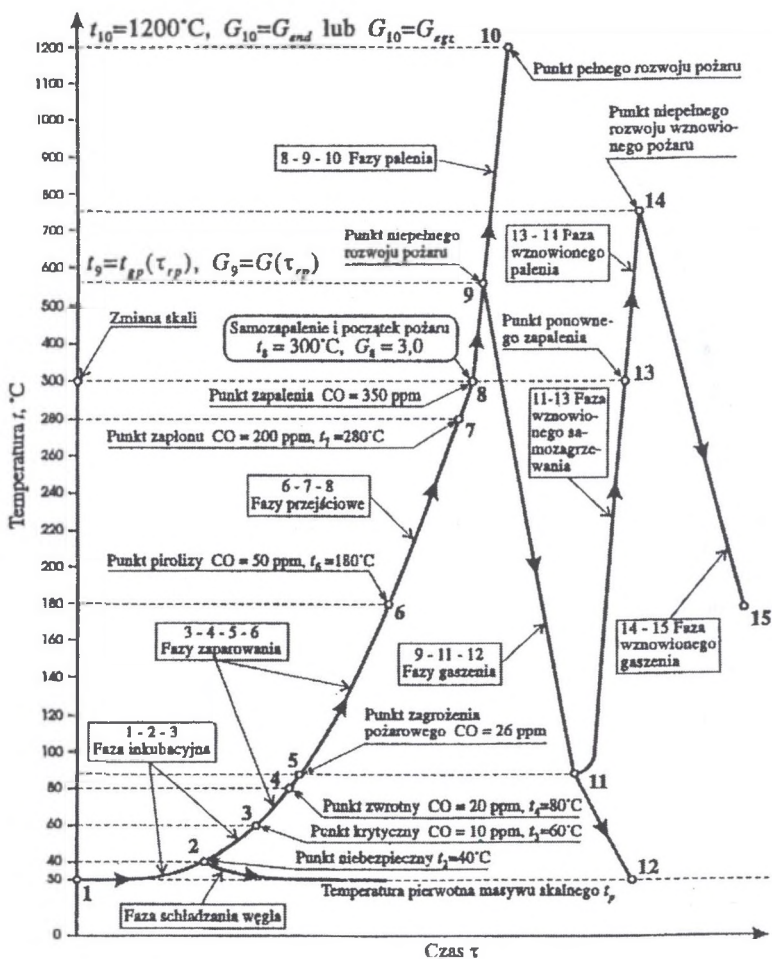
Przedstawioną w artykule metodę zilustrowano przykładem wziętym z praktyki górniczej.

Praca zawiera wybrane wyniki badań uzyskane przy realizacji projektu badawczo-rozwojowego nr R 09 037 03.

2. Przybliżona temperatura ogniska pożaru

Według modelu powstawania i przebiegu procesu pożaru endogenicznego H. Bystronia [2] (rys. 1), temperatura ogniska pożaru jest odpowiednio proporcjonalna do stężenia tlenku węgla powstającego w tym ognisku. Jeśli stężenie tlenku węgla w powietrzu w sąsiedztwie ogniska pożaru wynosi 10 ppm, to temperatura węgla ulegającego samozagrzewaniu wynosi

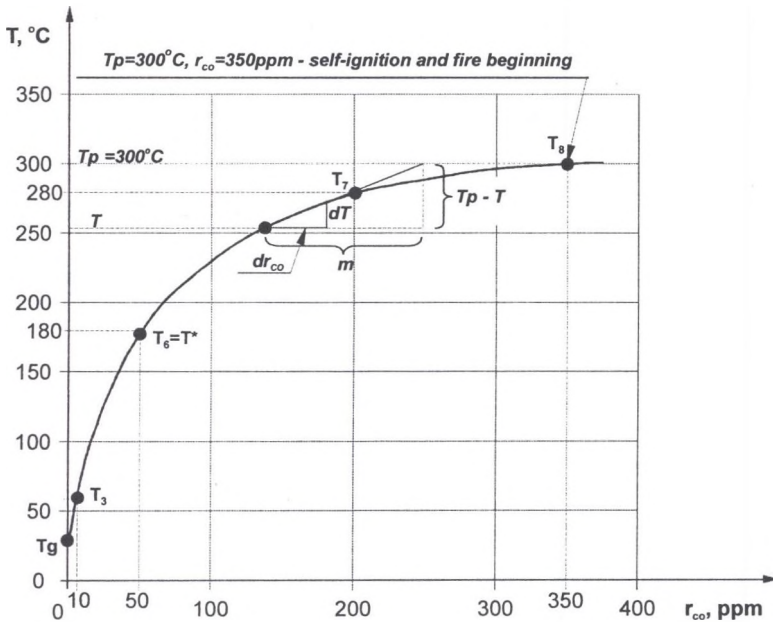
około 60°C , przy stężeniu tlenku węgla wynoszącym 20 ppm, temperatura ta ma wartość około 80°C , a przy zawartościach CO: 50 ppm, 200 ppm, 350 ppm, temperatury te wynoszą odpowiednio około 180°C , 280°C i 300°C .



Rys. 1. Model procesu samozagrzewania, palenia i gaszenia pożaru
Fig. 1. Model of fire self heating, burning and extinguishing process

Nadmieniamy, że w niniejszej pracy przyjmuje się, iż temperatura ogniska pożaru jest w przybliżeniu równa temperaturze gazów pożarowych w tym ognisku.

W celu wyznaczenia temperatury samozagrzewającego się węgla poza wymienionymi wartościami stężeń tlenku węgla, sporządzono krzywą przybliżonej zależności temperatury procesu samozagrzewania się węgla ($T^{\circ}\text{C}$) od wartości stężenia tlenku węgla (r_{CO}) (rys. 2).



Rys. 2. Krzywa zależności temperatury tworzącego się ogniska pożaru endogenicznego od stężenia tlenu węgla

Fig. 2. Curve showing the relationship between the temperature of spontaneous fire center and the carbon monoxide concentration

Biorąc pod uwagę elementarne przyrosty temperatury węgla ulegającego samozagrzewaniu dT i tlenu węgla dr_{CO} , można napisać równanie różniczkowe [7, 8]:

$$\frac{dT}{dr_{CO}} = \alpha(T_p - T), \quad (1)$$

gdzie: α – współczynnik proporcjonalności ($\alpha = 1/m$), (rys. 2), 1/ppm,

T_p – temperatura samozapalenia węgla (początku pożaru), przyjęto w artykule

$$T_p = 300^\circ\text{C},$$

T – temperatura samozagrzewającego się węgla, $^\circ\text{C}$.

Rozwiązując to równanie względem niewiadomej T uzyskuje się zależność:

$$T = T_p - C \exp(-\alpha r_{CO}). \quad (2)$$

Stałą C wyznacza się z warunku początkowego, dla którego przy $r_{CO} = 0$ temperatura T równa się temperaturze pierwotnej górotworu T_g :

$$T = T_g = T_0 + \frac{H - H_0}{\Gamma_m}, \quad (3)$$

gdzie: T_0 – średnia roczna temperatura powietrza w rejonie prowadzenia podziemnej eksploatacji węgla, dla Zagłębia Górnosląskiego $T_0 = 8^{\circ}\text{C}$,

H – głębokość formującego się ogniska pożarowego, m,

H_0 – głębokość, do której sięgają zmiany sezonowe temperatury powietrza na danym terenie, dla Zagłębia Górnosląskiego $H_0 = 30\text{m}$,

Γ_m – średni stopień geotermiczny, dla Zagłębia Górnosląskiego $\Gamma_m = 33\text{ m}^{\circ}\text{C}$.

Biorąc powyższe dane pod uwagę, otrzymujemy:

$$C = T_p - T_g \quad (4)$$

oraz

$$T = T_p - (T_p - T_g) \exp(-\alpha r_{\text{CO}}). \quad (5)$$

Z warunku dodatkowego dla $r_{\text{CO}} = r_{\text{CO}}^*$ i temperatury ogniska pożaru $T = T^*$ współczynnik proporcjonalności α wyznaczamy ze wzoru:

$$\alpha = -\frac{1}{r_{\text{CO}}^*} \ln \left(-\frac{T^* - T_p}{T_p - T_g} \right). \quad (6)$$

Jeśli zgodnie z [2] założy się, że dla $r_{\text{CO}}^* = 50\text{ ppm}$ temperatura $T^* = 180^{\circ}\text{C}$, to wzór (6) przybiera postać:

$$\alpha = -\frac{1}{50} \ln \left(\frac{120}{300 - T_g} \right). \quad (7)$$

Wartość współczynnika α , wyznaczoną ze wzoru (7), można traktować jako wartość średnią, co przy znajomości temperatury pierwotnej górotworu T_g oraz zarejestrowanym stężeniu tlenu węgla r_{CO} pozwala wyznaczyć przybliżoną, aktualną temperaturę formującego się ogniska pożaru endogenicznego (wzór (5)).

Dla uzyskania bardziej dokładnej temperatury ogniska pożarowego przy stężeniach tlenu węgla różnych od 10 ppm, 20 ppm, 50 ppm, 200 ppm i 350 ppm wskazane jest wyznaczanie współczynnika α ze wzoru (6), przyjmując za r_{CO}^* wartość najbliższą wyznaczonemu z pomiarów stężeniu tlenu węgla i odpowiadającą temu stężeniu temperaturę T^* . Na przykład, jeśli zmierzone stężenie tlenu węgla wynosi 150 ppm, to należy przyjąć

$r_{CO}^* = 200$ ppm i odpowiadającą mu temperaturę $T^* = 280^{\circ}\text{C}$, gdy natomiast stężenie CO wynosi 30 ppm, to przyjmujemy $r_{CO}^* = 20$ ppm i $T^* = 80^{\circ}\text{C}$ itp.

Według pracy [2] temperaturę gazów pożarowych T w ognisku pożaru (w fazie palenia się, a nie samozagrzewania się węgla) można wyznaczyć na podstawie wzoru:

$$T = 300 \left[1 + 3 \frac{G(\tau_{rp}) - 3}{G_{pp} - 3} \right], \quad (8)$$

gdzie: $G(\tau_{rp})$ – wskaźnik Grahama dla określonego okresu rozwoju pożaru,

G_{pp} – wartość tego wskaźnika dla w pełni rozwiniętego pożaru podziemnego

$$T_{pr} = 1200^{\circ}\text{C}.$$

Wzór (8) może być stosowany wówczas, gdy $G(\tau_{rp}) > 3$, przy czym zgodnie z [2] należy przyjmować:

$$G_{pp} = G_{pend} = 30 \text{ – dla pożaru endogenicznego (ukrytego),}$$

$$G_{pp} = G_{pegz} = 90 \text{ – dla pożaru egzogenicznego (otwartego).}$$

Wskaźnik Grahama wyznacza się z zależności:

$$G(\tau_{rp}) = \frac{100\text{CO}}{0,265\text{N}_2 - \text{O}_2}, \quad (9)$$

w której CO, N_2 i O_2 oznaczają odpowiednie procentowe zawartości składników gazów pożarowych w miejscu pobierania próby tych gazów.

3. Przybliżona metoda oceny gaszenia pożaru podziemnego

W miarę upływu czasu w otamowanym polu pożarowym zachodzą różne zmiany w atmosferze otamowanej przestrzeni. W początkowym okresie po zamknięciu tam pożarowych w polu pożarowym obserwuje się wzrastanie zawartości ditlenku węgla, tlenu węgla, wodoru, metanu i węglowodorów alifatycznych oraz zmniejszenie zawartości tlenu. Po osiągnięciu maksymalnych wartości CO, H_2 , CH_4 , i C_mH_n zmniejszają się stężenia tych gazów, wzrasta natomiast zawartość O_2 i CO_2 [3, 5, 6].

Oceniając efekt gaszenia pożaru w otamowanej przestrzeni, zwykle analizuje się przebieg zmian czasowych stężenia tlenu węgla, przy czym, jak się okazuje według modelu

samozagrzewania, pożaru i gaszenia H. Bystronia (rys. 1), proces gaszenia pożaru przebiega wg przybliżonych prostych 9-11 i 11-12. Równania tych prostych mają postać:

$$T = a\tau + b, \quad (10)$$

gdzie: T – temperatura gazów pożarowych ($^{\circ}\text{C}$),

τ – czas liczony od rozpoczęcia się procesu gaszenia (doba),

a i b – odpowiednio wyznaczone współczynniki.

W rozważaniach inżynierskich zwykle przyjmuje się, że wygasanie pożaru rozpoczyna się wówczas, gdy stężenie tlenu w gazach pożarowych pobranych z ogniska pożaru lub najbliższego jego sąsiedztwa obniży się do 15%. Według rys. 1 wygasanie pożaru rozpoczyna się z chwilą, gdy temperatura gazów w ognisku pożaru zacznie obniżać się poniżej 550°C .

Współczynniki a i b występujące we wzorze (10) mogą być wyznaczone na podstawie znajomości wartości T_1 , τ_1 oraz T_2 , τ_2 określonych dla dwóch punktów leżących na prostych 9-11 lub 11-12, przy czym uzyskuje się:

$$b = \frac{\tau_1 T_2 - \tau_2 T_1}{\tau_1 - \tau_2} \quad (11)$$

oraz

$$a = \frac{T_1 - b}{\tau_1}. \quad (12)$$

W praktyce korzysta się głównie z prostej 9-11 (rys. 1), według której punktowi 11 odpowiada temperatura około 90°C , tj. temperatura punktu zagrożenia pożarowego, poniżej której stężenie tlenu węgla jest na ogół mniejsze od 26 ppm.

W przypadku korzystania z prostej 11-12, punktowi 11 przypisuje się temperaturę $T_1 = 90^{\circ}\text{C}$, a punktowi 12 temperaturę pierwotną masywu skalnego wyznaczoną ze wzoru (3).

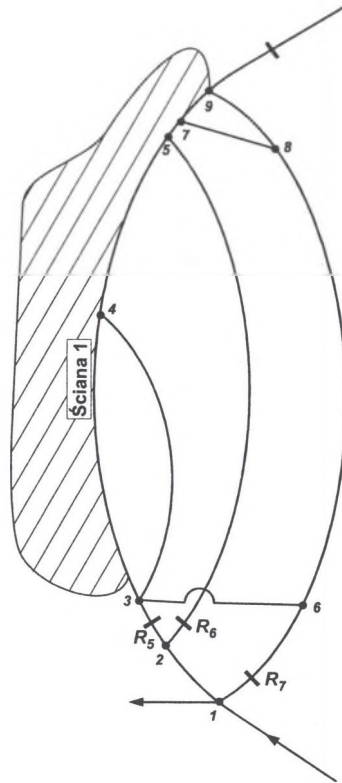
Temperatury T_1 i T_2 mogą być w przybliżeniu określone na podstawie wzorów (5) lub (8), znajomości stężeń tlenu węgla bądź wskaźników Grahama wyznaczonych dla czasów τ_1 i τ_2 .

Poszukiwany czas odpowiedniego obniżenia się temperatury w otamowanym polu pożarowym może być w przybliżeniu wyznaczony z zależności:

$$\tau = \frac{T - b}{a}, \quad (13)$$

uzyskanej ze wzoru (10).

Dla zobrazowania przedstawionej metody rozważamy przykład otamowanego rejonu ściany 1 w kopalni X (rys. 3), w którym miał miejsce proces samozagrzewania węgla.



Rys. 3. Ideowy schemat kanoniczny sąsiedztwa ściany 1 w kopalni X
 Fig. 3. Schematic canonical diagram of face no 1 site in X mine

Stężenia tlenku węgla w próbach gazów pobranych spoza tam R_5 , R_6 i R_7 w dniach 3.01.2007 r. oraz 11.01.2007 r. wynosiły odpowiednio: $r_{COR_5} = 145$ ppm, $r_{COR_6} = 136$ ppm, $r_{COR_7} = 140$ ppm oraz $\dot{r}_{COR_5} = 94$ ppm, $\dot{r}_{COR_6} = 68$ ppm, $\dot{r}_{COR_7} = 72$ ppm.

Zroby ściany 1 były zlokalizowane na głębokości 1030 m, na której to głębokości temperatura pierwotna skał, zgodnie ze wzorem (3), wynosiła $T_g = 38,3^{\circ}\text{C}$.

Biorąc pod uwagę wymienione wartości i korzystając ze wzorów (5) i (6), uzyskuje się następujące temperatury samozagrzewającego się węgla poza tamami R_5 , R_6 i R_7 : $T_{R_5} = 259^{\circ}\text{C}$, $T_{R_6} = 254^{\circ}\text{C}$, $T_{R_7} = 256^{\circ}\text{C}$ oraz $\dot{T}_{R_5} = 241^{\circ}\text{C}$, $\dot{T}_{R_6} = 206^{\circ}\text{C}$ i $\dot{T}_{R_7} = 214^{\circ}\text{C}$.

Korzystając z kolei z zależności (12) i (11) obliczono wartości współczynników a i b , przy czym otrzymano: $a_{R_5} = -2,25$, $b_{R_5} = 295$, $a_{R_6} = -5,625$, $b_{R_6} = 344$, $a_{R_7} = -5,25$, $b_{R_7} = 340$.

Na podstawie ww. obliczeń i wzoru (13) można wyznaczyć przybliżony czas obniżenia się temperatury samozagrzewającego się węgla poza tamami R_5 , R_6 i R_7 , przy czym, aby uzyskać np. temperaturę 80°C , czas ten w przypadku tamy R_5 wynosiłby około $\tau_{R_5} = 96$ dób, w przypadku tamy $R_6 - \tau_{R_6} = 47$ dób, a w przypadku tamy R_7 , czas ten wynosiłby $\tau_{R_7} = 50$ dób. Ponieważ najdłuższy czas τ wynosi 96 dób, więc przyjęto, że bezpiecznie można otworzyć i wejść do rozważanego pola dopiero po upływie około 3 miesięcy od momentu rozpoczęcia badań ww. rejonu ściany 1. Należy dodać, że w kwietniu 2007 r. otwarto rejon tej ściany i bezpiecznie przeprowadzono w nim rekonesans oraz wykonano odpowiednie prace zabezpieczające.

4. Zakończenie

Przedstawiona w artykule metoda oceny zmian czasowych temperatury ogniska pożaru w fazie gaszenia jest metodą przybliżoną, nadającą się do praktycznego stosowania w kopalniach podziemnych. W metodzie tej korzysta się z modelu graficznego H. Bystronia, dotyczącego procesu samozagrzewania, palenia i gaszenia pożaru podziemnego.

Z zaprezentowanej metody skorzystano przy ocenie czasu bezpiecznego otwarcia i przeprowadzenia rekonesansu w jednej z kopalń węgla kamiennego, w której doszło do katastrofy aerologicznej.

Przy korzystaniu z opracowanej metody trzeba dokonać co najmniej dwukrotnego pomiaru stężenia tlenu węgla za ogniskiem pożaru, możliwie jak najbliżej tego ogniska i to w takim miejscu, gdzie występuje najmniejsza możliwość rozrzedzenia tlenu węgla wydzielanego w procesie spalania.

Przedstawiona metoda wymaga dalszej praktycznej weryfikacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Bystron H., Jaroń S., Kołodziejczyk B., Markefka P., Strumiński A.: Poradnik Górnika. T. 3, dz. III – Pożary podziemne. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1974.
2. Bystron H.: Stan pożaru, zapalenie i wybuch gazów podczas aktywnego i pasywnego gaszenia. Archiwum Górnictwa, t. 42, z. 1, Kraków 1997.

3. Maciejasz Z., Kruk F.: Pożary podziemne w kopalniach. Cz. 1. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1977.
4. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28.06.2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy oraz prowadzenia ruchu i specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (DzU nr 139).
5. Strumiński A.: Zwalczanie pożarów w kopalniach głębinowych. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1996.
6. Strumiński A., Madeja-Strumińska B.: Ocena i likwidacja zagrożenia pożarami endogenicznymi w kopalniach węgla. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 1997.
7. Strumiński A., Madeja-Strumińska B.: Przybliżona ocena temperatury powstającego ogniska pożaru endogenicznego. XXX Dni Techniki ROP’ 2004, XXI Seminarium nt. „Zwalczanie zagrożenia pożarowego w kopalniach – teoria i praktyka”, Rybnik 2004.
8. Strumiński A., Madeja-Strumińska B.: Evaluation of Arising Spontaneous Fire Centre Temperature and Time of Coal Self – Ignition. Proceedings Eighth International Mine Ventilation Congress, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Brisbane, Australia 2005.

Recenzent: Dr hab. inż. Józef SUŁKOWSKI, prof. nzw. w Pol. Śl.

Abstract

The paper presents the method of rough evaluation of time changes of the fire center temperature during its development and putting down. In the presented method we use graphical model of underground fire proposed by H. Bystróń (Fig. 1). The model quantitatively formulates the time changes of fire center temperature depending on the oxygen monoxide concentration generated by fire. Using this model the differential equation (1) was shown which enables determination of the fire center temperature depending on the primary temperature of the rock-mass T_g (formula (3)) to the temperature of spontaneous fire start i.e. up to 300°C (Fig. 2). After exceeding this temperature the formula (8) is used to determine the fire center temperature.

Main subject of the paper is the method of rough evaluation of fire center temperature identified with the temperature of fire gases generated at that time in the fire center during its putting down. According to H. Bystróń model the effect of fire fighting can be analyzed basing on straight lines 9-11 and 11-12 (Fig. 1), which may be presented in the form of

equation (10). In order to facilitate the practical usage of this equation it is necessary to know the value of a and b coefficients present in this equation. As it turns out they can be determined through the appropriate (double) measurements of oxygen monoxide contents in the fire center or in its close vicinity. Moreover one must appropriately use the formulas from chapter 2 as well as formulas (10), (11), (12) and possibly formula (14).

The paper summary contains the results of calculations obtained during evaluation of safety open time for making the reconnaissance and protection of stopped face no 1 site in the X mine (Fig. 3), where the coal self heating process and explosion of old working gases took place.