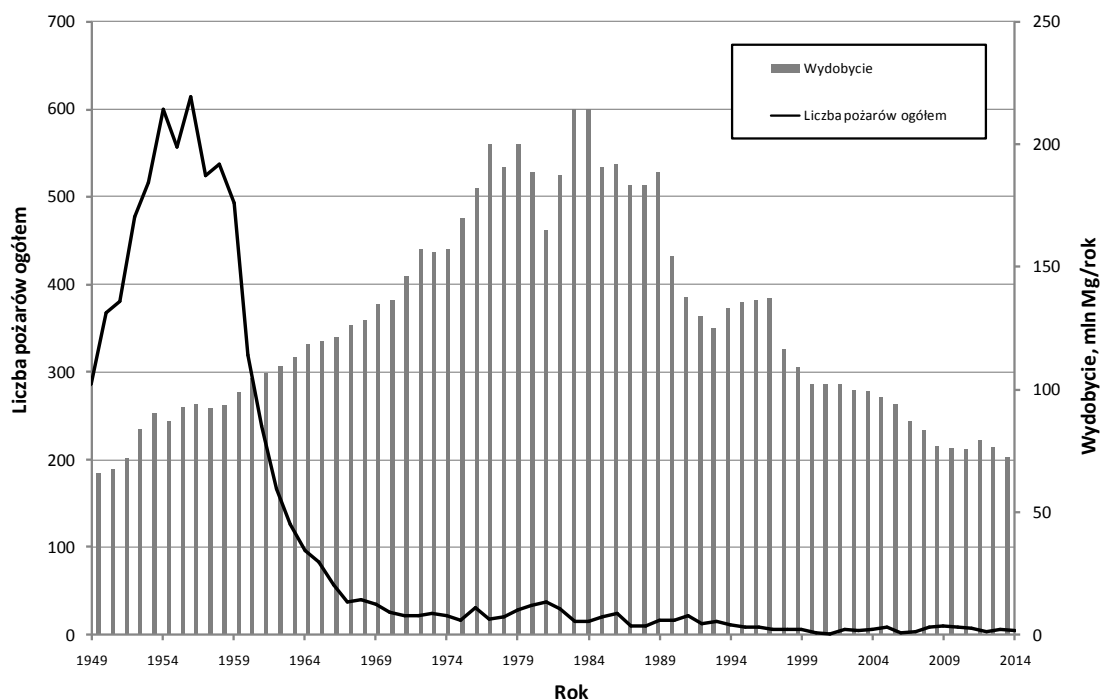


# 13

## ANALIZA ZMIAN ROZWOJU POŻARU PODZIEMNEGO

### 13.1 WPROWADZENIE

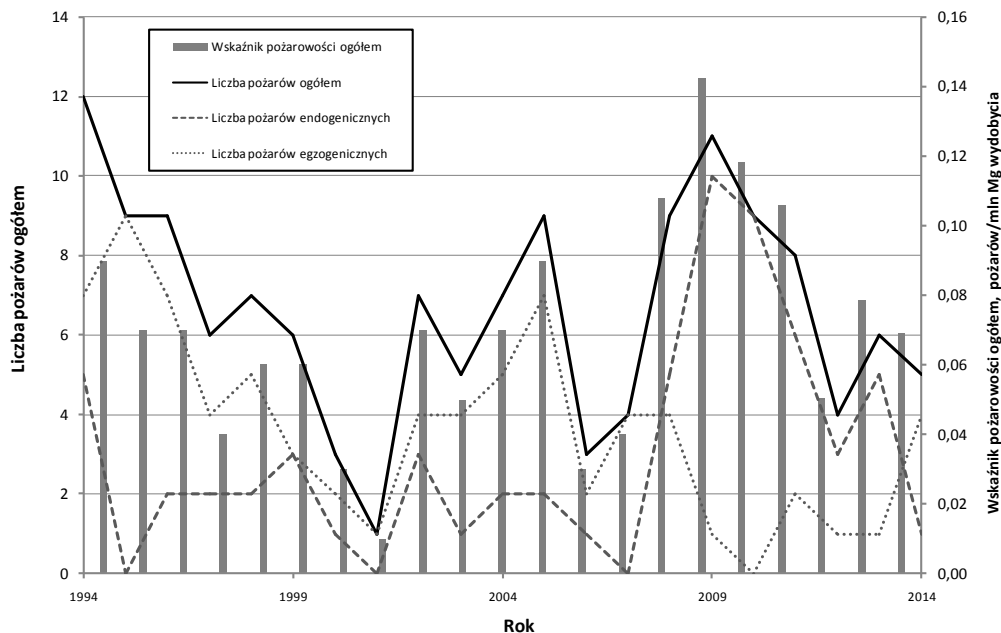
Na przestrzeni lat prowadzenia eksploatacji w polskich kopalniach węgla kamiennego od roku 1949 można zauważyć znaczące zmniejszenie się liczby pożarów podziemnych. Na rysunku 13.1 przedstawiono liczbę pożarów ogółem oraz wydobyć węgla kamiennego w latach 1949-2014.



**Rys. 13.1 Liczba pożarów ogółem oraz wydobyć węgla kamiennego w polskich kopalniach węgla kamiennego w latach 1949-2014**

Źródło: [2, 10]

Znaczący spadek liczby pożarów nastąpił przede wszystkim na przełomie lat 50. i 60. W ostatnich latach liczba pożarów kształtuje się na mniej więcej stałym poziomie. Na rysunku 13.2 przedstawiono zmiany liczby pożarów (z podziałem na pożary endogeniczne i pożary egzogeniczne) oraz wskaźnika pożarowości (liczby pożarów przypadającej na 1 mln Mg wydobyć) w latach 1994-2014.



**Rys. 13.2 Liczba pożarów oraz wskaźnik pożarowości w polskich kopalniach węgla kamiennego w latach 1994-2014**

Źródło: [2, 10]

Liczba pożarów podziemnych zaistniałych w ciągu roku w polskich kopalniach węgla kamiennego może wydawać się stosunkowo nieduża. W latach 1994-2014 występowało od 1 do 12 pożarów podziemnych, a wskaźnik pożarowości wynosił od 0,01 do 0,14 pożaru na 1 mln Mg wydobywania. W roku 2014 było to 5 pożarów, z czego tylko 1 był pożarem endogenicznym [10]. W latach poprzednich liczba pożarów endogenicznych była jednak większa.

Zaistniały pożar stanowi duże zagrożenie dla pracującej pod ziemią załogi. Dodatkowo, bardzo często pole pożarowe jest na długi okres czasu tamowane, co skutkuje wyłączeniem rejonu wydobywczego z ruchu. W rejonie takim znajduje się kosztowny sprzęt, który później, po otwarciu pola pożarowego może nie nadawać się do wykorzystania. Pole pożarowe wymaga ciągłej kontroli stanu zagrożenia. Wystąpienie pożaru podziemnego w kopalni pociąga za sobą znaczne straty materialne.

Stosowane obecnie w kopalniach systemy CO-metrii automatycznej pozwalają na stosunkowo szybkie wykrycie pożaru. W przypadku wykrycia pożaru podziemnego bardzo ważne jest szybkie podjęcie odpowiednich działań związanych z zabezpieczeniem rejonu objętego jego działaniem.

W artykule przeprowadzono analizę zmian prędkości spalania węgla w rejonie objętym pożarem. Na podstawie składu powietrza odprowadzającego z rejonu objętego pożarem określono strumień masy węgla spalanego w ognisku pożaru. Zwrócono uwagę na spalanie węgla z nadmiarem oraz niedoborem tlenu. Jest to bardzo istotne z punktu widzenia rozwoju pożaru. Ograniczenie dopływu tlenu do ogniska pożaru powoduje zahamowanie jego rozwoju. W przeciwnym wypadku pożar posiada sprzyjające warunki do rozwoju. Wykonano także wariantowe obliczenia prognostyczne temperatury gazów pożarowych za ogniskiem pożaru. W poszczególnych wariantach obliczeń uwzględniano

zmianę masy spalanego węgla oraz strumienia powietrza doprowadzanego do ogniska pożaru. Na tej podstawie podjęto próbę wskazania najlepszej metody pozwalającej na ograniczenie skutków wystąpienia pożaru.

Jedną z metod pozwalających na ograniczenie rozwoju pożaru w wyrobiskach jest tamowanie wyrobisk celem ograniczenia strumienia powietrza doprowadzanego do ogniska pożaru. Doświadczenia ostatnich lat pokazały jednak, że nie zawsze udaje się na czas zamknąć wewnętrzne tamy bezpieczeństwa i ograniczyć dopływ powietrza do ogniska pożaru [6]. Zdarzały się sytuacje, w których znaczna część kopalni w rejonie wystąpienia pożaru musiała zostać zaizolowana na długi okres czasu.

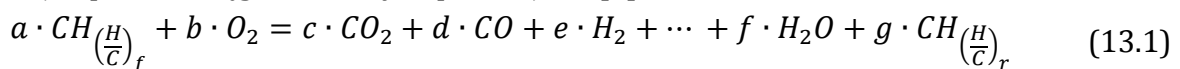
### 13.2 PRĘDKOŚĆ SPALANIA WĘGLA

Dla prowadzenia analizy zmian stanu pożaru oraz prognozowania temperatury gazów pożarowych istotne jest określenie masy paliwa spalanego w ognisku pożaru. Głównym zadaniem ograniczenia rozwoju pożaru jest zahamowanie przyrostu masy paliwa spalanej w czasie, czyli redukcja prędkości spalania paliwa.

Masa palącego się w ognisku pożaru węgla (prędkość spalania) ma istotne znaczenie dla określenia temperatury gazów pożarowych, jak również ich składu. W celu oceny masy spalanego w ognisku pożaru węgla posłużono się badaniami wykonanymi w Ośrodku Techniki Bezpieczeństwa i Zdrowia w Pittsburghu w USA. W efekcie prowadzonych badań opracowana została metoda obliczenia prędkości spalania węgla [4]. Metoda opiera się na wyznaczeniu masy spalanego węgla w oparciu o stężenia gazów pomierzone w prądzie powietrza odprowadzanego z ogniska pożaru.

Zgodnie z założeniami modelu [4] przepływ powietrza, o znanym strumieniu objętościowym i składzie, przez strefę pożaru dostarcza tlen do procesu spalania w jego ognisku. Na wylocie z wyrobiska, w którym wstąpił pożar, przepływa doprowadzone do jego ogniska powietrze oraz powstałe w ognisku gazy pożarowe. Znajomość reakcji spalania oraz składu gazów przed i za ogniskiem pożaru pozwala obliczyć masę spalanego w ognisku pożaru węgla.

Reakcja spalania węgla może być opisana jako [4]:



gdzie:

$a, b, c, d, e, f, g$  – współczynniki stechiometryczne reakcji spalania,

$\left(\frac{H}{C}\right)_f$  – równoważnik ilorazu wodoru i węgla w paliwie,

$\left(\frac{H}{C}\right)_r$  – równoważnik ilorazu wodoru i węgla w produktach pozostałych.

Równanie (13.1) opisuje proces spalania, w którym węgiel reaktywuje się z dostępnym tlenem zawartym w powietrzu, produkując gazy pożarowe, parę wodną i produkty pozostałe. Dolny indeks  $(H/C)_f$  jest równoważnikiem ilorazu wodoru i węgla w paliwie, który zależy od kompozycji węgla uwzględniającej ilość udziału wodoru, substancji węglowej, tlenu, azotu i siarki. Dolny indeks  $(H/C)_r$  jest równoważnikiem ilorazu wodoru i węgla w produktach pozostałych. Produkty pozostałe zwykle

występują w postaci sadzy, smoły, dymów i innych związków nielotnych, których nie określa się w pobieranych próbkach gazowych. Dodatkowo w gazach pożarowych może występować acetylen i etylen.

Gdy spalanie węgla jest bardzo efektywne, duża ilość tlenu zostaje zużyta i głównymi produktami w pożarze są gazy pożarowe i para wodna. W przypadku zupełnego spalania produkuje się tylko ditlenek węgla i parę wodną [3].

Prędkość spalania  $\dot{m}_{pożar}$  (masę paliwa spalanego w czasie) można obliczyć według następującej zależności:

$$\dot{m}_{pożar} = 0,269 \cdot \left( \frac{M_{całk}}{M_C} \right) \cdot \left( \frac{u_{CO_2} + 1,3 \cdot u_{CO}}{100 - u_{CH_4}} \right) \cdot \left[ \frac{\left( \frac{H}{C} \right)_s - \left( \frac{H}{C} \right)_r}{\left( \frac{H}{C} \right)_f - \left( \frac{H}{C} \right)_r} \right] \cdot \dot{V}_{pow} \quad (13.2)$$

gdzie:

$$\left( \frac{H}{C} \right)_s = \frac{1,073 \cdot u_{N_2} - 4 \cdot u_{O_2} - 4 \cdot u_{CO_2} - 2 \cdot u_{CO} + 2 \cdot u_{H_2} + 2 \cdot u_{C_2H_2} + 4 \cdot u_{C_2H_4}}{u_{CO_2} + u_{CO} + 2 \cdot u_{C_2H_2} + 4 \cdot u_{C_2H_4}} \quad (13.3)$$

gdzie:

$\dot{m}_{pożar}$  – prędkość spalania węgla (masa węgla spalanego w jednostce czasu) kg/min;

$\dot{V}_{pow}$  – strumień objętościowy powietrza przepływającego przez ognisko pożaru m<sup>3</sup>/min;

$\frac{M_{całk}}{M_C}$  – iloraz całkowitej masy węgla i masy substancji węglowej zawartej w węglu;

$\left( \frac{H}{C} \right)_s$  – równoważnik ilorazu wodoru i substancji węglowej w gazach pożarowych, obliczony wzorem (13.3);

$\left( \frac{H}{C} \right)_f$  – równoważnik ilorazu wodoru i substancji węglowej w węglu;

$\left( \frac{H}{C} \right)_r$  – równoważnik ilorazu wodoru i substancji węglowej zawierającej w sadzy lub smole (w obliczeniu przyjęto 0,3);

$u_{CO_2}$  – zawartość procentowa ditlenku węgla w próbce gazowej;

$u_{CO}$  – zawartość procentowa tlenku węgla w próbce gazowej;

$u_{N_2}$  – zawartość procentowa azotu w próbce gazowej;

$u_{O_2}$  – zawartość procentowa tlenu w próbce gazowej;

$u_{H_2}$  – zawartość procentowa wodoru w próbce gazowej;

$u_{CH_4}$  – zawartość procentowa metanu w próbce gazowej;

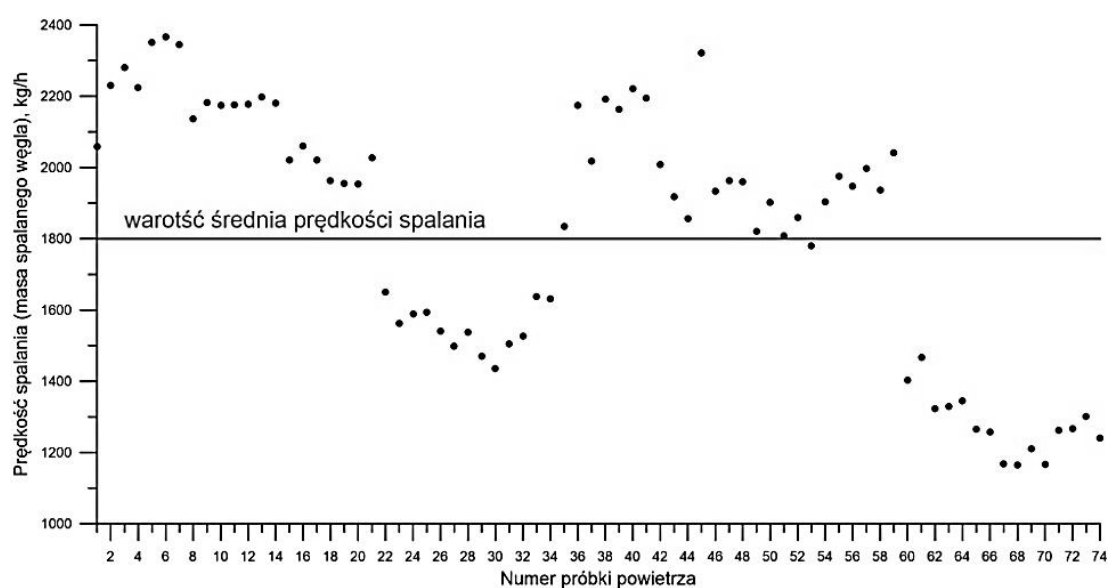
$u_{C_2H_2}$  – zawartość procentowa acetyleny w próbce gazowej;

$u_{C_2H_4}$  – zawartość procentowa etylenu w próbce gazowej.

Obliczenie prędkości spalania (masy paliwa spalanego w czasie) za pomocą równań (13.2) i (13.3), możliwe jest przy przyjęciu odpowiednich założeń. Przede wszystkim zakłada się, że strumień objętościowy powietrza zmierzony na wylocie z wyrobiska z ogniskiem pożaru jest taki sam jak strumień objętościowy powietrza przepływającego przez strefę objętą pożarem. Ważny jest również fakt, iż pomierzony przepływ powietrza powinien reprezentować przepływ w miejscu pobierania próbki

gazowej. Dodatkowo jeżeli jest duży dopływ ditlenku węgla i tlenku węgla do powietrza, które będzie przepływać przez strefę pożarową, to obliczona wartość prędkości spalania (masy paliwa spalanego w czasie) będzie zawyżona. Obliczona prędkość spalania (masa paliwa spalanego w czasie) dotyczy kompleksowej oceny stanu pożaru w całej strefie pożarowej (rzeczywista wartość w niektórych wyrobiskach może być obciążona dużym błędem).

Do określenia masy węgla spalanego w ognisku pożaru wykorzystano dane z pożaru, który wystąpił w jednej z kopalń węgla kamiennego. Dane te obejmują zapis analiz chromatograficznych gazów pożarowych pobieranych na tamie wylotowej z rejonu objętego pożarem. Dodatkowo określano strumień powietrza przepływającego przez wyrobisko, w którym wystąpił pożar. Dane obejmują okres 3 dni trwania pożaru (próbka pobierana co godzinę – łącznie 72 próbki). W tym czasie przepływ powietrza przez wyrobisko był na stałym poziomie. Na rysunku 13.3 przedstawiono wykres zmian prędkości palenia się węgla określonej na podstawie zależności (13.2). W ciągu trzech dni od momentu rejestrowania składu gazów pożarowych chromatografem prędkość spalania wahała się od około 1200 *kg/min* do 2400 *kg/min*, a średnio wynosiła 1800 *kg/min*.



Rys. 13.3 Zmiany prędkości palenia się węgla w ognisku pożaru

### 13.3 SPALANIE Z NADMIAREM I NIEDOBOREM TLENU – SPALANIE ZUPEŁNE I NIEZUPEŁNE

Zużycie tlenu w pożarze podziemnym zależy przede wszystkim od stopnia rozwoju pożaru, temperatury i warunków przewietrzania. Z uwagi na rodzaj węgla, temperaturę itp. trudno określić wpływ adsorpcji tlenu na powierzchni węgla na podstawie analizy teoretycznej.

Znając jednak skład spalanego w ognisku pożaru paliwa można określić teoretyczną (stechiometryczną) masę powietrza potrzebnego do spalania 1 *kg* paliwa [7]:

$$\dot{m}_{pow.min} = \frac{1}{0,23} \cdot \left( \frac{8}{3} \cdot C + 8 \cdot H \right) + S - O \quad (13.4)$$

gdzie:

$C$  – udział masowy węgla w paliwie,

$H$  – udział masowy wodoru w paliwie,

$S$  – udział masowy siarki w paliwie,

$O$  – udział masowy tlenu w paliwie.

Pożar endogeniczny przy nadmiarze tlenu posiada podobny mechanizm spalania węgla jak przy spalaniu w kotłach energetycznych. Wszystkie gazy lotne wyprodukowane w ognisku pożarowym zostają spalane. Płomień pożaru w drodze konwekcji i promieniowania cieplnego podgrzewają sąsiednie substancje palne do ich punktu zapłonu, utrzymując kontynuowanie i rozwijanie się spalania. Ogrzewa się materiał wokół strefy spalania oraz warstwa w głąb materiału. Zasięg pożaru, jego intensywność i prędkość rozproszenia się ognia są małe. Ubytek tlenu jest mały, zatem duża ilość tlenu pozostaje w gazach wypływających z ogniska pożaru. Zazwyczaj stężenie tlenu w gazach spalinowych utrzymuje się w granicy 15% obj., dlatego takie pożary nazywa się pożarami z nadmiarowym tlenem [5, 8]. Jeżeli przy spalaniu węgla w temperaturach ponad 650°C występuje nadmiar tlenu, to wyprodukowane gazy palne ulegają spalaniu, a produktami spalania są w pierwszym rzędzie ditlenek węgla, tlenek węgla, wodór i para wodna. Gazy te mogą występować w zesatwieniu z małymi ilościami ditlenku siarki (przy występowaniu siarki w złożu węgla), nie zużytym tlenem oraz pozostałymi gazami zwanymi gazem residualnym. W gazie residualnym przeważa nadmiarowa ilość azotu. Nadmiar azotu jest wynikiem ubytku tlenu w procesie spalania. Ponadto w gazie tym występują produkty spalania CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> oraz węglowodory [8]. Występujący w gazie tlenek węgla może być wynikiem spalania lub też może powstawać drogą utleniania w temperaturze otoczenia.

Znając lub przyjmując masę materiału spalnego w ognisku pożaru wyznaczyć można tzw. współczynnik nadmiaru powietrza:

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{dop}}{\dot{V}_{pow.min}} \quad (13.5)$$

gdzie:

$\dot{V}_{dop}$  – strumień objętościowy powietrza doprowadzanego do ogniska pożaru, m<sup>3</sup>/s;

$\dot{V}_{pow.min}$  – teoretyczny (stechiometryczny) strumień objętości powietrza potrzebnego do spalania palącego się materiału, m<sup>3</sup>/s.

Temperaturę spalania w ognisku pożaru  $T_{sp}$  można obliczyć na podstawie zależności [7]:

$$T_{sp} = \frac{W_u \cdot \eta_{sp} \cdot (1 - \sigma)}{(1 + \lambda_n \cdot \dot{m}_{pow.min}) \cdot c_{gp}} + T_o \quad (13.6)$$

gdzie:

$W_u$  – wartość opałowa paliwa, kJ/kg,

$\eta_{sp}$  – sprawność spalania,

$\sigma$  – współczynnik określający stosunek ilości ciepła odebranego w miejscu spalania materiału palnego do całkowitego ciepła wydzielonego w procesie spalania,

$\lambda_n$  – współczynnik nadmiaru powietrza,

$\dot{m}_{pow.min}$  – teoretyczna (stechiometryczna) masa powietrza potrzebnego do spalania 1 kg paliwa, kg/kg;

$c_{gp}$  – ciepło właściwe gazów pożarowych, kJ/kg·K;

$T_o$  – temperatura powietrza doprowadzanego do miejsca spalania, K.

Pewien problem stwarza określenie kiedy i z jaką dynamiką rozprzestrzenia się pożar w wyrobiskach górniczych. Wynika, to z problemu określenia czy pali się węgiel rozdrobniony, czy może mamy do czynienia z paleniem się ociosu węglowego. Dodatkowym czynnikiem może być palenie się wyposażenia w postaci elementów gumowych czy również spalanie metanu w ognisku pożaru. Wszystkie te czynniki są trudne do oszacowania. W przypadku palenia się rozdrobnionego węgla i sprzyjających warunków dopływu tlenu do ogniska pożaru może dochodzić do szybkiego jego rozprzestrzeniania i coraz to większa masa węgla będzie ulegała paleniu. W przypadku palenia węgla w ociosach rozwój pożaru może nie być już tak dynamiczny. Zwęglenie materiału na grubość 10 mm powoduje utrudnione przenikanie ciepła w głąb materiału i hamuje emisję produktów rozkładu paliwa. Utworzenie się warstwy zwęglonego materiału znacząco ogranicza również dopływ tlenu. Wewnętrzna warstwa materiału przechodzi w tzw. bezpłomieniowe heterogeniczne utlenianie. W efekcie tego dochodzi do zmniejszenia rozmiarów strefy spalania [5].

Przyjmując, że spalanie węgla osiąga coraz większy zasięg, to wzrasta ilość zużywanego tlenu, produkowana jest większa ilość gazów i pary wodnej. Punkt kulminacyjny występuje, kiedy ciepło spalania osiągnie temperaturę poziomu destylacji. Powstaje wtedy proces spalania z niedoborem tlenu. W tym przypadku intensywność spalania jest duża, a temperatura wysoka [8].

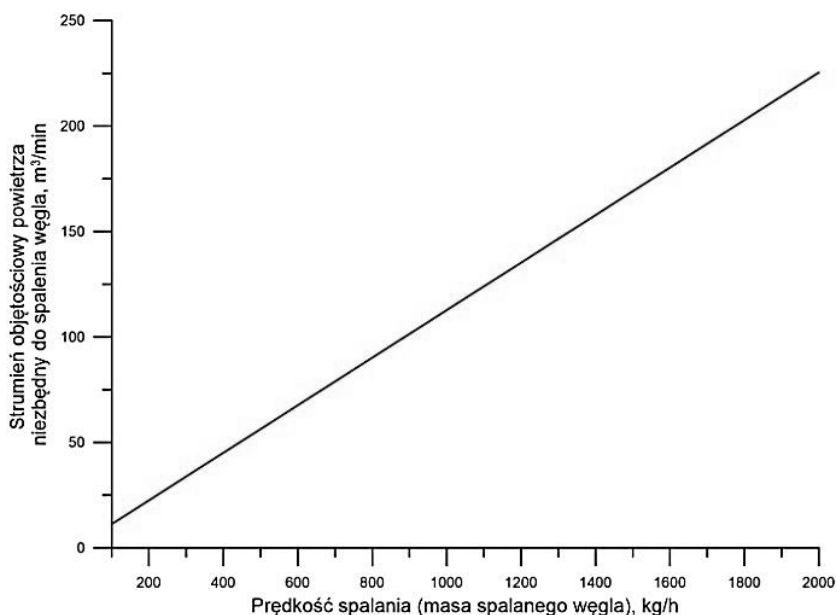
Duża ilość wydzielonych, gorących gazów nie tylko spala się w strefie ogniska, ale również spotyka się z prądem powietrza podgrzanego przez ognisko pożaru tworząc przepływ gorących gazów, podgrzewając substancje palne i zwieszając ilość wydzielających się gazów. Dodatkowo wydzielane ciepło w miejscu palenia się węgla w drodze konwekcji i promieniowania podgrzewa sąsiednie substancje palne aż do ich punktu zapłonu. Wskutek ciągłego istnienia i rozwoju obydwóch czynników utrzymywania palenia, pożar rozwija się i osiąga coraz większy zasięg. Wzrost intensywności procesu spalania powoduje, że zawartość tlenu w migrującym powietrzu zostaje prawie całkowicie zużyta. W takim przypadku stężenie tlenu w gazach migrujących z ogniska pożaru jest zwykle niższe od 5% obj.

Jeżeli do ogniska pożaru ograniczy się dopływ tlenu, to powstają gazy pożarowe o podobnym składzie do gazów wyprodukowanych podczas suchej destylacji węgla. Zatrzymanie wentylacji przez otamowanie pola pożarowego lub zawał stropu wyrobisk spowoduje odcięcie dopływu tlenu. Pożar przy niedoborze tlenu może mieć miejsce również w przypadku wtłaczania azotu do ogniska pożarowego. Skład produktów suchej destylacji zależy od temperatury spalania. Z palnych gazów wyprodukowanych w

suchej destylacji węgla ok. 6-14% stanowi tlenek węgla. Węglowodory, składające się głównie z metanu, który produkowany jest w niższych temperaturach, zanikają wraz ze wzrostem temperatury, a wzrasta zawartość wodoru.

Przedstawiona w pracy [8] analiza statystyczna 10000 próbek gazowych pobranych z wylotów za ogniskiem pożaru w wyrobiskach nieotamowanych. Wyniki tych analiza wskazują, że w nieotamowanych polach pożarowych ponad 85% pożarów odbywa się z nadmiarem tlenu.

Na rysunku 13.4 przedstawiono zależność pomiędzy prędkością spalania węgla, a niezbędną ilością powietrza potrzebną do jego spalania. Z wykresu wynika, że strumień objętościowy powietrza doprowadzanego do ogniska pożaru celem zatrzymania rozwoju pożaru powinien być nieduży, więc dopływ powietrza do rejonu objętego pożarem powinien być możliwie szybko ograniczony. Należy zwrócić uwagę na to iż ograniczenie to powinno być znaczne, co wymaga zbudowania szczelnej tamy na wlocie do rejonu.



Rys. 13.4 Zależność pomiędzy prędkością spalania węgla, a strumieniem objętościowym powietrza potrzebnym do jego spalania

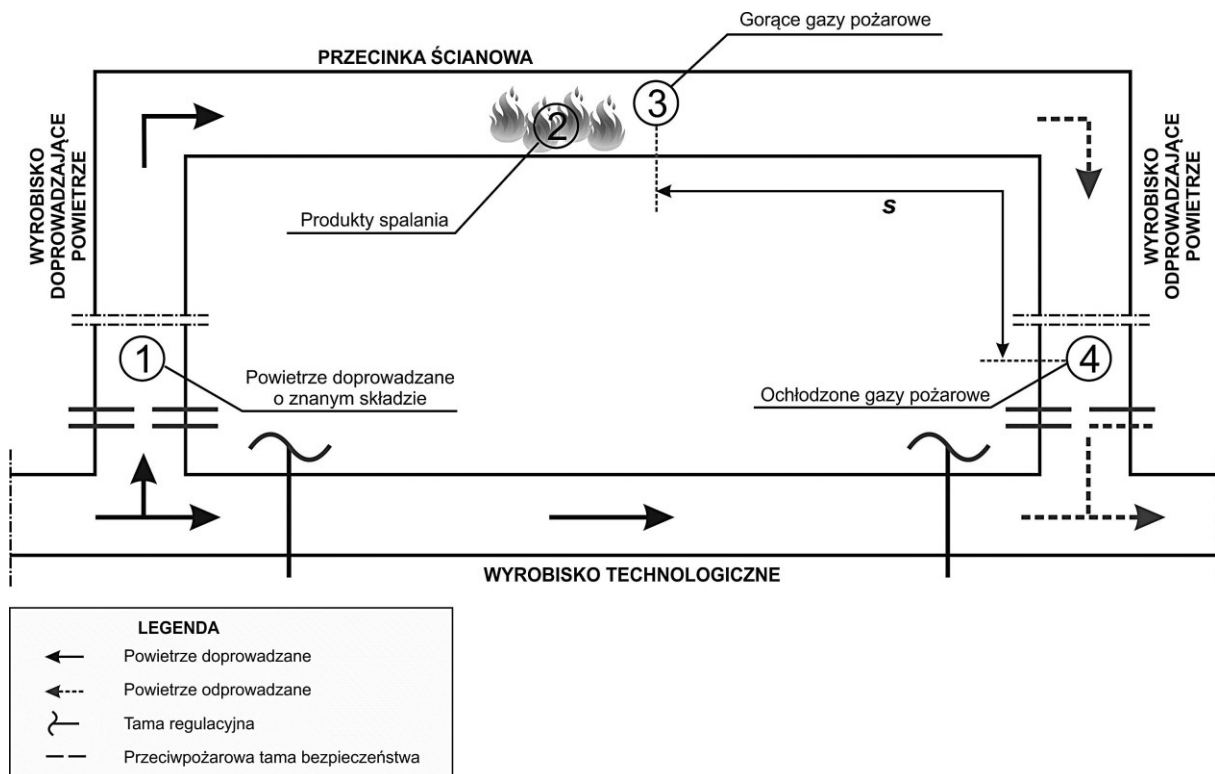
### 13.4 ZMIANA TEMPERATURY GAZÓW POŻAROWYCH

Przepływające wyrobiskami gazy pożarowe posiadają niekiedy bardzo wysoką temperaturę. Może to stanowić niebezpieczeństwo dla pracujących pod ziemią ratowników. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń temperatury gazów pożarowych przepływających wyrobiskami za ogniskiem pożaru dla różnych wariantów. W poszczególnych wariantach zmianie ulegały takie parametry jak masa palącego się węgla czy strumień doprowadzanego do ogniska pożaru powietrza.

Obliczenia wykonywane były przy założeniu przepływu powietrza przez wyrobisko w którym wystąpił pożar zgodnie z rysunkiem 13.5. Do ogniska pożaru doprowadzane jest powietrze o znanym wydatku objętościowym, składzie i temperaturze (punkt 1 – rys. 13.5). Następnie w miejscu wystąpienia pożaru część



strumienia powietrza bierze udział w procesie palenia i powstają możliwe do obliczenia produkty spalania (punkt 2 – rys. 13.5) – spalanie z nadmiarem tlenu. Za ogniskiem pożaru produkty spalania mieszają się z powietrzem doprowadzającym do jego ogniska, a nie biorącym udziału w procesie palenia. Powstają gorące gazy pożarowe o znanym składzie i znanej temperaturze (punkt 3 – rys. 13.5). Powietrze za ogniskiem pożaru posiada najwyższą temperaturę. Następnie przepływając wyrobiskami ochładza się, oddając ciepło do górotworu. W punkcie 4 zlokalizowanym w pewnej odległości  $s$  od ogniska pożaru (rys. 13.5) gazy pożarowe będą posiadały prognozowaną temperaturę.



Rys. 13.5 Schemat przepływu powietrza przez wyrobisko z ogniskiem pożaru

W celu obliczenia zmian temperatury gazów pożarowych na wylocie z wyrobiska w którym wystąpił pożar w artykule posłużono się następującą zależnością [9]:

$$t(s) = t_a - (t_{po} - t_a) \cdot \exp \left[ -\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{sk} \cdot K \cdot s}{\dot{V}_{dop} \cdot \rho \cdot c_p} \right] \quad (13.7)$$

gdzie:

$t_a$  – temperatura powietrza dopływającego do ogniska pożaru, °C;

$t_{po}$  – temperatura gazów pożarowych, °C;

$\lambda_{sk}$  – współczynnik przewodzenia ciepła skał, W/(m·K);

$K$  – bezwymiarowy gradient temperatury skał (liczba Kirpiczewa) będąc funkcją liczby Biota i liczby Fouriera,

$s$  – współrzędna bieżąca (odległość od ogniska pożaru), m;

$\dot{V}_{dop}$  – strumień objętościowy powietrza doprowadzanego do ogniska pożaru, m<sup>3</sup>/s;

$\rho$  – gęstość przepływającego powietrza, kg/m<sup>3</sup>;

$c_p$  – ciepło właściwe przepływającego powietrza,  $J/(kg \cdot K)$ .

Liczbę Biota oblicza się jako:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot r}{\lambda_{sk}} \quad (13.8)$$

gdzie:

$\alpha$  – współczynnik przejmowania ciepła,  $W/m^2 \cdot K$ ;

$r$  – promień hydrauliczny przekroju poprzecznego wyrobiska,  $m$ ;

$\lambda_{sk}$  – współczynnik przewodnictwa cieplnego skał,  $W/m \cdot K$ .

Współczynnik przejmowania ciepła można wyznaczyć z zależności:

$$\alpha = 3,336 \cdot \frac{v_a^{0,8}}{D^{0,2}} \quad (13.9)$$

gdzie:

$v_a$  – prędkość przepływu powietrza w przekroju poprzecznym wyrobiska,  $W/m^2 \cdot K$ ;

$D$  – średnica wyrobiska,  $m$ .

Liczbę Fouriera oblicza się jako:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{r^2} \quad (13.10)$$

gdzie:

$a$  – współczynnik wyrównywania temperatury,  $m^2/s$ ;

$\tau$  – czas przewietrzania wyrobiska,  $s$ ;

$r$  – średnica wyrobiska,  $m$ .

Współczynnik wyrównywania temperatury oblicza się jako [1]:

$$a = 0,35 \cdot (3 - 2 \cdot k_w) \cdot 10^{-6} \quad (13.11)$$

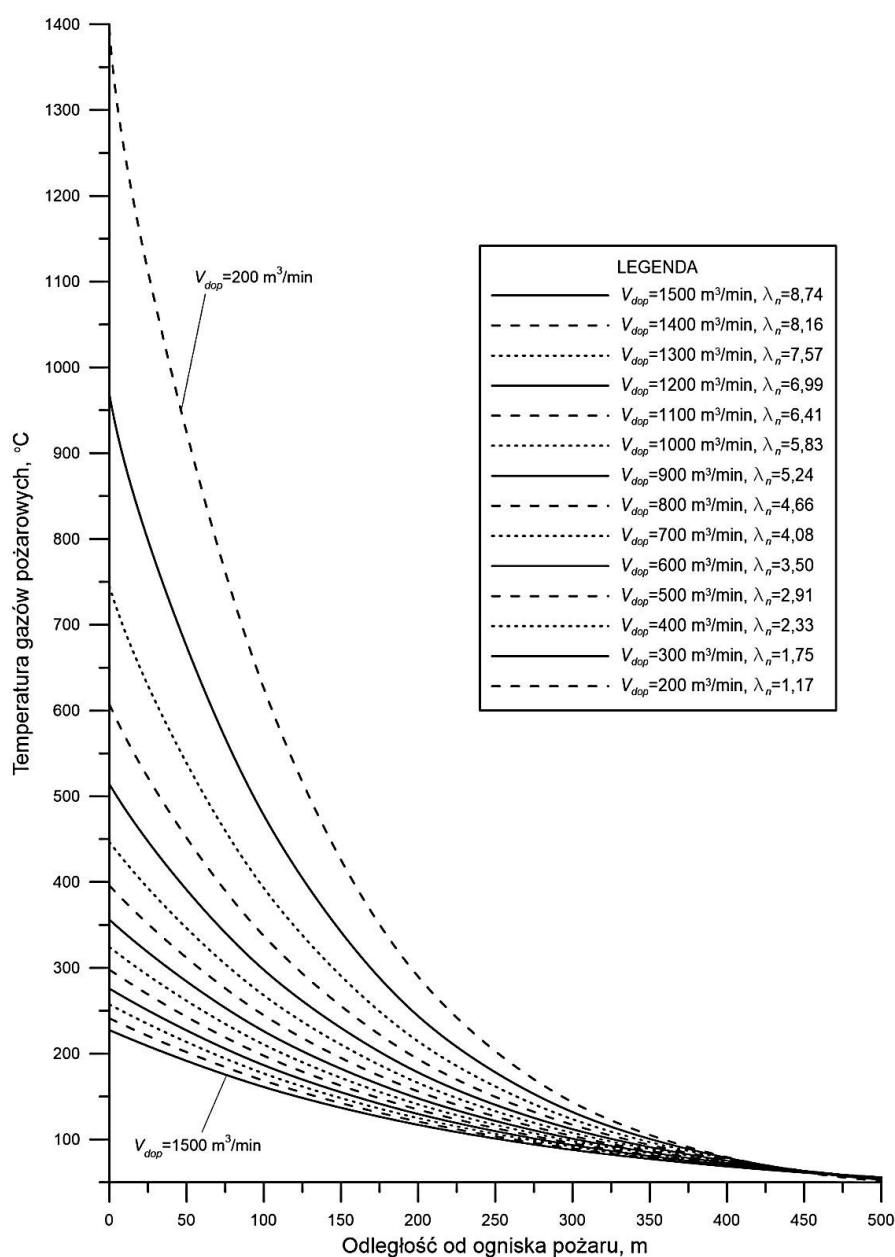
gdzie:

$k_w$  – część obwodu wyrobiska którą stanowi węgiel.

Na rysunku 13.6 przedstawiono prognozowaną temperaturę gazów pożarowych przepływających wyrobiskiem za ogniskiem pożaru. Do obliczeń założono, że w ognisku pożaru spala się węgiel, a prędkość palenia wynosi  $1500 \text{ kg/h}$ . Poszczególne warianty obliczeń zostały wykonane dla strumienia powietrza doprowadzanego do ogniska pożaru od  $1500 \text{ m}^3/\text{min}$  do  $200 \text{ m}^3/\text{min}$ . Przy wydatku powietrza wynoszącym  $200 \text{ m}^3/\text{min}$  spalanie węgla dla przyjętych założeń odbywać się będzie przy nadmiarze tlenu. Obliczenia wykonano dla maksymalnej odległości wynoszącej  $500 \text{ m}$  od ogniska pożaru.

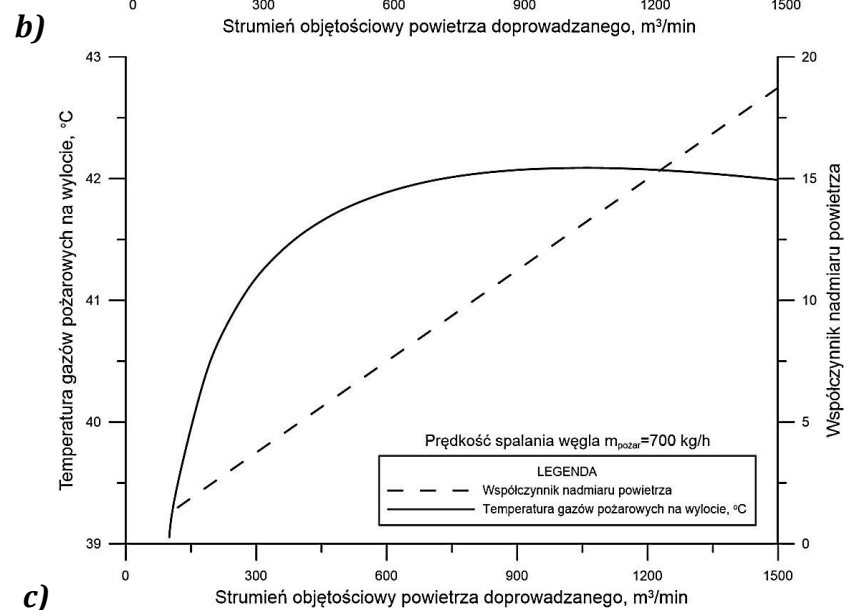
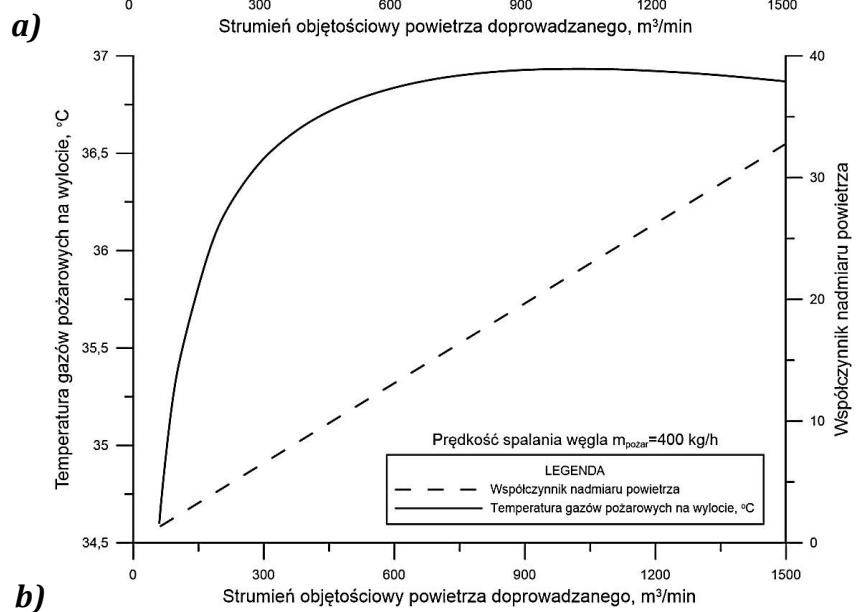
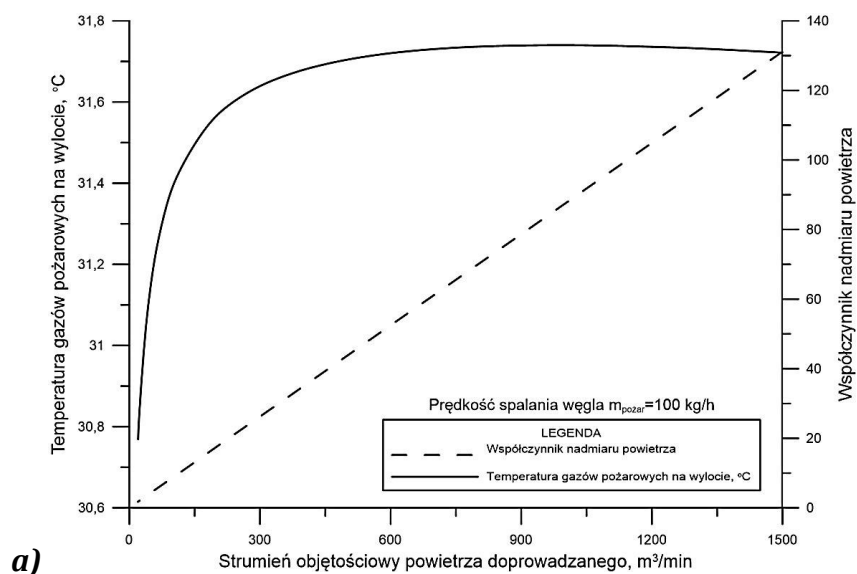
Z przeprowadzonych obliczeń prognostycznych temperatury gazów pożarowych za ogniskiem pożaru wynika, iż w przypadku doprowadzania do ogniska pożaru dużej ilości powietrza temperatura początkowa gazów pożarowych jest niewielka (duży współczynnik nadmiaru powietrza). Zmniejszenie strumienia powietrza doprowadzanego (zmniejszenie współczynnika nadmiaru powietrza) powoduje podwyższenie temperatury początkowej gazów pożarowych. W pewnej odległości za ogniskiem pożaru zarówno dla dużego strumienia doprowadzanego powietrza, jak również mniejszego strumienia powietrza prognozowana temperatura gazów pożarowych uzyskuje podobną wartość. Wynika to z tego, iż niewielki strumień gazów pożarowych o wysokiej temperaturze bardzo intensywnie wymienia ciepło z górotworem. Przedstawione wykresy wskazują, że temperatura gazów pożarowych

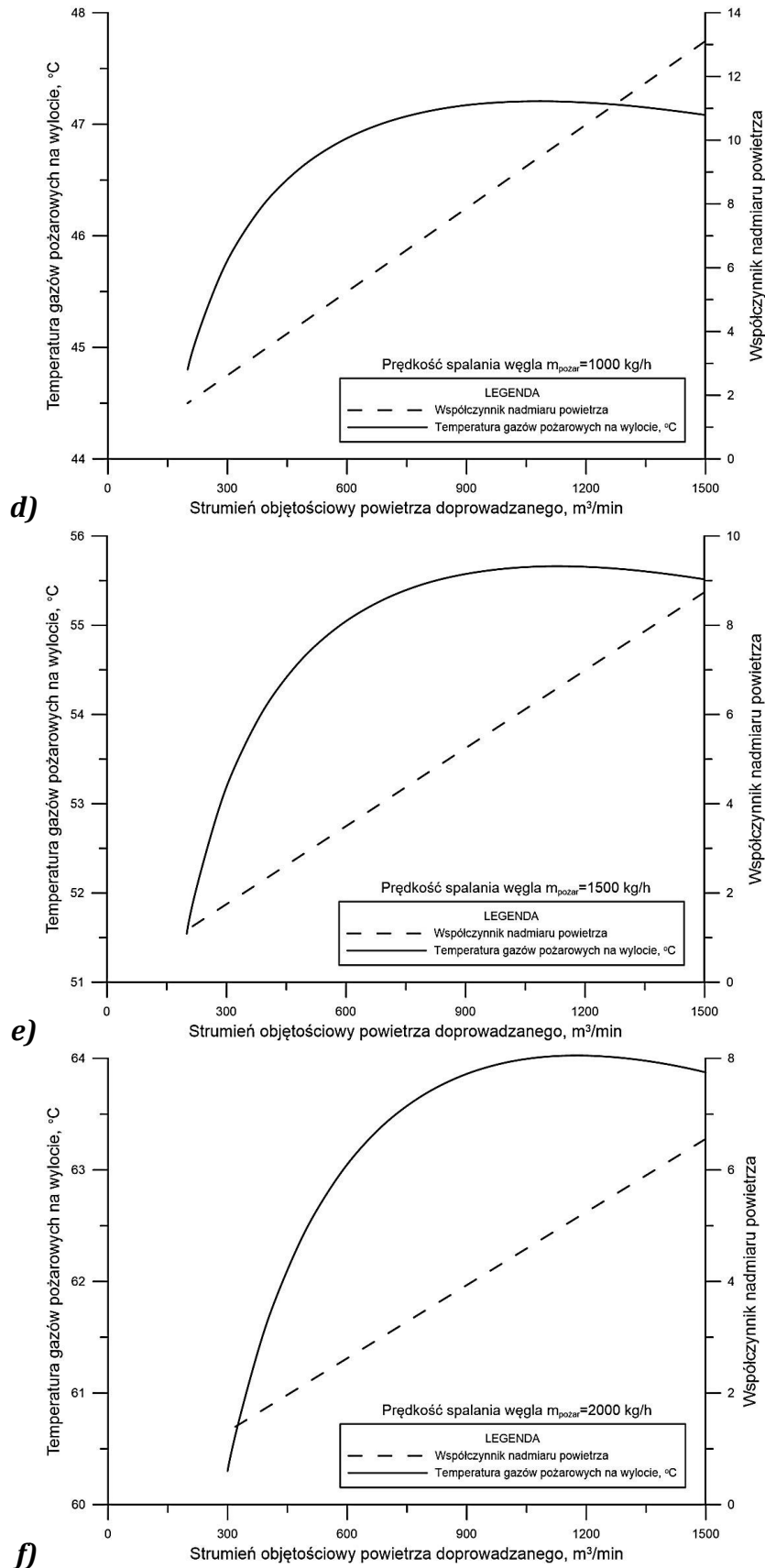
ulega szybkiemu obniżeniu. Wraz ze wzrostem długości drogi przepływu gazów pożarowych będzie ona dążyć do temperatury pierwotnej górotworu.



Rys. 13.6 Prognozowana temperatura gazów pożarowych za ogniskiem pożaru

Kolejne obliczenia wykonane zostały dla różnych prędkości spalania węgla (od 100 kg/h do 2000 kg/h) oraz różnych strumieni doprowadzanego powietrza (od 20 m<sup>3</sup>/min do 1500 m<sup>3</sup>/min). W zależności od prędkości spalania węgla dolna granica wydatku objętościowego powietrza doprowadzanego uzależniona była od faktu, aby spalanie odbywało się z nadmiarem tlenu. Dla każdego z wariantów wyznaczono prognozowaną temperaturę gazów pożarowych na wylocie z wyrobiska, w którym wystąpił pożar. Jako odległość od ogniska pożaru przyjęto odcinek wyrobiska o długości 500 m. Na rysunkach 13.7a-f, przedstawiono wyniki poszczególnych wariantów obliczeń.





Rys. 13.7 Prognozowana temperatura gazów pożarowych na wylocie z wyrobiska z ogniskiem pożaru oraz współczynnik nadmiaru dla różnych ilości powietrza doprowadzanego

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w celu ograniczenia skutków pożaru należy dążyć do możliwie jak najszybszego zamknięcia dopływu powietrza do ogniska pożaru. Obliczenia pokazują również, że zamknięcie to powinno być szczelne. Przy założeniu, że w ognisku pożaru spala się węgiel w ilości 2000 kg/h dopływ powietrza doprowadzanego należy ograniczyć do strumienia objętościowego poniżej 300 m<sup>3</sup>/min, co nie zawsze jest możliwe do zrealizowania w krótkim czasie. Obniżenie strumienia powietrza doprowadzanego spowoduje, że w ognisku pożaru rozpocznie się spalanie przy niedoborze tlenu i zgodnie w przedstawionymi w artykule rozważaniami możliwe będzie zahamowanie procesu palenia materiału palnego (węgla) w ognisku pożaru.

### 13.5 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Rozważania przeprowadzone w artykule pozwalają stwierdzić, że w przypadku wykrycia pożaru w wyrobisku należy dążyć do jak najszybszego zamknięcia dopływu powietrza do ogniska pożaru. Wykonane analizy wykazały, że tamowanie powinno być bardzo szczelne. Dla wyznaczonej, dla analizowanego pożaru, masy spalanego w ognisku pożaru węgla potrzeba stosunkowo niedużego strumienia objętościowego powietrza, aby spalanie mogło się odbywać przy nadmiarze tlenu. Wykonanie szczelniej tamy, pozwalającej na tak znaczące ograniczenie dopływu powietrza może być trudne do wykonania w warunkach kopalnianych.

Praktyka górnicza pokazuje, że bardzo często w przypadku wystąpienia pożaru nie udaje się zamknąć wewnątrzrejonowych tam bezpieczeństwa. W takim przypadku rozwój pożaru zmusza do podjęcia decyzji o izolowaniu większej części rejonu prowadzonej eksploatacji. Uwięziony w polu pożarowym kosztowny sprzęt może być na długi okres czasu niedostępny. Bardzo często okazuje się również, że po otworzeniu pola pożarowego nie jest on zdalny do dalszego wykorzystania. Prowadzone przez długi okres czasu akcje ratownicze oraz zniszczenia sprzętu generują wysokie koszty. Dodatkowo nie można prowadzić eksploatacji w udostępnionym już rejonie. Aby tego uniknąć zaleca się poszukiwanie rozwiązań pozwalających na możliwie najszybsze zaizolowanie rejonu, w którym wystąpił pożar, aby poprzez organicznie dopływu powietrza nie dopuścić do jego rozwoju. Pozwoli to na skrócenie czasu występowania pożaru oraz jego wcześniejsze ugaszenie i wejście do zagrożonego rejonu.

Przeprowadzone analizy pozwalają stwierdzić, że szybkie zaizolowanie rejonu oraz ograniczenie strumienia powietrza doprowadzanego do wyrobiska z pożarem pozwala na obniżenie temperatury gazów pożarowych na tamie wylotowej. Jest to bardzo istotne dla bezpieczeństwa załogi pracującej przy zabezpieczeniu rejonu. Pole pożarowe powinno być po zaizolowaniu kontrolowane poprzez pobieranie prób gazów z za tam celem określenia stanu pożaru.

*Artykuł zrealizowano w ramach prac statutowych 11.11.100.774*

## LITERATURA

1. Główny Instytut Górnictwa: Wytyczne prowadzenia robót górniczych w warunkach zagrożenia klimatycznego w kopalniach eksploatujących złoża na dużych głębokościach. GiG, Katowice 1981
2. Główny Instytut Górnictwa: Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. GiG, Katowice 2014
3. J.B. Harju, Coal combustion Chemistry. Pollution Engineering, May 1980, s. 54-60
4. Herman, J.D. McAteer, Estimating the Rate of Coal Combustion in a Mine Fire. IR 1249, U.S. Department of Labor, 1999
5. Mizieliński, G. Kubicki, Wentylacja pożarowa – oddymianie. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2012
6. Projekt strategiczny NCBiR nr SP/K/2/143445/11: Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach. Zadanie nr 2: Opracowanie zasad projektowania robót górniczych w warunkach występowania skojarzonego zagrożenia metanowo-pożarowego w aspekcie systemów przewietrzania w podziemnych zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny. Etapy 2, 9, 11, 13, 15 realizowane w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii w latach 2011-2013
7. Strumiński, Zwalczanie pożarów w kopalniach głębinowych. „Śląsk” Sp. z o.o., Katowice 1996
8. N. Szlązak, S. Yuan, D. Obracaj, Zagrożenie pożarowe w kopalniach węgla kamiennego i metody jego oceny. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2005
9. J. Waclawik, Wentylacja kopalń – tom 2. Wydawnictwa AGH, Kraków 2010
10. Wyższy Urząd Górniczy: Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górniczo-geologiczną w 2014 roku. Wyższy Urząd Górniczy, Katowice 2015

*Data przesłania artykułu do Redakcji: 02.2016*  
*Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2016*

prof. dr hab. inż. Nikodem Szlązak, dr inż. Marek Korzec  
AGH w Krakowie  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska  
e-mail: szlazak@agh.edu.pl; mkorzec@agh.edu.pl

## ANALIZA ZMIAN ROZWOJU POŻARU PODZIEMNEGO

**Streszczenie:** Prowadzenie eksploatacji w polskich kopalniach węgla kamiennego wiąże się z występowaniem wielu zagrożeń naturalnych. Jednym z nich jest zagrożenie pożarami endogenicznymi. Wynika ono z faktu, iż eksploatowana kopalina jest palna i posiada mniejszą bądź większą skłonność do samozapalenia. Na przestrzeni lat liczba pożarów występujących w kopalniach została znacząco zredukowana. Pomimo tego wystąpienie pożaru niesie za sobą poważne konsekwencje. Stanowi zagrożenie dla pracującej pod ziemią załogi, ale także bardzo często wymaga poniesienia znacznych strat materialnych.

Wykrycie pożaru w kopalniach podziemnych następuje zazwyczaj stosunkowo szybko. Wynika to ze stosowania systemów CO-metrii automatycznej. Ważne jest jednak w przypadku wykrycia zagrożenia odpowiednich działań zmierzających do możliwie szybkiego zabezpieczenia rejonu objętego pożarem. Bardzo ważne jest bowiem nie dopuszczenie do rozwinięcia pożaru. W artykule przeprowadzona została analiza prędkości spalania węgla w ognisku pożaru oraz wariantowa prognoza temperatury gazów pożarowych za ogniskiem pożaru. Przeprowadzone obliczenia pozwalają stwierdzić, że w celu ograniczenia skutków pożaru, w pierwszej kolejności należy dążyć do jak najszybszego odciążenia dopływu powietrza do ogniska pożaru.

**Słowa kluczowe:** pożar podziemny, pożar endogeniczny, rozwój pożaru, tamowanie pożarów podziemnych

## ANALYSIS OF CHANGING MINE FIRE DEVELOPMENT

**Abstract:** Mining coal seams in Polish coal mines are connected with natural hazards occurrence. One of this hazards is fire hazard resulting from mining combustible material. Each type of coal is more or less combustible. Although in recent years the number of fires has decreased significantly, the occurrence of fire in the underground mine is very dangerous. It endangers miners' lives and also leads to substantial material damage.

Usually the detection of fire is relatively quickly, because in mines CO-detection systems are used. However, it's very important to take prompt decisions when a fire occurs in a mine. The most important thing is not to allow for the development of a fire. The analysis of changing in the mass of burned coal and prediction of fire gases temperature are conducted in the article. These analysis show that the best way to reduce the fire development is reducing significantly the volumetric airflow through the excavation with fire.

**Key words:** underground mining fire, spontaneous fire, fire development, fire control by ventilation ways