

Janusz CYGANKIEWICZ
Główny Instytut Górnictwa, Katowice

PROGNOZOWANIE CZASU STYGNIEŃ ZAGRZANEGO FRAGMENTU ZŁOŻA WĘGLA

Streszczenie. W artykule omówiono metodę prognozowania procesu stygnięcia zagrzanego fragmentu złoża węgla. Podstawą metody są wyznaczone laboratoryjnie parametry fizykochemiczne węgla i otaczających skał oraz matematyczny model procesu. W referacie przedstawiono wyniki obliczeń prognostycznych ze szczególnym uwzględnieniem wpływu grubości warstwy węgla, prędkości gazów przepływających przez złożo węgla oraz zawartości tlenu w tych gazach na proces stygnięcia.

ASSESSMENT OF DURATION OF COOLING OFF PERIOD FOR THE HEATED SECTION OF COAL SEAM

Summary. In this paper a method was presented for assessment of duration of cooling off period for the heated section of a coal seam. The basis of the method is laboratory investigation aiming at determination of physical and chemical parameters of coal seam section and rocks surrounding it as well as mathematical modeling of the processes involved. Also in the paper the results were presented of prognostic calculations, taking into account the influence of the thickness of the coal seam, velocity of gaseous flows and oxygen concentration on the cooling off process.

1. Wstęp

Po zaizolowaniu pola pożarowego i zinertyzowaniu atmosfery wewnątrz pola następuje proces wygaszenia a następnie wychładzania zagrzanego masy węgla i otaczających skał. Szybkość tego wychładzania zależy od wielu czynników do których należy zaliczyć między innymi:

- masę zagrzanego węgla i skał,
- kształt geometryczny złoża,

- rozkład temperatury w zagrzanym złożu i otaczających skałach,
- prędkość przepływu gazów przez rozkruszony węgiel,
- zawartość tlenu w gazach,
- sposób odprowadzenia ciepła do otoczenia,
- rodzaj otaczających skał,
- rodzaj płynu mającego bezpośredni kontakt z powierzchnią węgla.

Podstawowym kryterium umożliwiającym otwarcie pola a następnie jego przewietrzenie jest osiągnięcie przez zagrzany węgiel temperatury niższej od temperatury krytycznej.

Ocenę maksymalnej temperatury węgla w polu pożarowym powinno się przeprowadzać w dwojaki sposób:

- Progностyczny, oparty na opracowanym w GIG matematycznym modelu procesu wychładzania złoża zagranego węgla, uwzględniającym wszystkie czynniki mające istotny wpływ na ten proces.
- Oparty na bieżącej analizie chemicznej prób gazów pobieranych z otamowanego pola przeprowadzonej zgodnie z opracowaną w GIG metodą kalorymetryczno-chromatograficzną.

Zasadą jest, aby oceny temperatury zagranego węgla przeprowadzone w ten sposób były zbieżne. Podkreślić należy, że przedstawiony w referacie sposób został pozytywnie zweryfikowany przy ocenie stanu otamowanych pól pożarowych kopalń: „Rydułtowy”, „Pniówek”, „Budryk”, „Brzeszcze” i „Sośnica”. W dalszej części pracy omówione zostaną sposoby wyznaczenia temperatury zagranego węgla w polu pożarowym i przedstawione w praktyce przykłady.

2. Badania laboratoryjne dla wyznaczenia parametrów węgla i otaczających skał niezbędnych do obliczeń progностycznych

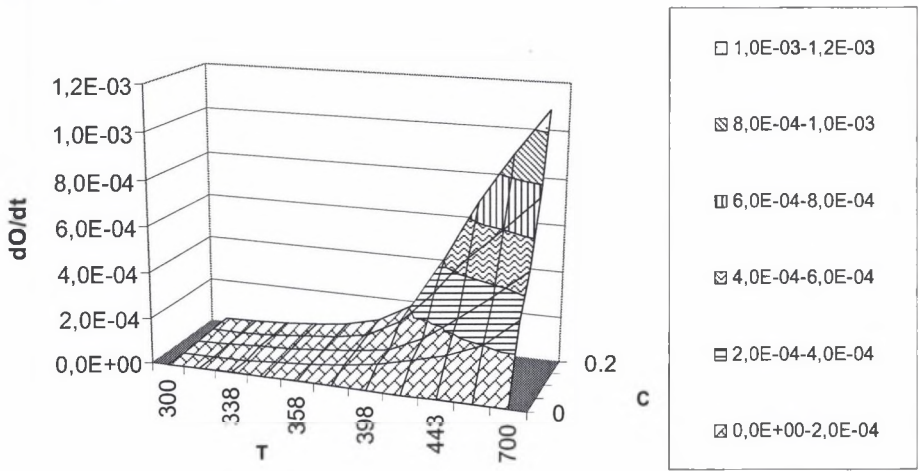
Badania przeprowadza się na zbudowanym do tego celu w Zakładzie Aerologii GIG stanowisku badawczym. Podstawę stanowiska stanowi 10 kalorymetrów adiabatycznych (Cygankiewicz 2000). Świeżo pobraną z calizny próbkę węgla o masie około 1kg umieszcza się w moździerz, a następnie rozkrusza się opuszczając na nią 15-krotnie z wysokości 1

metra ciężar o masie 5 kg. Tak otrzymany miał węglowy umieszcza się w kalorymetrach, do których z kolei doprowadza się powietrze o zawartości tlenu 20,9%.

15,0%, 10% i 5% w ilościach od 0,2 do 1,0 l/godz w zależności od typu węgla.

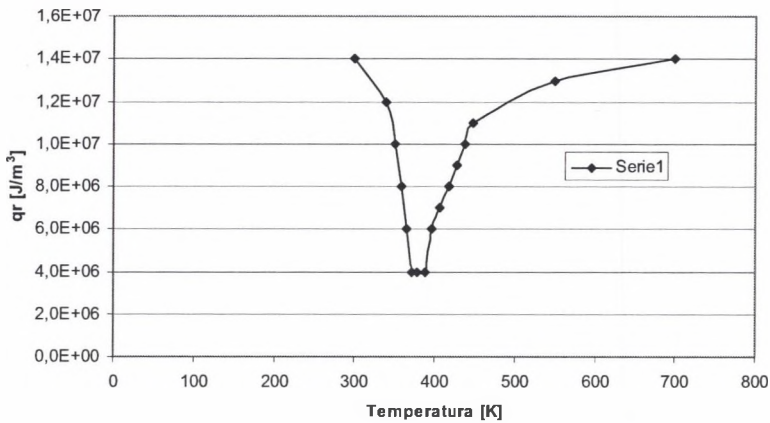
W wyniku zachodzących egzotermicznych procesów utleniania węgiel zagrzewa się.

Zmierzoną w warunkach laboratoryjnych szybkość utleniania $\frac{dO}{dt}$ (ilość tlenu pochłanianą przez 1 m³ rozkruszonego węgla w jednostce czasu) węgla z pokładu 209 w funkcji temperatury pokazano na rys.1.



Rys. 1. Szybkość reakcji utleniania węgla z pokładu 209 w funkcji temperatury i zawartości tlenu
 Fig. 1. Oxidation rate of coal sample from 209 seam as a function of temperature and oxygen concentration

Równocześnie z szybkością reakcji utleniania wyznaczane jest ciepło reakcji utleniania q_r (całkowita ilość ciepła wydzielona przy pochłonięciu przez węgiel 1m³ tlenu). Ciepło reakcji utleniania węgla o naturalnej zawartości wilgoci z pokładu 209 w funkcji temperatury pokazano na rys.2.



Rys. 2. Ciepło reakcji utleniania wyznaczone dla próby węgla z pokładu 209
 Fig. 2. Reaction heat determined for sample of coal from 209 seam

Pozostałe parametry węgla i otaczających skał, takie jak: gęstość, ciepło właściwe, współczynnik przewodnictwa cieplnego wyznacza się zgodnie z obowiązującymi normami.

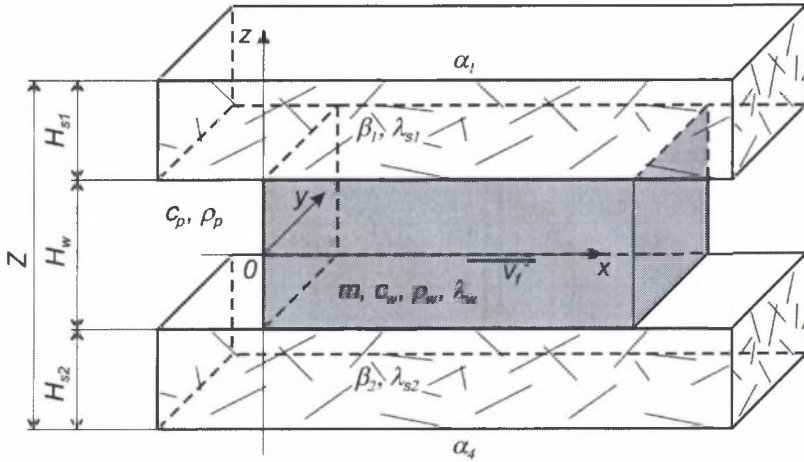
3. Obliczenia prognostyczne procesu stygnięcia zagrzanego fragmentu złoża

Próby modelowania procesu samozagrzewania i stygnięcia podejmowane były już od wielu lat. W ostatnich latach wraz z rozwojem techniki obliczeniowej pojawiły się rozwiązania coraz bardziej złożonych zagadnień (Branny M. 1995, 1997, Cygankiewicz J. 2003)

3.1. Matematyczny model procesu samozagrzania złoża węgla

Złoże rozkruszonego węgla traktuje się jako ośrodek porowaty, niejednorodny, ograniczony nieprzepuszczalnymi lub w niektórych przypadkach przepuszczalnymi skałami lub też wyrobiskami, w których przepływa powietrze. Zakłada się, że rozpatrywane ciało porowate jest izotropowe i stałe fizyczne ośrodka charakteryzującego procesy transportu masy, pędu i energii takie, jak: współczynniki przewodnictwa cieplnego, dyfuzji i przepuszczalności filtracyjnej są wielkościami skalarnymi. Składniki gazowe przenoszone są w tym ośrodku poprzez konwekcję i dyfuzję. Przyjmuje się, że przez złoże rozkruszonego węgla przepływają gazy z prędkością filtracyjną v_f .

W niniejszym referacie przedstawiony jest model stygnięcia fragmentu złoża o kształcie prostopadłościanu obustronnie sąsiadującego ze skałami (rys.6).



Rys.3. Model geometryczny stygnącego fragmentu złoża węgla obustronnie sąsiadującego ze skałami
 Fig. 3. Geometrical model of cooling down of coal seam surrounded by rocks

Równania bilansu energii mają postać:

➤ dla skał znajdujących się nad złożem węgla:

$$c_s \rho_s \frac{1}{s_h} \frac{\partial T}{\partial \tau} - \lambda_{s1} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = 0, \quad 0 < x < X, 0 < z < Z_{sw}, \quad 0 < \tau < \tau_f,$$

➤ dla zagrzewającego się złoża węgla:

$$c_w \rho_w \frac{1}{s_h} \frac{\partial T}{\partial \tau} - \lambda_w \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + c_g \rho_g v_f \frac{\partial T}{\partial x} = q_r \rho_g \frac{dO}{dt}, \quad 0 < x < X, Z_{sw} < z < Z_{ws}, \quad 0 < \tau < \tau_f,$$

➤ dla skał znajdujących się pod złożem:

$$c_s \rho_s \frac{1}{s_h} \frac{\partial T}{\partial \tau} - \lambda_{s2} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = 0, \quad 0 < x < X, Z_{ws} < z < Z, \quad 0 < \tau < \tau_f,$$

Równanie bilansu masy tlenu w złożu ma postać:

$$m \frac{1}{s_h} \frac{\partial C}{\partial \tau} - mD \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] + v_f \frac{\partial C}{\partial x} = -\rho_g \frac{dO}{dt}, \quad 0 < x < X, Z_{sw} < z < Z_{ws}, \quad 0 < \tau < \tau_f,$$

Warunki graniczne mają postać:

Temperatura na brzegach złoża i w chwili początkowej

$$T(x, z, 0) = T_0, \quad 0 < x < X, 0 < z < Z;$$

$$T(0, z, \tau) = T_0, \quad T_x(X, z, \tau) = 0, \quad 0 < z < Z, \quad 0 < \tau < \tau_f.$$

Warunki wymiany ciepła na brzegu warstwy:

$$\lambda_{s1} T_z(x, 0, \tau) - \alpha_1 (T(x, 0, \tau) - T_1) = 0, \quad 0 < x < X, \quad 0 < \tau < \tau_f,$$

$$T(x, Z_{sw} - 0, \tau) = T(x, Z_{sw} + 0, \tau), \quad \lambda_{s1} T_z(x, Z_{sw} - 0, \tau) = \lambda_w T_z(x, Z_{sw} + 0, \tau), \quad 0 < x < X, \quad 0 < \tau < \tau_f,$$

$$T(x, Z_{ws} - 0, \tau) = T(x, Z_{ws} + 0, \tau), \quad \lambda_w T_z(x, Z_{ws} - 0, \tau) = \lambda_{s2} T_z(x, Z_{ws} + 0, \tau), \quad 0 < x < X, \quad 0 < \tau < \tau_f,$$

$$\lambda_s T_z(x, Z, \tau) + \alpha_4 (T(x, Z, \tau) - T_4) = 0, \quad 0 < x < X, \quad 0 < \tau < \tau_f.$$

Koncentracja początkowa tlenu:

$$C(x, z, 0) = C_0, \quad 0 < x < X, \quad Z_{sw} < z < Z_{ws}.$$

Koncentracja tlenu na brzegu warstwy:

$$C(0, z, \tau) = C_e, \quad C_x(X, z, \tau) = 0, \quad Z_{sw} < z < Z_{ws}, \quad 0 < \tau < \tau_f.$$

Warunki wymiany tlenu na brzegu warstwy:

$$mDC_z(x, Z_{sw}, \tau) - \beta_2 C(x, Z_{sw}, \tau) = 0, \quad 0 < x < X, \quad 0 < \tau < \tau_f,$$

$$mDC_z(x, Z_{ws}, \tau) - \beta_3 C(x, Z_{ws}, \tau) = 0, \quad 0 < x < X, \quad 0 < \tau < \tau_f.$$

Przedstawione wyrażenia stanowią matematyczny model samozagrzewania złoża węgla przedstawionego na rys.6.

Występujące w tym modelu zmienne, stałe fizyczne i parametry węgla z pokładu 209, przepływających gazów i otaczających skał zestawiono w tabl. 1-3.

Tablica 1

Zmienne występujące w modelu matematycznym

Zmienna	symbol	jednostka
Czas	τ	h
Parametry przestrzenne	x	m
	z	m
Temperatura	T	K
Zawartość tlenu w gazach	C	l
Grubości warstw	$Z_{sw} = H_{s1}$	m
	$Z_{ws} = H_{s1} + H_w$	m
	$Z = H_{s1} + H_w + H_{s2}$	m

Tablica 2

Stałe fizyczne występujące w modelu matematycznym

Stałe	wartość	jednostka
Ciepło właściwe powietrza	$c_g = 1000.0$	J/(kg K)
Współczynnik przeliczeniowy sekunda na godzina	$s_h = 3600.0$	s/h

Tablica 3

Parametry węgla, przepływających gazów i otaczających skał występujące w modelu matematycznym

Parametr	symbol	jednostka	wartości przyjęte w przykładzie
Ciepło właściwe węgla	c_w	J/(kg K)	1200.0
Ciepło właściwe skał stropowych	c_{s1}	J/(kg K)	2000.0
Ciepło właściwe skał spagowych	c_{s2}	J/(kg K)	2000.0
Gęstość węgla	ρ_w	kg/m ³	800.0
Gęstość skał stropowych	ρ_{s1}	kg/m ³	2000.0
Gęstość skał spagowych	ρ_{s2}	kg/m ³	2000.0
Gęstość powietrza	ρ_g	kg/m ³	1.29
Współczynnik porowatości węgla	m	l	0.4
Współczynnik przewodnictwa cieplnego w węglu	λ_w	W/(m K)	0.28
Współczynnik przewodnictwa cieplnego skał	λ_{s1}	W/(m K)	1.8
Współczynnik przewodnictwa cieplnego skał	λ_{s2}	W/(m K)	2.0
Współczynnik dyfuzji przez tlen	D	m ² /s	10 ⁻⁵
Prędkość przepływu gazu	v_f	m/s	0.0005
Temperatura na powierzchni warstwy skał stropowych	T_1	K	300.0
Temperatura na powierzchni warstwy skał spagowych	T_2	K	300.0
Temperatura początkowa węgla	T_0	K	300.0
Koncentracja początkowa tlenu w węglu	C_0	l	0.01
Koncentracja tlenu w powietrzu dopływającym	C_e	l	0.2
Długość warstwy węgla	X	m	7.0
Grubość warstwy węgla	H_w	m	1.0
Grubość skał stropowych	H_{s1}	m	3.0
Grubość skał spagowych	H_{s2}	m	3.0

Rozwiązanie uzyskuje się metodą różnic skończonych. Uzyskany układ równań różnicowych rozwiązano metodą TDMA (TRI-Diagonal Matrix Algorithm).

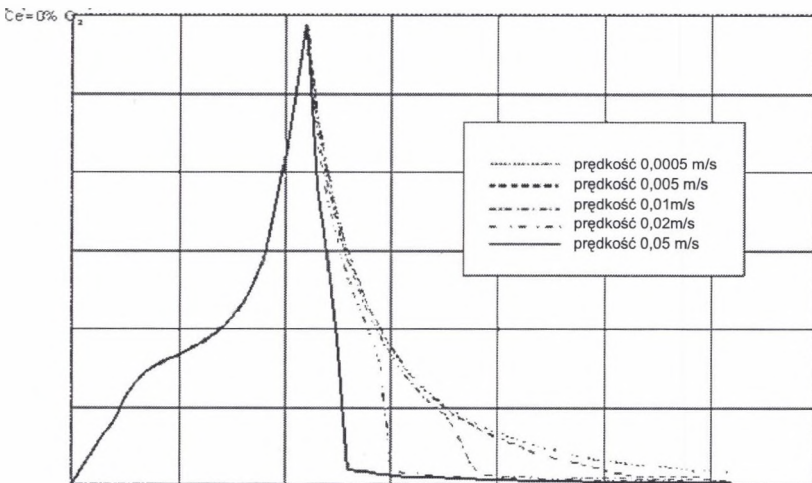
Przykłady obliczeniowe

Rozpatruje się stygnięcie zagrzanego fragmentu złoża rozkruszonego węgla z pokładu 209 sąsiadującego ze skałami (rys. 3), w zaizolowanym polu pożarowym. W szczególności wyznaczony zostanie wpływ grubości zagrzanego złoża węgla, prędkości gazów przepływających przez to złożo i zawartości tlenu w dopływających gazach. Do obliczeń przyjęto następujące parametry:

- szybkość reakcji utleniania $\frac{dO}{dt}$ pokazaną na rys.1
- ciepło reakcji utleniania q_r pokazane na rys.2
- grubość złoża rozkruszonego węgla 1,0m i 1,5m
- prędkości przepływu gazów przez złożo: 0,0005, 0,005, 0,01, 0,02 i 0,05 m/s
- zawartość tlenu w przepływających gazach od 0 do 10%

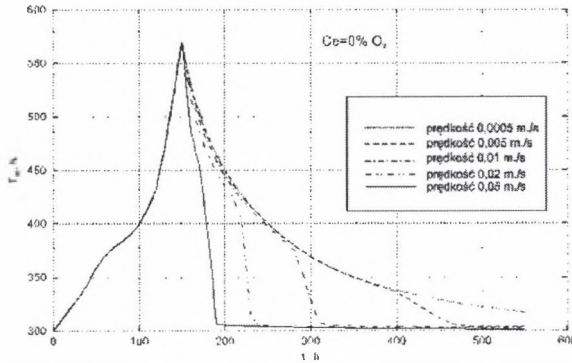
Wyniki przeprowadzonych obliczeń pokazano na rys. 4 do 9. Jak widać z rysunków 4 do 9 szybkość wychładzania nagrzanego fragmentu złoża silnie zależy od prędkości przepływających gazów i zawartości tlenu w tych gazach.

W przypadku przepływu gazów z prędkościami większymi od 0,01 m/s następuje szybkie wynoszenie ciepła z nagrzanego fragmentu złoża węgla przy czym wynoszenie to jest tym szybsze, im większa jest grubość złoża węgla (rys. 4, 5, 8 i 9). Decydujący wpływ na proces stygnięcia nagrzanego węgla ma zawartość tlenu w dopływających gazach. Dla danego rodzaju węgla i grubości złoża istnieje graniczna zawartość tlenu, poniżej której może dopiero następować proces stygnięcia węgla. Dla omawianego przykładu stygnięcie warstwy węgla z pokładu 209 o grubości 1m obustronnie otoczonej skałami przy prędkości przepływających gazów $v_f=0,0005$ m/s uwarunkowane jest obniżeniem zawartości tlenu w dopływających gazach poniżej 9% (rys.7). Natomiast gdyby warstwa ta miała już grubość 1,5m dla rozpoczęcia procesu wychładzania należałoby obniżyć zawartość tlenu poniżej 6%. Oczywiście w obu przypadkach największą szybkość wychładzania uzyskuje się przy zawartości tlenu równej 0%.



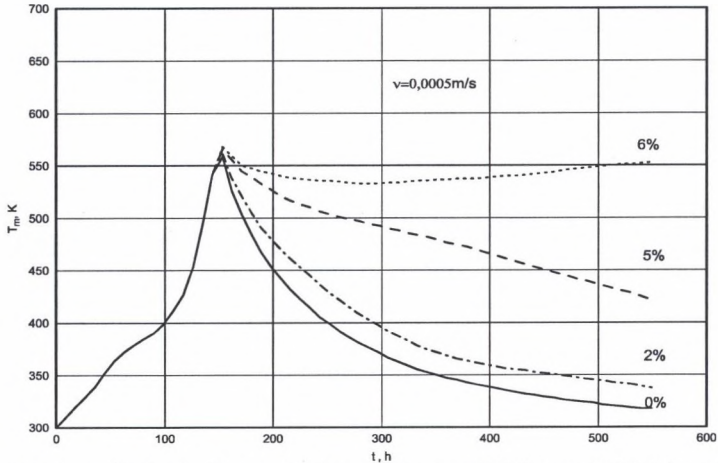
Rys. 4. Zagrzewanie i wychładzanie fragmentu złoża węgla z pokł.209 o grubości 1m w zależności od prędkości przepływających gazów

Fig. 4. Heating and cooling process of section of 209 seam, 1,0 m thick, as a function of gases flow velocity



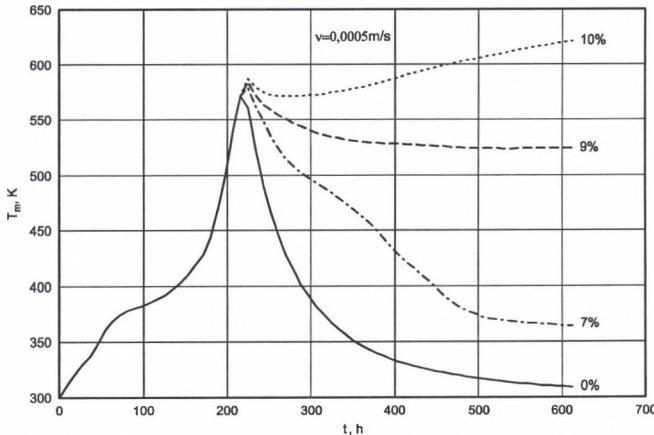
Rys.5. Zagrzewanie i wychładzanie fragmentu złoża węgla z pokł.209 o grubości 1,5m w zależności od prędkości przepływających gazów

Fig. 5. Heating and cooling process of section of 209 seam 1,5 m thick, as a function of airflow velocity



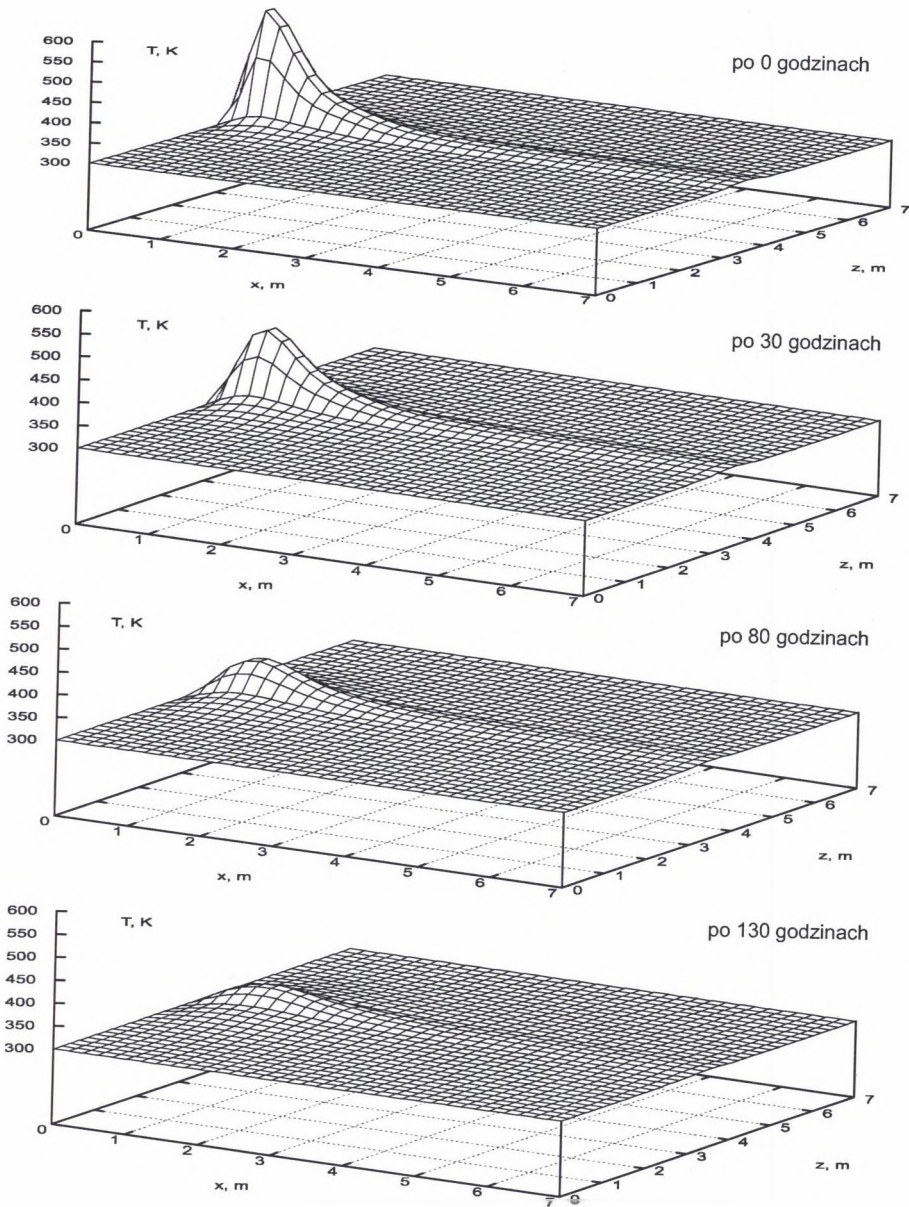
Rys.6. Zagrzewanie i wychładzanie fragmentu złoża węgla z pokł.209 o grubości 1,5m w zależności od zawartości tlenu w przepływających gazach

Fig. 6. Heating and cooling process of section of 209 seam 1,5 m thick, as a function of oxygen concentration in gases



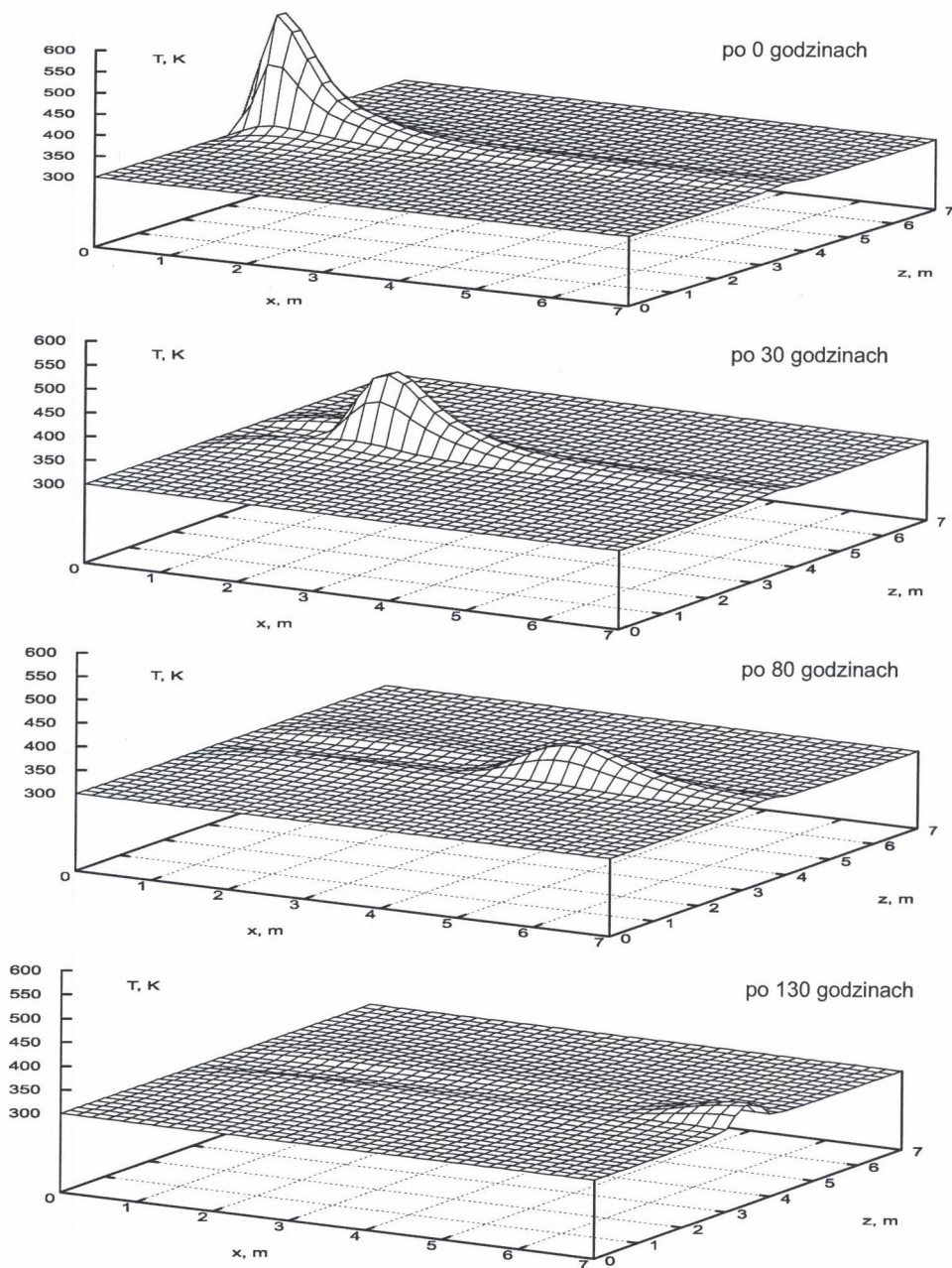
Rys. 7. Zagrzewanie i wychładzanie fragmentu złoża węgla z pokł.209 o grubości 1m w zależności od zawartości tlenu w przepływających gazach

Fig. 7. Heating and cooling process of section of 209 seam 1m thick, as a function of oxygen concentration in gases



Rys.8. Zagrzewanie i wychładzanie fragmentu złoża węgla z pokł.209 o grubości 1m przy prędkości przepływu 0,005 m/s i zawartości tlenu w gazach 0%

Fig. 8. Heating and cooling process of section of 209 seam 1m thick, for airflow velocity 0,01 m/s and oxygen concentration 0%



Rys.9. Zagrzewanie i wychładzanie fragmentu złoża węgla z pokł.209 o grubości 1m przy prędkości przepływu 0,01 m/s i zawartości tlenu w gazach 0%

Fig. 9. Heating and cooling process of section of 209 seam 1m thick, for airflow velocity 0.01 m/s and oxygen concentration 0%

Podsumowanie

Opracowany w ostatnich latach matematyczny model procesu stygnięcia złoża rozkruszonego węgla i otaczających skał o różnych kształtach geometrycznych (warstwa płaska, walec), uwzględniający efekty cieplne towarzyszące utlenianiu się węgla, umożliwia prognozowanie procesu stygnięcia masywu skalnego nagrzanego przez pożar. Proces stygnięcia można przyspieszyć stosując odpowiednie warunki wentylacyjne gaszenia, ograniczające dostęp tlenu do miejsca pożaru oraz czynniki chłodzące, takie jak np. przepływ przez nagrzaną masę skalną gazów inertnych.

Posługując się wspomnianym modelem zaprognozować można wpływ warunków wentylacyjnych i czynników chłodzących na przebieg stygnięcia masywu skalnego. Tym samym dobrać można optymalny zestaw środków umożliwiających jak najszybsze ugaszenie pożaru. W niniejszym referacie przedstawiono z konieczności tylko niewielki fragment rozważań nad powyższym zagadnieniem. Szersze omówienie problemu przedstawione będzie w przygotowywanej monografii.

Po zaizolowaniu pola pożarowego i zainertyzowaniu atmosfery następuje proces wychładzania masywu skalnego. Szybkość tego wychładzania zależy od wielu czynników, do których należy zaliczyć przede wszystkim: masę nagrzanego węgla i skał, kształt geometryczny złoża, rozkład temperatury w nagrzanym złożu i otaczających skałach, prędkość przepływu gazów, zawartość tlenu w gazach, sposób odprowadzenia ciepła do otoczenia, rodzaj otaczających skał i rodzaj płynu mającego bezpośredni kontakt z powierzchnią węgla. W ostatnich latach opracowany został matematyczny model procesu stygnięcia masywu skalnego uwzględniający wpływ wymienionych czynników. W referacie omówiony został przykład stygnięcia płaskiej warstwy węgla stykającej się od stropu i spągu ze skałami. W obliczeniach przyjęto grubość warstwy węgla równą 1,0 i 1,5m. Przeanalizowano wpływ prędkości gazów przepływających przez złożę rozkruszonego węgla (od 0,0005 do 0,05 m/s) i zawartości tlenu (od 0 do 10%) w tych gazach na proces stygnięcia masywu skalnego.

LITERATURA

1. Branny M., Cygankiewicz J., Waclawik J.: Jednowymiarowy model pożaru endogenicznego w zrobach lub szczelinach węglowych, Arch. Górn., t.40, nr 1, s. 39-51, Kraków 1995.

2. Branny M., Cygankiewicz J., Piotrowski A., Waclawik J.: Numeryczna symulacja procesu niskotemperaturowego utleniania węgla (uproszczone zagadnienie dwuwymiarowe) Arch.Górn.,t.42, nr4, s.501-514, Kraków 1997.
3. Cygankiewicz J.: About Determination of Susceptibility of Coals to Spontaneous Combustion Using an Adiabatic Test Method. Arch.Min.Sci., t.45, s. 247-273, Kraków 2000.
4. Cygankiewicz J.: Badania niskotemperaturowego samozagrzewania węgla kamiennych w Głównym Instytucie Górnictwa. Biblioteka szkoły eksploatacji podziemnej, s. z Perlikiem nr 2, s. 5-29, Kraków 2000.
5. Cygankiewicz J.: Ocena ryzyka pożaru endogenicznego w rejonach eksploatacyjnych kopalń, Wiadomości Górnicze , nr 9, s. 416-424, Katowice 2003.
6. Deńca A.: Niskotemperaturowe utlenianie węgla kamiennych. Wiadomości Chemiczne, t.45, 1991.
7. Taraba B.: Nizkoteplotni oxidace a samovzneco vani uhelne hmoty, Ostravska univerzita v Ostrave, Ostrava. 2003.

Recenzent: Dr hab. inż. Jan Drenda, prof. Pol. Śl.

Abstract

The cooling of process of coal and surrounding rock-mass takes place after insulation of fire zone and its inertization. The cooling rate depends on many factors, such as mass of the heated coal zone and rocks, shape of the heated zone, temperature distribution in this zone, gas flow velocity, type of surrounding rocks having contact with the heated zone. A mathematical model of that process taking into account the mentioned parameters was developed. A computational example of cooling off process for a planar layer of coal having direct contact with rocks both along the roof and bottom surfaces was presented. Two values of thickness of the coal layer were considered, namely 1,0 and 1,5m. The influence of gas flow velocity and oxygen concentration was analyzed on the cooling off process of rock-mass.