

Franciszek ROSIEK, Marek SIKORA, Jacek URBĄŃSKI  
Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej

## PROGNOZOWANIE TEMPERATURY POWIETRZA KOPALNIANEGO W PRZYPADKACH OKRESOWEGO PRZEKAZYWANIA CIEPŁA Z POWIETRZA DO GÓROTWORU

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę prognozowania temperatury powietrza i ścianki wyrobiska kopalnianego uwzględniającą założenie, że temperatura powietrza na wlocie do wyrobiska jest wyższa od temperatury ścianki. Metodę tę opracowano modyfikując odpowiednio metodę J. Vossa prognozowania temperatury powietrza kopalnianego.

## FORECASTING OF AIR-TEMPERATURE IN MINES IN THE CASE OF PERIODIC HEAT TRANSMISSION FROM AIR TO ROCK.

Summary. A method of the air-temperature and the heading-wall temperature forecasting, under an assumption, that the air-temperature at the heading intake is higher than the heading-wall temperature, has been introduced. The presented method has been worked out by modifying the VOSS-method of forecasting air-temperature in mines.

## VORAUSBERECHNUNGEN DER GRUBENWETTERTEMPERATUR IM FALLE PERIODISCHEN WÄRMEÜBERTRAGUNG VON DEN WETTERSTOM AM GEBIRGE

Zusammenfassung. Es wurden Berechnungen der Grubenwettertemperatur und der Oberflächentemperatur dargestellt. Voraussetzung für die Berechnung ist eine höhere Eintrittstemperatur als Oberflächegebirgstemperatur. Dabei wurde die Voß - Methode zur Klimavorausberechnungen modifiziert.

## 1. WSTĘP

Podczas przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych zachodzi nieprzerwana wymiana ciepła między skałami a powietrzem kopalnianym. Temperatura powietrza atmosferycznego w ciągu doby, miesiąca i roku charakteryzuje się znacznymi wahaniami, mającymi istotny wpływ na różnicę temperatur powietrza kopalnianego i skał, a tym samym proces wymiany ciepła.

Drogi powietrza świeżego w kopalni stanowią swego rodzaju akumulator ciepła. Ciepłe powietrze wchodzące latem do kopalni ogrzewa skały chłodząc się. Zimą natomiast powietrze chłodzi skały odbierając od nich ciepło. Skały otaczające wyrobisko, biorące udział w tych procesach, noszą wg [2] nazwę "strefy (warstwy) wyrównującej temperaturę", a wg [1] nazwę "regeneratora ciepła". Grubość tej warstwy w zależności od rodzaju skał sięga od kilku do kilkunastu metrów w głąb górotworu. Zasięg strefy wyrównującej wahań temperatury zależy natomiast głównie od ilości przepływającego powietrza. Dla płytkich kopalń, przewietrzanych dużymi ilościami powietrza, może ona sięgać nawet do szybów wydechowych [2]. W głębokich, gorących kopalniach strefa ta obejmuje zazwyczaj grupowe prądy powietrza świeżego i sięga do miejsca, do którego następuje obniżanie temperatury ciepłego powietrza płynącego w lecie od szybów wdechowych. Od tego miejsca temperatura skał jest stale wyższa od temperatury powietrza i ogrzewa się ono od skał wzdłuż drogi jego przepływu.

W związku z projektami przewidującymi zastosowanie termoizolacji wyrobisk jako sposobu zwalczania wysokich temperatur w kopalniach miedzi, oprócz badania efektów zastosowanej termoizolacji, konieczne jest również określenie stref, w których jej zastosowanie zawsze będzie ograniczało dopływ ciepła z górotworu do powietrza. Strefy te znajdują się będą w drogach przepływu powietrza świeżego poza miejscem, od którego zawsze następuje ogrzewanie powietrza.

W ramach niniejszego referatu przedstawiono wyniki teoretycznych i praktycznych badań umożliwiających wyznaczenie zasięgu stref wyrównujących temperaturę powietrza w wyrobiskach. W tym celu opracowano metodę prognozowania temperatury powietrza i ścianki wyrobiska uwzględniającą założenie, że temperatura powietrza na wlocie do wyrobiska jest wyższa od temperatury ścianki. Miejsce w wyrobisku, w którym temperatura powietrza zrówna się z temperaturą ścianki, będzie punktem końcowym strefy wyrównującej temperaturę.

## 2. METODA PROGNOZOWANIA TEMPERATURY POWIETRZA I ŚCIANKI WYROBISKA W WARUNKACH OKRESOWEGO PRZEKAZYWANIA CIEPŁA Z POWIETRZA DO GÓROTWORU

Do prognozowania temperatury powietrza w kopalniach LGOM przystosowano metodę J. Vossa [3]. W metodzie tej średnia temperatura  $t_{sw}$  powietrza (sucha) na końcu wyrobiska wyznaczana jest ze wzoru:

$$t_{sw} = t_{pm}^* - (t_{pm}^* - t_{sd}) \exp\left(-\frac{\alpha_k B D L}{m_a c_p}\right) \quad (1)$$

gdzie:  $t_{pm}^*$  - temperatura zastępcza dana wzorem

$$t_{pm}^* = \frac{C}{D} t_p + \frac{1}{\alpha_k B D} \left( q_{za} - \frac{g m_a (z_w - z_d)}{L} \right) \quad (2)$$

$C$  - współczynnik dany wzorem

$$C = \frac{\varepsilon_s k_\tau}{\alpha_k + \varepsilon_s k_\tau} \quad (3)$$

$D$  - współczynnik dany wzorem

$$D = 1 - \frac{\alpha_k}{\alpha_k + \varepsilon_s k_\tau} \quad (4)$$

- $t_{sd}$  - średnia temperatura powietrza na początku wyrobiska, °C,
- $m_a$  - strumień masy powietrza, kg/s,
- $B$  - obwód wyrobiska, m,
- $L$  - długość wyrobiska, m,
- $\alpha_k$  - współczynnik wnikania ciepła z górotworu, W/(m<sup>2</sup>K),
- $\varepsilon_s$  - współczynnik ciepła konwekcyjnego,
- $k_\tau$  - współczynnik niestacjonarnej wymiany ciepła, W/(m<sup>2</sup>K),
- $t_p$  - temperatura pierwotna skał, °C,
- $z_d$   $z_w$  - wysokości niwelacyjne odpowiednio przekrojów dopływu i wypływu wyrobiska, m,
- $q_{za}$  - ciepło od źródeł zewnętrznych, W/m,
- $g$  - przyspieszenie ziemskie;  $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ .

W metodzie J. Vossa temperatura ścianki wyrobiska po długim okresie przewietrzania, odpowiednio dla przekroju dopływu ( $d$ ) lub wypływu ( $w$ ), określona jest wzorem

$$t_{b(d,w)} = C t_{p(d,w)} + (1 - D) t_{s(d,w)} \quad (5)$$

Przy wyprowadzeniu wzorów (1) i (5) korzysta się z warunku brzegowego w postaci

$$\varepsilon_s k_\tau (t_p - t_b) = \alpha_k (t_b - t_s) \quad (6)$$

W warunku tym zakłada się równość ciepła przekazywanego z górotworu z ciepłem przyjmowanym przez powietrze na jednostkowej długości wyrobiska w długich okresach przewietrzania, przy założeniu, że wyrobiskiem przepływa powietrze o stałej temperaturze odpowiadającej średniej wieloletniej.

W przypadku kiedy do wychłodzonego przez długi czas wyrobiska zacznie dopływać powietrze o temperaturze ( $t_s$ ) wyższej niż temperatura ścianki ( $t_b$ ), warunek brzegowy może zostać napisany w następującej postaci:

$$\varepsilon_s k_\tau (t_p - t_b) + \alpha_k (t'_s - t'_b) = \varepsilon_s k'_\tau (t'_b - t_b) \quad (7)$$

W tak zapisanym warunku pierwszy człon lewej strony równania przedstawia przepływ ciepła z głębi górotworu ( $t_p$ ) w kierunku ociosów wyrobiska ( $t_b$ ) w długim czasie  $k_\tau(\tau)$ .

Drugi człon obrazuje przepływ ciepła od gorącego powietrza ( $t'_s$ ) do chłodniejszej, ale już ogrzewającej się ścianki ( $t'_b$ ). Oba te strumienie ciepła powodują w krótkim czasie  $\tau'$  ogrzewanie płaszcza górotworu znajdującego się w pobliżu ociosu od temperatury  $t_b$  do temperatury  $t'_b$ . Po wprowadzeniu powyższego warunku do równania energii dla elementarnego odcinka wyrobiska, przy dodatkowym założeniu, że strumień ciepła przepływa od powietrza do górotworu, uzyskano następujący wzór umożliwiający prognozowanie temperatury powietrza  $t_{sw}$

$$t'_{sw} = t^*_{pm} - (t^*_{pm} - t'_{sd}) \exp\left(-\frac{\alpha_k B D' L}{m_a c_p}\right) \quad (8)$$

gdzie:

$$t^*_{pm} = \frac{C'}{D'} t_b + \frac{C'}{D'} \frac{k_\tau}{k'_\tau} (t_p - t_b) + \frac{1}{\alpha_k B D'} (q_{za} - \frac{g m_a (z_w - z_d)}{L}) \quad (9)$$

$$C' = \frac{\varepsilon_s k'_\tau}{\alpha_k + \varepsilon_s k'_\tau} \quad (10)$$

$$D' = 1 - \frac{\alpha_k}{\alpha_k + \varepsilon_s k'_\tau} \quad (11)$$

a pozostałe oznaczenia jak we wzorze (1), przy czym  $k'_\tau$  oznacza wartość współczynnika niestacjonarnej wymiany ciepła dla krótkiego czasu  $\tau'$  przewietrzania wyrobiska przy przepływie przez wyrobisko powietrza o wysokiej temperaturze  $t'_s$ .

Nową, podwyższoną temperaturę ścianki  $t'_b$  można natomiast wyznaczyć ze wzoru

$$t'_b = C' t_b + (1 - D') t'_s + C' \frac{k_\tau}{k'_\tau} (t_p - t_b) \quad (12)$$

Dla tak opracowanych zależności prognozowane temperatury powietrza i ścianki wzdłuż wyrobiska początkowo maleją, a następnie zaczynają wzrastać, przy czym temperatura powietrza zaczyna rosnąć od miejsca, w którym temperatura ścianki staje się od niej wyższa. Punkt przecięcia się krzywych obrazujących zmiany temperatur powietrza i ociosu jest końcem strefy wyrównywania temperatury powietrza.

### 3. POMIARY KOPALNIANE I WERYFIKACJA OPRACOWANEJ METODY

W celu zweryfikowania opracowanej metody przeprowadzono w jednej z kopalń rud miedzi pomiary zmiany temperatury ścianki i powietrza wzdłuż drogi jego przepływu od podszybiu szybów wdechowych do oddziałów wydobywczych. Pomiary te wykonano wzdłuż wielu tras, w dniach, w których temperatura powietrza na podszybiu była wyższa od temperatury ścianki.

Podczas wykonywania pomiarów mierzono:

- temperaturę powietrza na termometrach suchym i wilgotnym w wybranych przekrojach wyrobisk,
- prędkości i ciśnienia powietrza w tych przekrojach,
- temperaturę ociosów (ścianki) w tych przekrojach.

Z map pokładowych określono wysokości niwelacyjne przekrojów pomiarowych oraz odległości między nimi.

Temperaturę ścianki mierzono termometrem rezystancyjnym (rezystor platynowy), o dokładności miernika  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ . Przyrząd był wyposażony w przyłgowy czujnik pomiarowy izolowany od otaczającego go powietrza osłoną. Przykładowe wyniki dla trzech tras pomiarowych przedstawiono na rysunkach 1÷3.

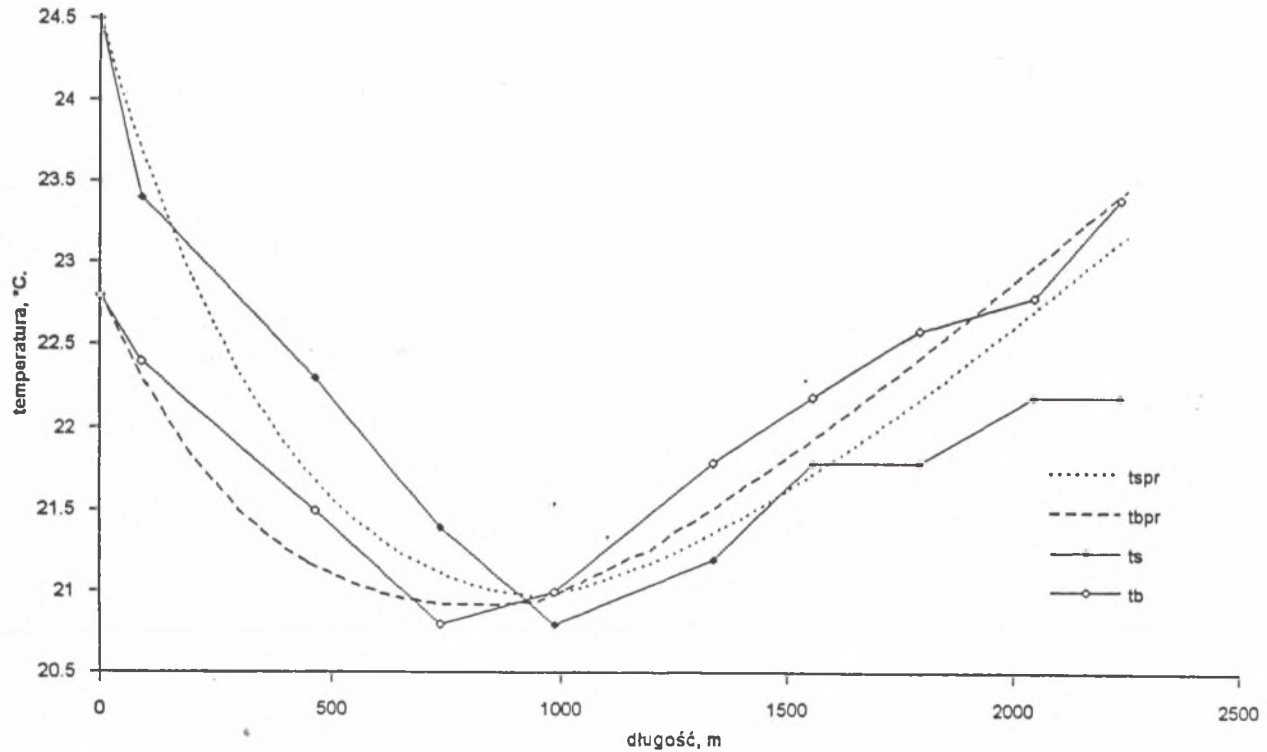
Dla danych wejściowych zgodnych z parametrami mierzonymi na początku badanych tras wykonano prognozę temperatury powietrza i ścianki zgodnie z metodą przedstawioną w punkcie 2. W prognozie wyrobisko, którym płynęło powietrze, podzielono na odcinki o długości 50 m, dla których prognozowano początkową temperaturę ścianki, wynikającą z wieloletniego wychłodzenia górotworu, a następnie zakładano dopływ powietrza o wyso-kiej temperaturze i prognozowano zmiany jego temperatury i temperatury ścianki.

Odpowiednie wartości współczynników niezbędnych do przeprowadzenia prognozy przyjęto zależnie od warunków, w jakich wykonane było wyrobisko. Wszystkie trasy pomiarowe zaczynały się od podszybiu szybów wdechowych, a przyjęte temperatury powietrza (powodujące wychłodzenie górotworu) na początku tras odpowiadały średnim wieloletnim temperaturom panującym na tych podszybiach [4]. Wyniki obliczeń zestawiono również na rysunkach 1÷3.

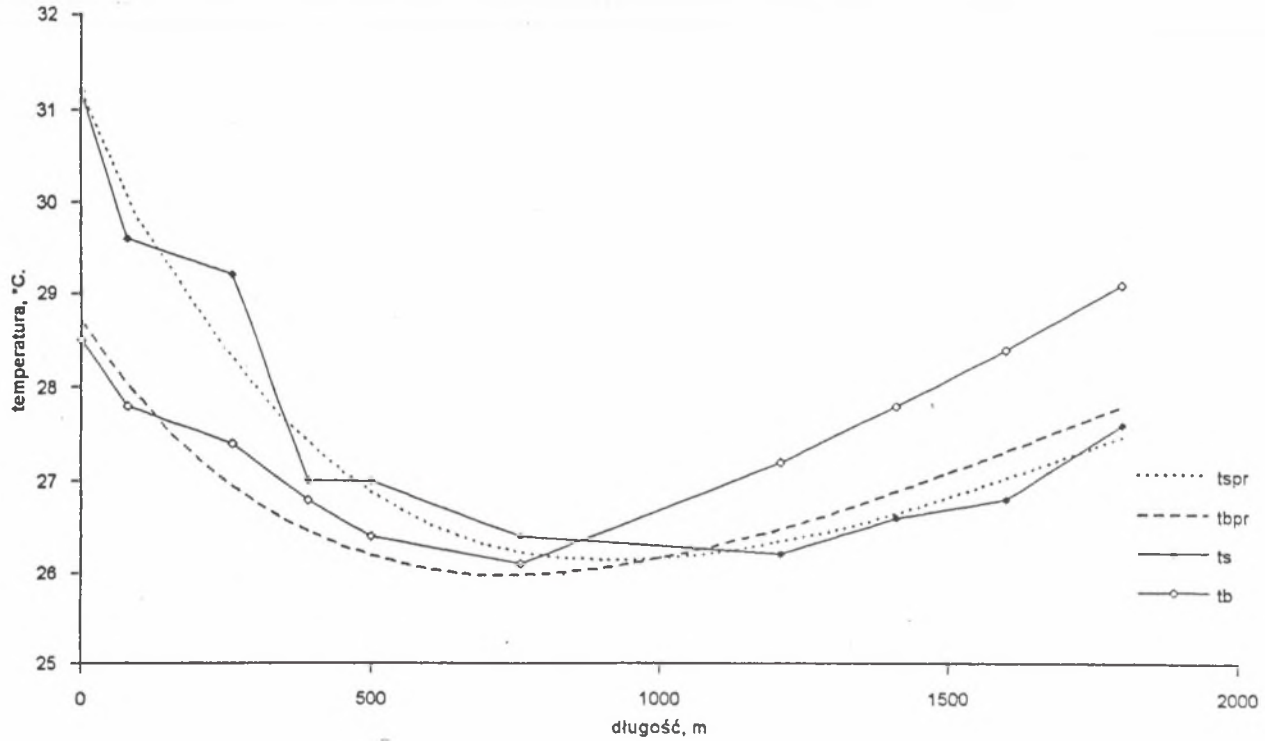
Wyniki obliczeń z wystarczającą dla praktyki dokładnością odpowiadają wynikom pomiarów. Uzyskano dużą zgodność prognozowanych temperatur powietrza i ścianki z temperaturami pomierzonymi. Również zasięg strefy wyrównywania temperatury, wyznaczony z obliczeń jako punkt przecięcia krzywych opisujących zmiany temperatury ścianki i powietrza wzdłuż drogi jego przepływu, jest zgodny z pomierzonym. Wobec powyższego metoda ta może stanowić podstawę do wyznaczania zasięgu strefy wyrównywania temperatury.

### 4. OKREŚLENIE ZASIĘGU STREFY WYRÓWNYWANIA TEMPERATURY

Zgodnie z opracowaną metodą, przeprowadzono wariantowe obliczenia umożliwiające wyznaczenie zasięgu strefy wyrównywania temperatury wokół szybów wdechowych jednej z kopalń rud miedzi. Obliczenia te przeprowadzono dla modelowego wyrobiska o długości

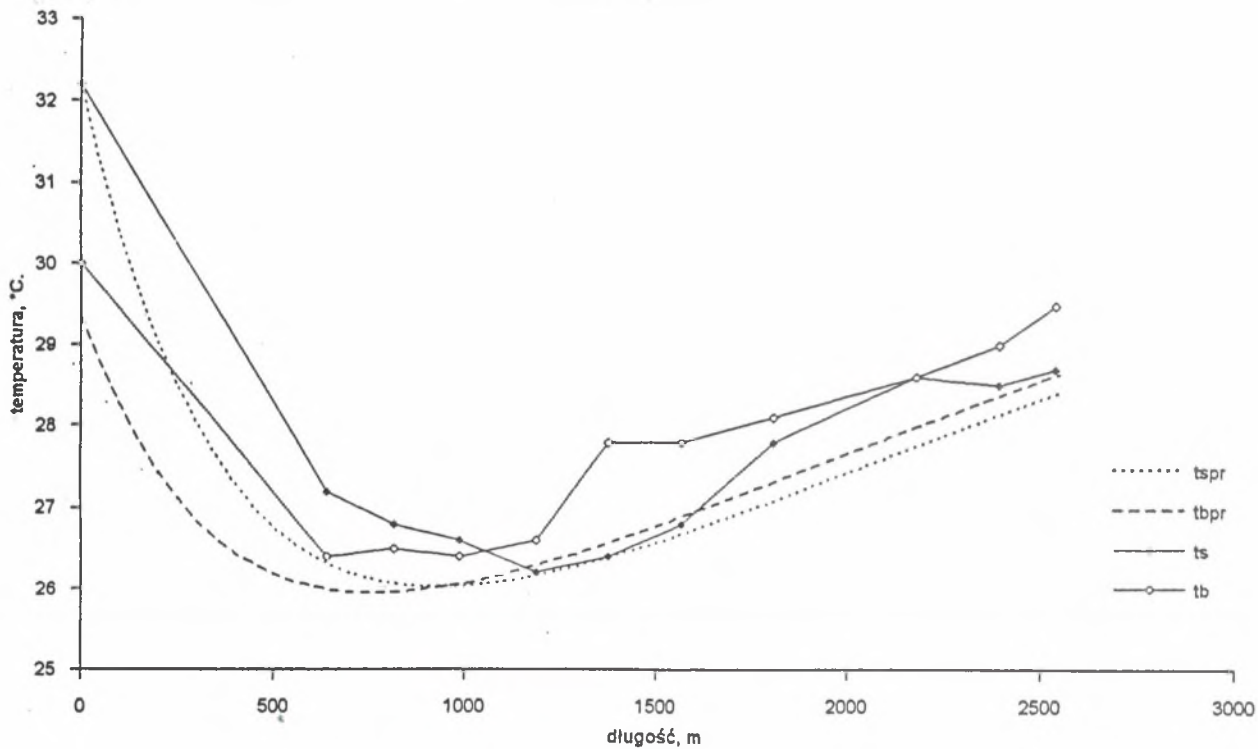


Rys. 1. Zmiany temperatury ścianki oraz temperatury powietrza przy jego przepływie wzdłuż wyrobiska (trasa nr 1)  
Fig. 1. Temperature changes of heading-walls and the mine-air itself during its flow along an airway (route No.1)



Rys. 2. Zmiany temperatury ścianki oraz temperatury powietrza przy jego przepływie wzdłuż wyrobiska (trasa nr 2)

Fig. 2. Temperature changes of heading-walls and the mine-air itself during its flow along an airway (route No.2)

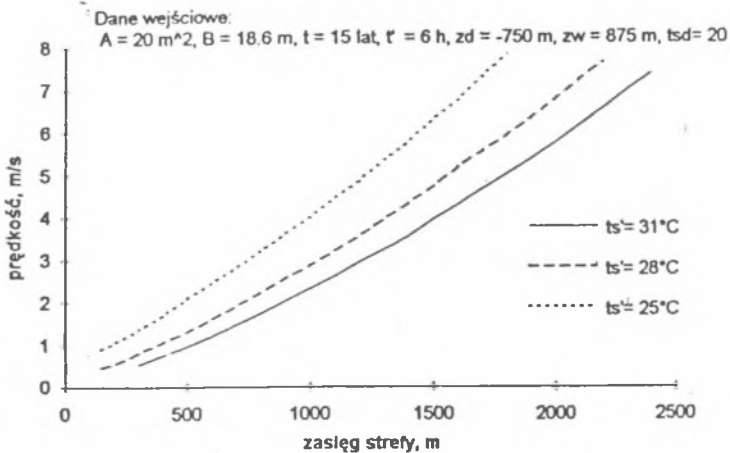


Rys. 3. Zmiany temperatury ścianki oraz temperatury powietrza przy jego przepływie wzdłuż wyrobiska (trasa nr 3)  
 Fig. 3. Temperature changes of heading-walls and the mine-air itself during its flow along an airway (route No.3)



$L = 2500$  m, polu przekroju poprzecznego  $A = 20$  m<sup>2</sup> i obwodzie  $B = 18.6$  m. Wyrobisko to podzielono na odcinki o długości 50 m, dla których prognozowano początkową temperaturę ścianki, wynikającą z wieloletniego wychłodzenia górotworu, a następnie zakładano dopływ powietrza o wysokiej temperaturze i prognozowano zmiany jego temperatury i temperatury ścianki. Zasięg strefy określany był jako odległość, w której nastąpiło zrównanie się prognozowanej temperatury powietrza i ścianki. Obliczenia przeprowadzono dla różnych lokalizacji modelowego wyrobiska. Założono, że zaczynać się ono może na podszybiach szybów wdechowych. Z lokalizacją tą wiązało się przyjęcie odpowiednich wartości średniej wieloletniej temperatury powietrza  $t_{sd}$  na danym podszybiu [4]. Dla każdego z przykładów przyjęto, że modelowe wyrobisko może być poziome, prowadzone po wzniosie lub upadzie. W związku z tym zakładano odpowiednie wysokości niwelacyjne  $z_w$  końca wyrobiska modelowego.

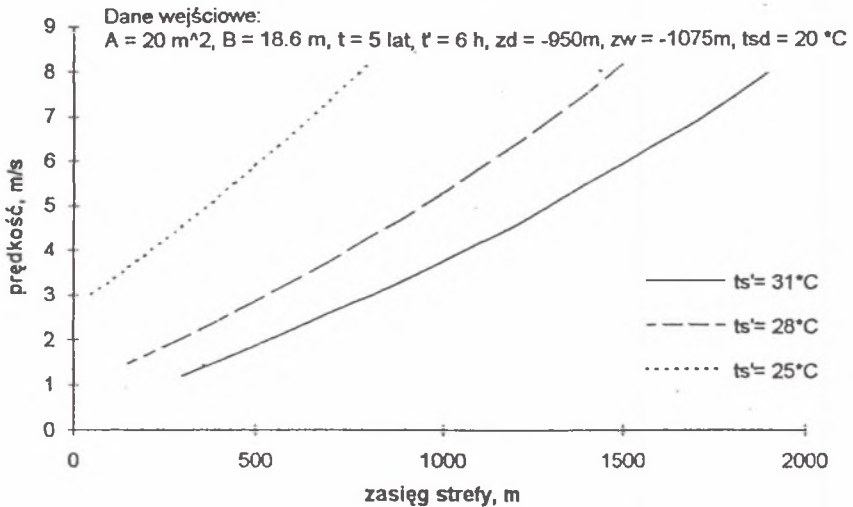
Dla powstałych w ten sposób wariantów obliczeniowych założono dodatkowo możliwe zmiany pozostałych parametrów występujących we wzorach (8) i (12). Zakładano różne czasy istnienia wyrobiska  $\tau$ , czasy oddziaływania wysokiej temperatury  $\tau'$ , wartość wysokiej temperatury na wlocie do wyrobiska ( $t'_{sd} = 25, 28$  i  $31^\circ\text{C}$ ) oraz różne strumienie objętości powietrza przepływającego wyrobiskiem. Uzyskano szereg zbiorów wyników, z których dwa przykładowe przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Zasięg strefy wyrównywania temperatur ścianki i powietrza

Fig. 4. Range of the zone of temperature levelling between heading-wall and the air

Na rysunkach tych pokazano zasięg strefy wyrównywania temperatury powietrza w zależności od temperatury maksymalnej na podszybiu i od prędkości przepływu (strumienia objętości) powietrza. Zasięg strefy wzrasta wraz z ilością przybływającego wyrobiskiem powietrza i wzrostem temperatury powietrza na podszybiu. Wzrost głębokości (rys.5) powoduje zmniejszanie się zasięgu strefy wyrównywania temperatury. Zaproponowana metoda pozwala ilościowo określić zmiany zasięgu strefy i tym samym prognozować lokalizację termoizolacji wyrobisk górniczych.



Rys. 5. Zasięg strefy wyrównywania temperatur ścianki i powietrza

Fig. 5. Range of the zone of temperature levelling between heading-wall and the air

## LITERATURA

- [1] Wacławik J., Roszczyniański W.: *Aerologia górnicza*, PWN, Warszawa 1983.
- [2] Suhan L.: *Kondicionowanie powietrza w głębokich szachtach*, Izd. "Nedra", Moskwa 1969
- [3] Rosiek F., Tchórzewski J., Urbański J.: *Prognozowanie temperatury powietrza w kopalniach LGOM zmodyfikowaną metodą J. Vossa z wykorzystaniem mikrokomputerów*, Cuprum 1988, nr 1.
- [4] Rosiek F., Sikora M., Urbański J.: *Sezonowe zmiany temperatury powietrza w kopalni "Rudna"*, Rudy i Metale Nieżelazne 1994, nr 3.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Konrad WANIELISTA

Wpłynęło do Redakcji w maju 1994 r.

**Abstract**

A method of the air-temperature and the heading-wall temperature forecasting, under an assumption, that the air-temperature at the heading intake is higher than the heading-wall temperature, has been introduced. The presented method has been worked out by modifying the VOSS-method of forecasting air-temperature in mines.

Modification regarded mainly the boundary condition, to which, a clause relating to the heat inflow from the depth of rock as well as a clause relating to the rock heating by hot air, have been added. Formulas for the forecasted temperature of air and heading-wall have been derived from the differential equation of energy exchange in an excavation by solving it against the mentioned boundary condition. To verify the presented method, measurements of temperature changes of heading-walls and the mine-air along an airway, have been taken in the LGOM copper mines.