

Wpływ warunków przewietrzania wyrobiska korytarzowego bez technologicznych źródeł ciepła na zasięg strefy wychładzania górotworu

Streszczenie: W artykule autorzy postarają się pokazać, że zarówno temperatura pierwotna skał, jak i strumień objętości powietrza płynącego wyrobiskiem nie mają zasadniczego wpływu na tempo wychładzania górotworu. Zasadniczy wpływ na zasięg strefy wychłodzonego górotworu ma czas przewietrzania wyrobiska. Inaczej przedstawia się kwestia temperatury ociosu (ścian wyrobiska). Wzrost tej temperatury wraz z długością wyrobiska zależy zarówno od temperatury pierwotnej skał, jak i czasu oraz intensywności przewietrzania, przy czym największy wpływ ma ostatni z wymienionych czynników.

Słowa kluczowe: górnictwo, napowietrzenie, kopalnia, górotwór, chłodzenie.

The influence of the conditions as to ventilating the dog heading without the technological heat sources on the reach of the cooling zone of the rock mass

Abstract: In the paper, the authors will try to present that both the primary rock temperature and the stream of the air flowing through the working do not have a crucial influence on the pace of cooling of the rock mass. The significant influence on the reach of the cooling zone of the rock mass has the time of ventilating the working area. A different situation takes place when it comes to the temperature of the sidewall. The increase of the temperature together with the length of the working area depends both on the primary rock temperature as well as on the intensity of ventilating, yet the latter factor plays the most significant role.

Keywords: mining industry, ventilation, mine, rock mass, cooling

1. Wprowadzenie

W głębokich wyrobiskach kopalń węgla i miedzi temperatura otaczających skał jest wyższa od temperatury przepływającego wyrobiskiem powietrza. Ciepło zatem płynie od masywu skalnego do powietrza. W rozważaniach dotyczących przepływu ciepła w masywie skalnym i na jego powierzchni przyjmuje się, że w wyrobisku, które otacza górotwór, działają technologiczne źródła ciepła (Cygankiewicz, Knechtel 2014a, 2015, Knechtel 2011). Działanie tych źródeł powoduje, że zasięg strefy wychłodzonego górotworu wynosi od kilkunastu do 20 m (Cygankiewicz, Knechtel 2014b, 2015, 2017), a w przypadku wyrobisk o bardzo długim czasie przewietrzania strefa ta sięga 50 m od ociosu (Knechtel 2006), a nawet 70 m (Knechtel 2005). W niniejszym artykule rozpatruje się wyrobisko korytarzowe o długości 1000 m, w którym poza górotworem nie ma żadnych innych źródeł ciepła, i bada wpływ warunków przewietrzania na tempo wychładzania górotworu. Założono, że na temperaturę skał wpływają trzy czynniki: intensywność przewietrzania, temperatura pierwotna oraz czas przewietrzania. Wyznaczono temperaturę skał w różnych odległościach od ociosu, przy czym miejsce, w którym osiągnęła ona wartość pierwotną, przyjęto za granicę strefy wychłodzenia. Korzystając z uzyskanych wyników, sformułowano wnioski dające odpowiedź na pytanie, który z wymienionych czynników ma największy wpływ na wychładzanie górotworu.

2. Metoda badań

W rozważaniach przyjęto upraszczające założenie, że wyrobisko górnicze ma kształt walca o wysokości 1000 m (długość wyrobiska), otoczonego walcami współśrodkowymi o coraz większych promieniach, przy czym promień maksymalny równy jest odległości od osi wyrobiska do miejsca, w którym temperatura skał jest równa wartości pierwotnej. Przyjęto, że w rozważanym obszarze górotwór ma takie same własności fizyko-termiczne, charakteryzuje się ciągłością, nie posiada spękań. Dla takiego górotworu przyjęto średnie wartości współczynnika przewodnictwa cieplnego: $\lambda_q = 2,4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ oraz współczynnika wyrównywania temperatury skał: $a_q = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. W badaniach rozważa się tylko przepływ ciepła, zakładając, że przepływ wilgoci w porównaniu ze strumieniem ciepła jest bardzo mały.

Do wyznaczenia temperatury skał w określonej odległości od ścian wyrobiska dla przyjętego czasu przewietrzania należało rozwiązać układ równań opisujących zmiany temperatury oraz nawilżenia w masywie skalnym (Łykow, Michajłow 1963). Aby rozwiązać wspomniany układ równań, skorzystano z metody różnic skończonych (Nikitienko 1971). W metodzie tej pochodne cząstkowe względem czasu oraz względem współrzędnej odległościowej, występujące w równaniu ruchu ciepła zastępuje się skończonymi różnicami temperatury. Rozwiązanie uzyskane za pomocą metody różnic skończonych praktycznie

nie różni się od rozwiązania dokładnego, które przedstawia się za pomocą funkcji walcowych Bessela pierwszego i drugiego rodzaju.

Jak już wspomniano wcześniej, rozpatruje się tylko przepływ ciepła, pomijając – ponieważ jest bardzo mały – wpływ wilgoci. Wówczas układ równań ciepła i masy (Łykow, Michajłow 1963) można sprowadzić do jednego równania ruchu ciepła o postaci:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a_q \left[\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right] \quad (1)$$

z warunkami brzegowymi:

$$\lambda_q \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = q_w \quad (2)$$

$$t(\infty, \tau) = t_{pg} \quad (3)$$

gdzie:

$t(r, \tau)$ – temperatura masywu skalnego w odległości r od ociosu wyrobiska, °C;

r – odległość od ociosu wyrobiska w głąb górotworu, m;

τ – czas przewietrzania wyrobiska, s;

λ_q = współczynnik przewodnictwa cieplnego skał, W/(mK);

r_w – promień wyrobiska, m;

q_w – gęstość strumienia ciepła przenieszonego z otaczającego masywu skalnego do wyrobiska, W/m²;

a_q – współczynnik wyrównywania temperatury skał, m²/s;

t_{pg} – temperatura pierwotna górotworu, °C.

Z warunku (2) wynika, że na ściankach wyrobiska strumień ciepła przekazywany z masywu skalnego jest równy strumieniowi ciepła q_w przejmowanemu przez powietrze płynące wyrobiskiem; natomiast zgodnie z drugim warunkiem temperatura skał w nieskończonej odległości od ociosu wyrobiska jest równa wartości pierwotnej t_{pg} .

Korzystając z metody różnic skończonych, pochodne występujące w równaniu (1) zastąpiono następującymi skończonymi różnicami temperatury:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \approx \frac{t_j^{n+1} - t_j^n}{l} \quad (4)$$

$$\frac{\partial t}{\partial r} \approx \frac{t_{j+1}^n - t_{j-1}^n}{2h} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} \approx \frac{t_{j+1}^n + t_{j-1}^n - 2t_j^n}{h^2} \quad (6)$$

We wzorach (4) do (6) l oznacza długość przedziału czasowego, h – długość przedziału przestrzennego, natomiast:

t_j^{n+1} – temperaturę skał w chwili czasowej „ $n+1$ ” w odległości „ j ” od ociosu wyrobiska, °C;

t_j^n – temperaturę skał w chwili czasowej „ n ” w odległości „ j ” od ociosu wyrobiska, °C;

t_{j-1}^n – temperaturę skał w chwili czasowej „ n ” w odległości „ $j - 1$ ” od ociosu wyrobiska, °C;

t_{j+1}^n – temperaturę skał w chwili czasowej „ n ” w odległości „ $j + 1$ ” od ociosu wyrobiska, °C;

r_w – promień wyrobiska, m;

$r(j) = r_w + h(j - 1)$ – odległość w głąb górotworu od osi wyrobiska, m;

$j = 1, 2, 3, \dots$ – wskaźnik określający numer odcinka przestrzennego.

Temperaturę skał w chwili czasowej „ n ” w dowolnej odległości od ociosu wyrobiska możemy obliczyć, gdy znana jest wartość tej temperatury w chwili czasowej „ $n - 1$ ”. Dla chwili początkowej ($n = 0$) przyjmujemy wartość temperatury skał równą wartości pierwotnej ($t = t_{pg}$). Korzystając ze związków (4), (5) i (6), równanie (1) możemy zapisać w postaci:

$$t_j^{n+1} = t_j^n + \frac{l \cdot a_g}{h^2} \left[(t_{j+1}^n + t_{j-1}^n - 2t_j^n) + \frac{h}{2r_j} (t_{j+1}^n - t_{j-1}^n) \right], \quad (7)$$

przy czym:

$r(j) = r_w + h(j - 1)$ – odległość w głąb górotworu od osi wyrobiska, m;

$j = 1, 2, 3, \dots$ – wskaźnik określający numer odcinka przestrzennego;

r_w – promień wyrobiska, m.

Dla chwili początkowej „ $n = 0$ ” temperaturę ociosu ($j = 1$) wyznaczamy z warunku brzegowego (2) napisanego w postaci:

$$\lambda_g (t_{pg} - t_0^0) = \alpha \cdot h (t_0^0 - t_w), \quad (8)$$

gdzie:

t_{pg} – temperatura pierwotna skał, °C;

t_0^0 – temperatura ociosu w chwili początkowej, °C;

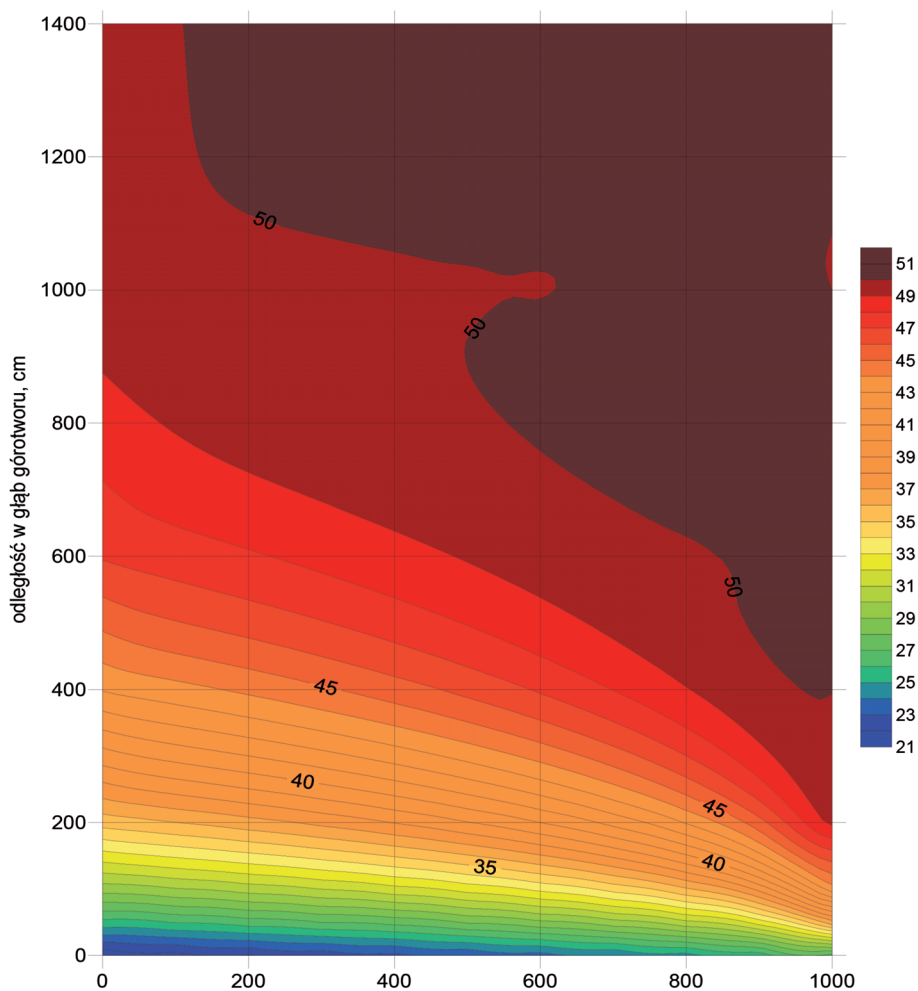
t_w – temperatura powietrza w wyrobisku, °C;

α – współczynnik przejmowania ciepła przez powietrze od ociosu, W/(m²K).

3. Wyniki badań

Założono, że temperatura powietrza wpływającego do wyrobiska jest równa 20°C. Przyjęto cztery alternatywne wartości prędkości powietrza, a mianowicie: 0,5 m/s, 1 m/s, 2 m/s i 5 m/s oraz pięć alternatywnych wartości temperatury pierwotnej skał: 30°C, 35°C, 40°C, 45°C i 50°C. Obliczenia temperatury masywu skalnego wykonano dla następujących przedziałów czasowych: po rozpoczęciu przewietrzania wyrobiska, 1 rok, 5 lat, 10 lat i 20 lat. Uzyskane wyniki zebrano w stu tabelach. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu zamieszczono tutaj tylko jedną z nich (tabela). Dotyczy ona pola temperatury skał o wartości pierwotnej równej 50°C dla okresu, w którym rozpoczęto przewietrzanie wyrobiska. Przyjmując średni postęp dobowy drążenia wyrobiska równy ok. 5 m oraz zakładając 5-dniowy tydzień pracy, czas przewietrzania początku wyrobiska wynosi ok. 300 dni, a czas przewietrzania jego końca kilka dni. Założono, że pole powierzchni przekroju poprzecznego wyrobiska wynosi 20 m², a prędkość powietrza płynącego wyrobiskiem jest równa 5 m/s. Zatem intensywność przewietrzania wyrobiska wynosi 100 m³/s. W tabeli 1 prócz temperatury skał podano również wartości temperatury powietrza mierzonej termometrem suchym. Zmiany tej temperatury wzdłuż trasy wyrobiska podano w drugim wierszu tabeli 1. Kolejne wiersze dotyczą wartości temperatury skał w głąb masywu skalnego. Im bliżej ociosu (ścian wyrobiska), tym zmiany temperatury skał wzdłuż osi równoległej do osi wyrobiska są większe. W miarę wzrostu odległości od ociosu wspomniane zmiany są coraz mniejsze. Odnośnie do temperatury powietrza, to nawet przy tak dużej intensywności przewietrzania wyrobiska jej wartość szybko rośnie. Wyniki obliczeń podane w tabeli 1 przedstawiono również w postaci graficznej na rysunku 1. Ze względu na zakres zmienności wartości na osi poziomej, związanej z długością wyrobiska, są podane w metrach, natomiast wartości na osi pionowej, dotyczącej odległości od ociosu w głąb masywu skalnego, podane są w centymetrach. Analiza rysunku 1 pokazuje, że w okolicach początku wyrobiska strefa wychłodzenia górotworu wynosi blisko 16 m, natomiast w okolicach końca wyrobiska nie dochodzi nawet do 4 m. Jest to związane z dwoma czynnikami. Czas przewietrzania początku wyrobiska jest znacznie dłuższy od czasu przewietrzania jego końca. Dlatego w okolicach początku wyrobiska górotwór zdążył się znacznie wychłodzić.

Druga przyczyna tkwi w wartości temperatury powietrza. Strumień ciepła płynący z otaczającego masywu skalnego do powietrza w wyrobisku zależy od wielu czynników: czasu przewietrzania, intensywności przewietrzania, rozmiarów geometrycznych wyrobiska, własności termicznych skał, a także od różnicy temperatur: skał i powietrza. Na początku wyrobiska wspomniany gradient jest równy 30°C, a na jego końcu ok. 26°C.



Rys. 1. Rozkład temperatury skał wokół wyrobiska bez technologicznych źródeł ciepła dla stanu po rozpoczęciu przewietrzania

Źródło: oprac. własne.

Ponieważ nie można było zamieścić wszystkich wyników obliczeń, opracowano tabelę zawierającą zbiorcze wyniki dla 100 wariantów. Podano w niej tylko wartości zasięgu strefy wychłodzenia górotworu w zależności od czasu oraz intensywności przewietrzania i temperatury pierwotnej skał.

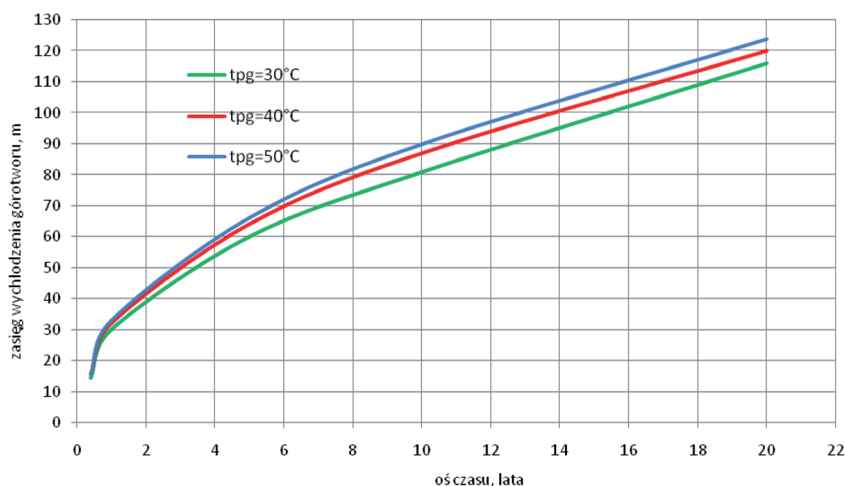
Tab. 1. Zasięg strefy wychładzania górotworu – L, m

Czas przewietrzania		Po uruchomieniu wentylacji	$\tau = 1$ rok	$\tau = 5$ lat	$\tau = 10$ lat	$\tau = 20$ lat
Zasięg strefy wychładzania górotworu – L, m						
Prędkość powietrza w = 0,5 m/s						
Temperatura pierwotna skał t_{pg}	30°C	14,0	29	58	81	112
	35°C	14,5	30	62	84	120
	40°C	15,0	31	62	87	120
	45°C	15,0	32	64	87	124
	50°C	15,5	32	64	90	124
Prędkość powietrza w = 1 m/s						
Temperatura pierwotna skał t_{pg}	30°C	14,5	30	60	81	116
	35°C	15,0	31	62	84	120
	40°C	15,0	31	62	87	120
	45°C	15,5	32	64	90	124
	50°C	15,5	32	64	90	124
Prędkość powietrza w = 2 m/s						
Temperatura pierwotna skał t_{pg}	30°C	14,5	30	60	81	116
	35°C	15,0	31	61	84	120
	40°C	15,0	32	64	87	120
	45°C	15,5	32	64	90	124
	50°C	15,5	32	66	90	124
Prędkość powietrza w = 5 m/s						
Temperatura pierwotna skał t_{pg}	30°C	14,5	30	60	81	116
	35°C	15,0	31	62	84	120
	40°C	15,5	32	64	87	120
	45°C	15,5	32	64	90	124
	50°C	15,5	33	66	90	124

Źródło: oprac. własne.

Z analizy tabeli 2 wynika, że temperatura pierwotna skał nie ma znaczącego wpływu na tempo wychłodzenia górotworu. Wzrost temperatury pierwotnej skał z wartości 30°C do wartości 50°C (a więc bardzo znaczny) skutkuje wzrostem strefy wychłodzenia (w zależności od intensywności i czasu przewietrzania) od ok. 7 do ok. 11%. Jeszcze mniejszy wpływ na zmiany strefy wychłodzenia górotworu ma prędkość przepływającego wyrobiskiem powietrza. Wynosi on od 3 do 3,6%. Inaczej przedstawia się sprawa ze zmianą temperatury ociosu. Wzrost tej temperatury wraz z długością wyrobiska zależy zarówno od temperatury pierwotnej skał, jak i czasu oraz intensywności przewietrzania. Wzrost czasu przewietrzania od najkrótszego do 20 lat skutkuje 2–3-krotnym przyrostem temperatury ociosu wzdłuż trasy wyrobiska. Wzrost temperatury pierwotnej skał skutkuje 3-krotnym wzrostem temperatury ociosu. Natomiast wzrost intensywności przewietrzania z 10 do 100 m³/s powoduje 7–8-krotny przyrost temperatury ociosu. Tak więc w tym przypadku największy wpływ na zmianę temperatury ociosu ma intensywność przewietrzania wyrobiska.

Temperatura skał wewnątrz górotworu zależy głównie od czasu przewietrzania. Na rysunku 2 przedstawiono zmiany tej temperatury w zależności od czasu przewietrzania. Widać z niego, że temperatura pierwotna nie ma zasadniczego wpływu na zasięg strefy wychładzania masywu skalnego. O rozszerzaniu się tej strefy decyduje czas przewietrzania. Nadmienić należy, że w rozważaniach przyjęto granicę strefy wychładzania górotworu w miejscu, w którym temperatura masywu skalnego różni się od temperatury pierwotnej mniej niż 0,01°C. W praktyce zauważalne zmiany obserwuje się, gdy wspomniana różnica wynosi 0,5°C. Wówczas promień strefy wychłodzonej jest o kilkadziesiąt procent krótszy. Należy jednak pamiętać, że przy oszacowaniu ciepła, jakie jest wynoszone z górotworu, różnica jego wartości jest rzędu 10¹²J, w zależności od tego, czy temperaturę skał określamy z dokładnością do 0,01°C, czy z dokładnością do 0,5°C.



Rys. 2. Wpływ czasu przewietrzania wyrobiska na zasięg strefy wychłodzonego górotworu

Źródło: oprac. własne.

4. Podsumowanie

Rozpatrywano wyrobisko korytarzowe o długości 1000 m, w którym nie ma technologicznych źródeł ciepła. Badano wpływ warunków przewietrzania na zasięg strefy wychładzania górotworu. Obliczono temperaturę skał w różnych miejscach od ociosu w obszarze od początku wyrobiska do jego końca. Temperaturę tę wyznaczono, rozwiązując równanie ruchu ciepła, przy czym przy rozwiązaniu tego równania skorzystano z metody różnic skończonych. Zbiórce wyniki przedstawiono w tabeli 2 oraz w postaci graficznej na rysunku 2. Wyniki szczegółowe dla jednego ze stu wariantów zestawiono w tabeli 1 oraz na rysunku 1.

Uzyskane wyniki świadczą o tym, że zarówno temperatura pierwotna skał, jak i strumień objętości powietrza płynącego wyrobiskiem nie mają zasadniczego wpływu na tempo wychładzania górotworu. Zasadniczy wpływ na zasięg strefy wychłodzonego górotworu ma czas przewietrzania wyrobiska. Inaczej przedstawia się kwestia temperatury ociosu (ścian wyrobiska). Wzrost tej temperatury wraz z długością wyrobiska zależy zarówno od temperatury pierwotnej skał, jak i czasu oraz intensywności przewietrzania, przy czym największy wpływ ma ostatni z wymienionych czynników.

Literatura

- [1] Cygankiewicz J., Knechtel J. (2014a), *Comments on the heat released Turing operations In hot rock mass and its possible applications*, 14tg GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings, Vol. III, pp. 99–106, International Multidisciplinary Scientific Geoconferences 17–26 June 2014, Bulgaria.
- [2] Cygankiewicz J., Knechtel J. (2014b), *Zasięg strefy wychłodzenia górotworu wokół wyrobisk rejonu eksploatacyjnego*, [w:] S. Prusk i J. Cygankiewicz (red.), *Wybrane zagadnienia wentylacyjne i pożarowe w kopalniach*, Katowice 2014, s. 12–22.
- [3] Cygankiewicz J., Knechtel J. (2015): *Remarks on Heat Emission During Operation in Hot Rock Mass and on Possibilities of Its Use*, „Journal of Geography and Geology”, Vol. 7, No. 1, march 2015, s. 46–55.
- [4] Cygankiewicz J., Knechtel J., *Wpływ głębokości eksploatacji węgla na ciepło oddawane przez górotwór*, „Przegląd Górniczy” 2017, nr 2, s. 8–17.
- [5] Knechtel J., *Badania nad możliwością wykorzystania ciepła geotermalnego wynoszonego z powietrzem kopalnianym na powierzchnię*, „Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej” 2005, seria Górnictwo, z. 270, s. 257–264.
- [6] Knechtel J., *Uwagi na temat możliwości wykorzystania ciepła kondensacji urządzeń chłodniczych*, „Materiały Szkoły Aerologii Górniczej” 2006, nr 4, s. 307–316.
- [7] Knechtel J., *Considerations Concerning the Stream of Heat Transferred from Rock Mass into Mine Ventilation Air and the Utilization if this Heat by Means of Air Cooling Installations*, „GeoScience & Engineering” 2011, Vol. LVII, No. 2, s. 1–12.
- [8] Łykw A. W., Michajłow J. A., *Teorija tieplo i massopierenosa*, GEI, Moskwa-Leningrad 1963.
- [9] Nikitienko N. I., *Issledowanije niestacionarnych processow tieplo- i masso-obmiena mietodom sietok*, Naukowa Dumka, Kijów 1971.