

*Nikodem Szlęzak**

PROGNOZOWANIE ZAGROŻENIA KLIMATYCZNEGO W WYROBISKACH GÓRNICZYCH**

1. Wstęp

Warunki pracy w kopalniach podziemnych, w porównaniu z warunkami pracy w zakładach na powierzchni, mają swoją specyfikę, która wynika przede wszystkim z rozproszenia miejsc pracy na znacznym obszarze oraz nieprzyjawnego dla człowieka środowiska pracy. Zapewnienie stabilnych w czasie parametrów mikroklimatu przez wentylację i klimatyzację wyrobisk jest trudne do uzyskania. W najbliższej przyszłości należy się liczyć z dalszym pogarszaniem się warunków klimatycznych w polskich kopalniach w wyniku zwiększenia koncentracji wydobywania oraz schodzenia z eksploatacją na głębsze poziomy. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie sposobu określenia warunków klimatycznych w wyrobiskach ścianowych.

W wyrobiskach podziemnym, którymi przepływa powietrze, występują naturalne i technologiczne źródła dopływu strumienia ciepła. W wyniku tego w wyrobiskach podziemnych występują wysokie temperatury, co po uwzględnieniu również wysokiej wilgotności powietrza powoduje znaczne pogorszenie warunków klimatycznych. Powoduje to obniżenie takich funkcji organizmu człowieka, jak zdolność percepcji, koncentracji, uwagi, spostrzegawczości [2–4]. Ten niekorzystny wpływ temperatury i wilgotności na organizm ludzki określamy pojęciem zagrożenia klimatycznego.

Wzrost koncentracji wydobywania wiązał się ze stałym spadkiem zatrudnienia, ale również ze stosowaniem coraz bardziej wydajnych kompleksów ścianowych. Takie działania doprowadziły do niemal całkowitej mechanizacji ścian w procesie produkcji, ograniczając rolę górnika do minimum. Szukanie pokładów o zasobach przemysłowych sprawiło, że rozpoczęto eksploatację pokładów zalegających na coraz większych głębokościach. Równoczesny wzrost mocy urządzeń energomechanicznych w wysoko wydajnych kompleksach ścianowych spowodował znaczny wzrost temperatury i zmiany mikroklimatu pracy. Regulacja temperatury środkami wentylacyjnymi (zwiększanie ilości powietrza) przy tak ogromnych dopływach strumienia ciepła nie dawała oczekiwanych efektów. Przepisy górnicze jednoznacznie określają temperaturę 28°C i powyżej 11 katastopni intensywności chłodzenia

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Kraków

** Artykuł został zrealizowany w ramach prac statutowych w AGH nr 11.11.100.371

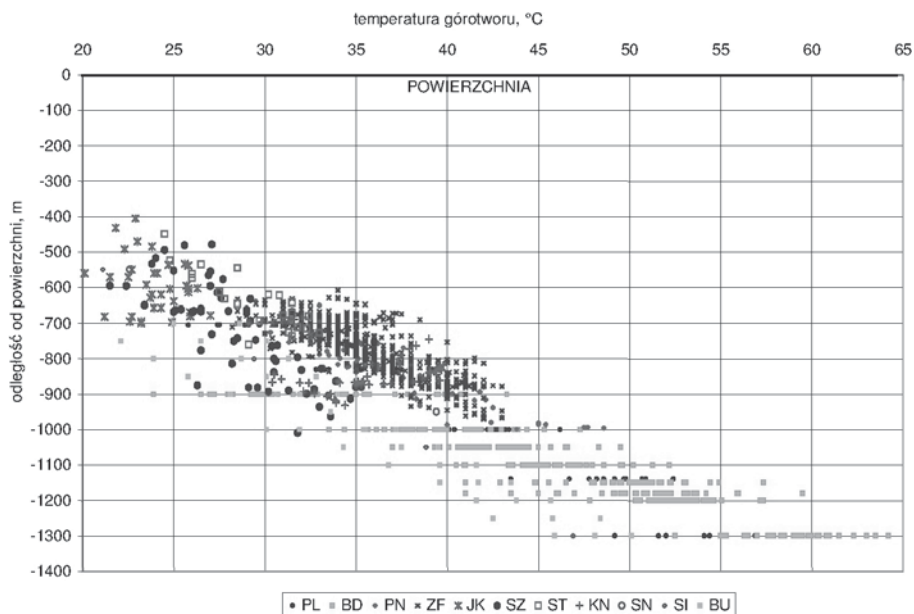
jako dopuszczalną w przypadku pełnowymiarowej zmiany pracy. W roku 2009 aż w 22 kopalniach węgla kamiennego występowały wyrobiska z przekroczoną temperaturą powietrza 28°C [5]. Coraz większego znaczenie nabierają zatem problemy związane z projektowaniem systemów przewietrzania i klimatyzacji wyrobisk w kopalniach podziemnych.

Kierownictwa wielu podziemnych zakładów górniczych stanęły przed dylematem zastosowania maszyn klimatycznych lub ograniczenia czasu pracy górników. Zastosowanie urządzeń chłodniczych wiązało się z dużymi inwestycjami i dlatego część kopalń decyduje się na ograniczenie czasu pracy górników.

2. Czynniki wpływające na wzrost zagrożenia klimatycznego

Zmiany temperatury powietrza kopalnianego zachodzą na skutek procesów sprężania powietrza w polu sił ciężkości, wymiany ciepła i wilgoci pomiędzy górotworem i lokalnymi, dodatkowymi źródłami ciepła, a przepływającym powietrzem. Dodatkowe źródła ciepła stanowią przede wszystkim maszyny i urządzenia, a w szczególności napędy elektryczne i spalinowe. Strumień ciepła dopływający do powietrza z odsłoniętych skał odbywa się poprzez konwekcję, parowanie wilgoci oraz promieniowanie [4].

Na rysunku 1 przedstawiono zmianę temperatury górotworu z głębokością w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW). Pole temperatury skał na danym poziomie głębokościowym nie jest jednorodne i nawet pomiędzy sąsiadującymi kopalniami występują znaczące anomalie temperaturowe. Największe temperatury występują w południowo-wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego [2].



Rys. 1. Zmiana temperatury górotworu z głębokością w GZW

Oprócz temperatury pierwotnej górotworu o wielkości strumienia ciepła dopływającego od górotworu decydują również następujące czynniki [4]:

- własności termofizyczne skał (gradient geotermiczny, pojemność cieplna skał, współczynnik przewodnictwa cieplnego skał itp.);
- temperatura przepływającego powietrza i jej zmiany w czasie;
- wymiary geometryczne wyrobisk;
- prędkość przepływu powietrza i czas przewietrzania wyrobiska;
- straty ciśnienia powietrza w wyrobiskach.

O bezpośrednim stanie zagrożenia klimatycznego decyduje również właściwe planowanie wyrobisk podziemnych, transportu urobku i lokalizacji urządzeń elektrycznych oraz racjonalna wentylacja wyrobisk w aspekcie minimalizacji ogrzewania powietrza dopływającego do stanowisk pracy. W warunkach wysokiej temperatury pierwotnej skał optymalne wykorzystywanie ww. rozwiązań nie przynosi pożądanego skutku i zachodzi konieczność stosowania urządzeń chłodniczych.

3. Metody prognozowania temperatury i wilgotności powietrza

Wpływ na kształtowanie temperatury powietrza w wyrobisku mają jego wilgotność, głębokość eksploatacji i związane z nią sprężanie powietrza w szybach wdechowych oraz przepływ ciepła z górotworu do powietrza. Ponadto nawilżanie powietrza wodami dołowymi i technologicznymi oraz ciepło utleniania węgla i inne dodatkowe źródła ciepła (urządzenia elektromechaniczne) powodują dalszy wzrost temperatury.

W literaturze przedmiotu szacowano dotychczas, że całkowity bilans ciepła w kopalniach węgla kamiennego kształtuje się następująco:

- 50% od górotworu,
- 25% od utlenianego węgla,
- 25% od innych dodatkowych źródeł ciepła.

W ostatnich latach można zaobserwować zmianę tych proporcji. Eksploatacja węgla odbywa się na coraz większych głębokościach (wzrost temperatury górotworu) i następuje zwiększenie koncentracji wydobywania (źródła lokalne). Wszystkie te czynniki sprawiają, iż w całkowitym bilansie ciepła znacznie wzrósł udział ciepła pochodzącego od urządzeń energomechanicznych.

Istnieje wiele metod prognozowania temperatury powietrza kopalnianego. Do metod tych należy zaliczyć metodę opracowaną w GIG w Katowicach. Metoda ta pozwala na prognozowanie temperatury i stopnia zwilżania powietrza w wyrobiskach górniczych z wentylacją opływową. Temperatura powietrza kopalnianego w danym wyrobisku z wentylacją opływową jest obliczana wg wzoru:

$$t_w = t_d + \Delta t_s + \Delta t_z + \Delta t_x \quad (1)$$

gdzie:

t_d — temperatura powietrza w przekroju dopływu wyrobiska (°C),

Δt_s — przyrost temperatury powietrza w wyniku wymiany ciepła między skałami a powietrzem,

Δt_z — przyrost temperatury powietrza w wyrobisku wynikający z działania w nim dodatkowych źródeł ciepła,

Δt_x — przyrost temperatury powietrza w wyrobisku związany ze zmianą stanu skupienia wody.

Stopień zawilżenia powietrza x w danym wyrobisku wyznacza się, korzystając ze wzoru:

$$x_w = x_d + \Delta x \quad (2)$$

gdzie:

x_w — stopień zwilżenia powietrza w przekroju wypływu wyrobiska [kg/kg],

x_d — stopień zwilżenia powietrza w przekroju dopływu wyrobiska [kg/kg],

Δx — przyrost stopnia zwilżania w wyrobisku [kg/kg].

$$\Delta x = l \cdot \chi \quad (3)$$

gdzie:

l — długość wyrobiska [m],

χ — jednostkowy stopień zwilżania powietrza [kg/kgm].

Jednostkowy stopień zwilżania powietrza wyznacza się na podstawie bezpośrednich pomiarów, które wykonuje się w głębinowych kopalniach. W ten sposób dla każdego rodzaju wyrobiska w zależności od przeznaczenia można wyznaczyć jednostkowy przyrost stopnia zwilżenia, korzystając ze wzoru:

$$\chi^m = \frac{x_w - x_d}{l} \quad (4)$$

W przepływającym przez wyrobisko eksploatacyjne powietrzu zachodzą jawne i niejawnie przemiany energii. Efektem procesów jawnej wymiany ciepła są zmiany temperatury, zaś niejawnie – zmiany wilgotności powietrza. Złożoność przekształceń energii w wyrobiskach kopalnianych powoduje, że mimo sprzężenia tych mechanizmów wymiany ciepła stosuje się uproszczone opisy tych procesów i rozpatruje się je oddzielnie.

Zgodnie z metodą Waclawika [4] temperatura powietrza T_a w wyrobisku kopalnianym ma spełniać równanie energii w postaci:

$$\frac{dT_a}{ds} = \frac{q_s}{\dot{V}\rho c_p} + \frac{q_d}{\dot{V}\rho c_p} \quad [^\circ\text{C/m}] \quad (5)$$

gdzie:

s — oś wyrobiska biegnąca wzdłuż chodnika lub czoła ściany [m],

- q_s — strumień ciepła od skał przypadający na jednostkę długości pola eksploatacyjnego w kierunku równoległym do czoła frontu eksploatacyjnego [W/m],
 q_d — strumień ciepła jawnego od pozostałych źródeł, przeliczony na jednostkę długości wyrobiska i na jednostkę czasu [W/m],
 \dot{V} — wydatek powietrza [m³/s],
 ρ — gęstość powietrza [kg/m³],
 c_p — ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)].

Pierwszy składnik równania (5) podaje przyrost temperatury powietrza na odcinku wyrobiska o jednostkowej długości, spowodowany dopływem ciepła od skał, zaś drugi składnik – przyrost temperatury spowodowany innymi źródłami ciepła. W równaniu (5) pominięto wpływ autokompresji.

Strumień ciepła od skał q_s zależy od różnicy między temperaturą pierwotną skał a temperaturą powietrza $\vartheta_o - T_a$ od współczynnika przewodnictwa cieplnego skał λ , od pola powierzchni wymiany ciepła F_s oraz od warunków wymiany ciepła, które uwzględnia teoria przewodnictwa cieplnego:

$$q_s = \lambda q_s^* (\vartheta_o - T_a) \quad (6)$$

gdzie:

- F_s — pole powierzchni odsłoniętych skał, przypadające na jednostkę długości wyrobiska eksploatacyjnego w kierunku osi s [m²/m],
 q_s^* — bezwymiarowy gradient temperatury skał [1/m].

Gęstość strumienia ciepła wymienianego między skałami a powietrzem jest równa [4]:

$$q_s = \lambda \cdot q_s^* (\vartheta - T_s) = \lambda \left\{ \frac{\alpha}{\lambda} \exp \left[\left(\frac{\alpha}{\lambda} \right)^2 at \right] \Phi^* \left(\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{at} \right) \right\} (\vartheta - T_s) \quad [W/m^2] \quad (7)$$

$$\Phi^* (z) = 1 - \Phi(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-\xi^2) d\xi \quad (8)$$

gdzie:

- T_s — temperatura powietrza w wyrobisku [°C],
 α — współczynnik przejmowania ciepła [W/(m²K)],
 ϑ — temperatura pierwotna skał [°C],
 λ — współczynnik przewodnictwa cieplnego [W/(mK)],
 $\Phi(z)$ — gaussowska funkcja błędów,
 ξ — zmienne całkowania.

W wyrobiskach kopalnianych występują także lokalne (miejscowe) źródła, do których zalicza się:

- wszystkie odbiorniki energii, takie jak urządzenia urabiające, transportujące, a także pompy, wentylatory, oświetlenie, emitujące ciepło do otoczenia;
- urobione oraz transportowane skały, wymieniające ciepło z przepływającym powietrzem;
- utleniające się w powietrzu odsłonięte skały węglowe lub minerały siarczkowe;
- wodę dopływającą ze szczelin, spękań i porów do wyrobisk korytarzowych i przodków;
- pracowników oddających do otoczenia ciepło metabolizmu;
- rurociągi transportujące media o temperaturze różnej od temperatury powietrza.

W niektórych modelach procesów wymiany ciepła między skałami a przepływającym powietrzem do źródeł lokalnych zalicza się także ciepło parowania wilgoci w wyrobisku.

Napędy, urządzenia mechaniczne i elektryczne przekazują do powietrza ciepło, którego wielkość zależy przede wszystkim od ich mocy, sprawności mechanicznej, sposobu konwersji dostarczonej energii w ciepło oraz od nierównomierności obciążenia w czasie. Przy projektowaniu systemów wentylacji i klimatyzacji głębokiej kopalni należy przyjąć, że energia elektryczna zużywana na dole, z wyjątkiem dostarczanej do ziębiarek oraz do urządzeń znajdujących się w prądach powietrza zużytego, przechodzi w postaci ciepła do powietrza przewietrzającego wyrobiska. W dużej kopalni strumień ciepła generowanego w ten sposób może sięgać wielu megawatów.

Większość stosowanych w kopalniach węgla maszyn urabiających i transportujących posiada napęd elektryczny. Ze względu na ograniczoną sprawność przetwarzania energii napędowej jej część zamienia się w ciepło bezpośrednio w silniku. Zewnętrznym objawem tych strat jest wyższa temperatura silnika w porównaniu z temperaturą otoczenia, do którego przekazywane jest ciepło. Sprawność silników elektrycznych zależy od ich budowy, prędkości obrotowej, mocy i obciążenia w stosunku do mocy nominalnej. Silniki asynchroniczne: pierścieniowe i klatkowe w pełni obciążone, o mocy nominalnej rzędu setek kilowatów, charakteryzują się wysoką sprawnością, przekraczającą 90%. Straty w silniku wiążą się ze stratami w uzwojeniu i w obwodzie magnetycznym (tzw. straty w miedzi i w żelazie), wywoływane są też oporami powietrza w stosunku do wirujących elementów oraz tarciem w łożyskach. Straty w uzwojeniu zwykle są największe i zmieniają się z kwadratem natężenia prądu. Przy spadku obciążenia silnika w stosunku do mocy nominalnej jego sprawność zmniejsza się.

Przeważająca część energii przekazywanej przez napęd na skutek tarcia przechodzi w ciepło. Na przykład podczas pracy urządzenia transportującego urobek pod górę część energii napędzającej urządzenie zostaje zamieniona w energię potencjalną. Jednak mechanizmem tarcia zasadnicza część energii zostaje rozproszona i w postaci ciepła przeniesiona do otoczenia.

W maszynach i narzędziach urabiających część energii napędu zostaje zamieniona w energię powierzchniową, której miarą jest stopień rozdrobnienia. Wielkość energii przy powstawaniu nowych powierzchni jest trudna do oszacowania.

Na podstawie pomiarów przeprowadzonych w niemieckich kopalniach węgla J. Voß [4] stwierdził, że około 70% energii napędowej maszyn przechodzi do otoczenia w postaci

ciepła. Część tego ciepła, równa 10–25%, przekazywana jest do powietrza w sposób jawny i powoduje wzrost temperatury. Część, wynosząca 90–75%, wymieniana w sposób niejawny przyczynia się do wzrostu wilgotności. Na tej podstawie przyrosty temperatury ΔT_m i wilgotności Δx_m , wywołane pracą napędów oraz urządzeń mechanicznych w wyrobiskach kopalń węgla, mogą być wyliczone ze wzorów:

$$\Delta T_m = \frac{0,7 \cdot (0,1 \div 0,25) \Delta Q_m}{\dot{V} \rho c_p}, \quad \Delta x_m = \frac{0,7 \cdot (0,9 \div 0,75) \Delta Q_m}{\dot{V} \rho r_w} \quad (9)$$

gdzie Q_m – energia zamieniona w ciepło w urządzeniu z napędem mechanicznym lub elektrycznym [W].

Część jawna ciepła $0,7 \cdot (0,1-0,25) \cdot Q_m$ może być traktowana jako iloczyn długości wyrobiska s i strumienia ciepła od maszyn, przeliczonego na jednostkę długości wyrobiska q_{dm} .

W transformatorach na ciepło zamienia się 1,5–5% energii, w kablach i przewodach 4–10%. Oświetlenie wyrobisk ma niewielki wpływ na temperaturę powietrza.

Urobek może być transportowany za pomocą różnych środków technicznych i przez różne wyrobiska. Transport urobku w prądzie świeżego powietrza przyczynia się do powstania niekorzystnych warunków klimatycznych. Strumień ciepła przekazywany od urobku do powietrza w danym wyrobisku jest równy:

$$\Delta Q_u = \dot{m}_u c_u \Delta \vartheta_u \quad (10)$$

gdzie:

\dot{m}_u — strumień masy transportowanego urobku [kg/s],
 c_u — ciepło właściwe skał [J/(kgK)].

Obniżenie temperatury urobku węglowego w wyrobisku J. Voß [4] wyznacza ze wzoru empirycznego:

$$\Delta \vartheta_u = 0,0024 L^{0,8} (\vartheta_{uo} - T_{ms}) \quad (11)$$

gdzie:

L — długość wyrobiska [m],
 δ_{uo} — temperatura urobku [°C],
 T_{ms} — średnia temperatura na termometrze wilgotnym w wyrobisku [°C].

Na skutek wymiany ciepła z powietrzem temperatura urobku jest obniżona w stosunku do jego temperatury pierwotnej. Zmiany temperatury i wilgotności powietrza spowodowane wymianą ciepła między urobkiem a przepływającym powietrzem wyznacza się ze wzorów (7).

Rozwiązaniem równania energii (5) jest funkcja:

$$T_a(s) = \vartheta_{oo} - (\vartheta_{oo} - T_{ao}) \exp\left(-\frac{\lambda q_s^* F_s s}{\dot{V} \rho c_p}\right) + \frac{q_d}{\lambda q_s^* F_s} \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda q_s^* F_s s}{\dot{V} \rho c_p}\right)\right] \quad (12)$$

gdzie:

- ϑ_{oo} — temperatura pierwotna skał [°C],
- T_{ao} — temperatura powietrza na wlocie do wyrobiska [°C].

Zapisane w pierwszej kolejności dwa składniki prawej strony przedstawiają temperaturę powietrza ukształtowaną przez dopływ ciepła od skał. Ostatni składnik odzwierciedla zmianę temperatury powietrza spowodowaną przez miejscowe źródła ciepła.

Z zależności określającej jawną wymianę ciepła (10) można wyliczyć temperaturę wlotową do wyrobiska T_{a1} , przy której temperatura na końcu ściany osiąga wartość zadaną $T_d(L)$ (na przykład określoną przez normy):

$$T_d(L) = \vartheta_{oo} - (\vartheta_{oo} - T_1) \exp\left(-\frac{\lambda q_s^* F_s L}{\dot{V} \rho c_p}\right) + \frac{q_d}{\lambda q_s^* F_s} \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda q_s^* F_s L}{\dot{V} \rho c_p}\right)\right] \quad (13)$$

gdzie:

- T_d — temperatura dozwolona na wylocie ze ściany [°C],
- T_1 — nieznaną temperaturę na wlocie do ściany [°C],
- L — długość ściany [m].

4. Ocena metod prognozowania temperatury powietrza

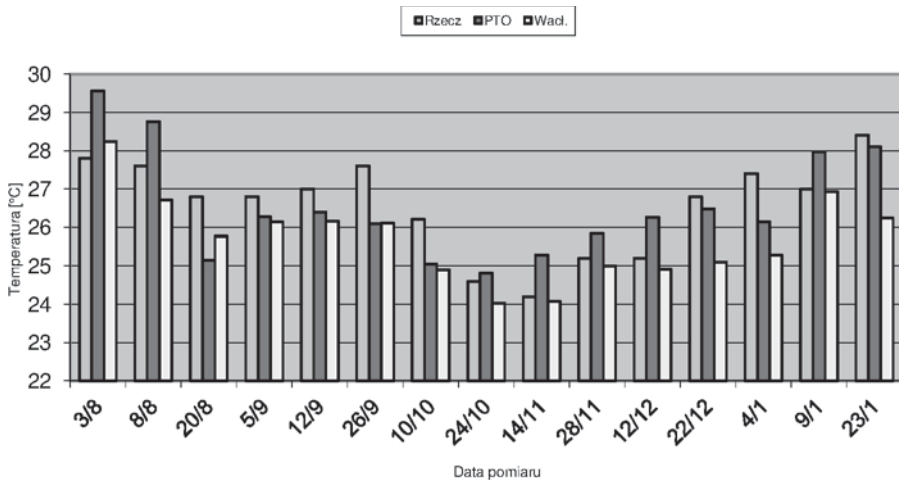
Na potrzeby oceny dokładności metod prognozowania rozkładu temperatury przeprowadzono badania w wyrobiskach ścianowych. Pomiar temperatury w wyrobisku obejmował odczyt temperatury suchej i wilgotnej za pomocą psychrometru Assmanna. Ciśnienie barometryczne wyznaczono za pomocą aneroidu elektronicznego typu PAE-03, natomiast wydatki powietrza w ścianie wyznaczono ze średniej prędkości przepływu powietrza przy użyciu anemometru Lambrechta. Odczyt temperatur następował wzdłuż osi ściany w odległościach co 20 sekcji (30 m). Ze względu na długi okres pomiarów parametry termodynamiczne powietrza ulegały znacznym zmianom. Czynnikiami decydującymi o tych zmianach były:

- ilość powietrza,
- temperatura na wlocie,
- wielkość wydobyć,
- wilgotność powietrza.

Badania polegały na pomiarze temperatur i ilości powietrza w szerokim zakresie czasu, tak aby można było obserwować również zmiany warunków cieplnych. Przedstawione w tym miejscu wyniki obliczeń zostały wykonane przez M. Kapustę [1] w ramach pracy doktorskiej.

Ściana S-3

W analizowanym okresie w ścianie S-3 ilość powietrza na wlocie do ściany była zróżnicowana i wahała się od 560 m³/min do 940 m³/min. Temperatura pierwotna górotworu wynosiła 38°C. W wyrobisku pracował kombajn ścianowy JOY o mocy 465 kW oraz przenośnik ścianowy z napędami o mocy urządzeń 630 kW na wlocie i 315 kW na wylocie ze ściany. Wydobycie dobowe wahało się w granicy 2150–2460 Mg. Na rysunku 2 przedstawiono w formie graficznej rozkład temperatury powietrza w ścianie S-3 uzyskany na podstawie pomiarów i obliczony metodami PTO-2 i metodą Waclawika. W analizowanym okresie wartość temperatury na wylocie ze ściany zmieniała się od 24,2°C do 28,4°C. Wartość temperatur prognozowanych jest zróżnicowana i zawiera się w przedziale od 29,55°C do 24,03°C. Błędy względne dla obu prognoz dochodzą do kilku procent. Średnie wartości błędów w obu prognozach są porównywalne i wynoszą około 3,5%.



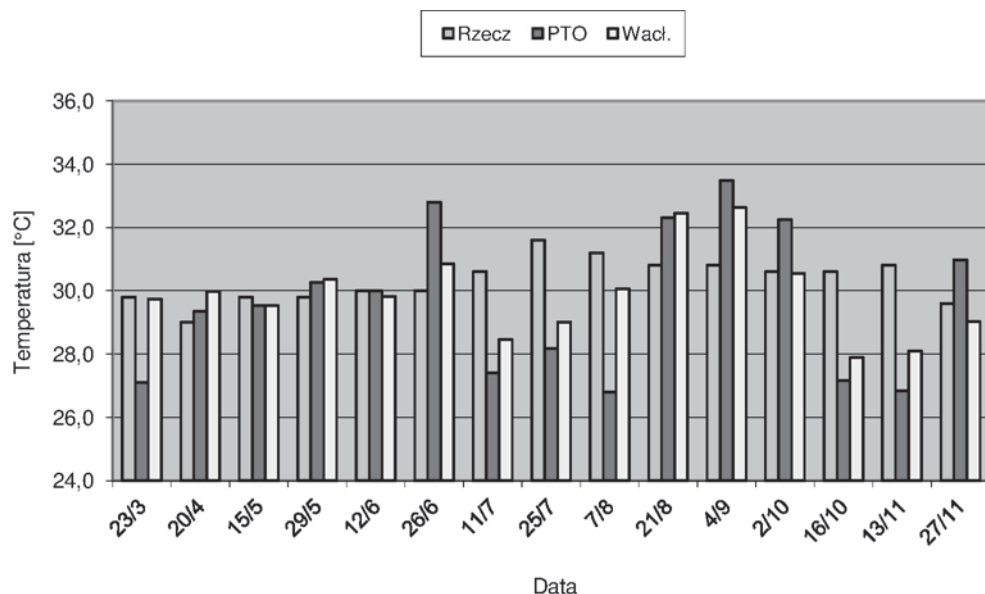
Rys. 2. Rozkład temperatury powietrza w ścianie S-3 uzyskany z pomiarów i obliczeń

Ściana K-9

Ściana K-9 była przewietrzana systemem Y. Temperatura pierwotna górotworu wynosiła 40°C. W okresie prowadzenia badań ilość powietrza płynącego przez wyrobisko ścianowe była bardzo zróżnicowana i wahała się od 450 m³/min do 1200 m³/min. Ściana wyposażona została w kombajn KGS-345 oraz przenośnik ścianowy Rybnik 225/750 z napędami o mocy 360 kW. Wydobycie dobowe wahało się w granicy 1950–2340 Mg.

Na rysunku 3 przedstawiono w formie graficznej rozkład temperatury powietrza w ścianie K-9 uzyskany z pomiarów i obliczony metodami PTO-2 i metodą Waclawika. Wartość temperatury powietrza na wylocie ze ściany waha się w granicach od 29 do 31,6°C. Natomiast temperatura prognozowana jest bardziej zróżnicowana i zawiera się w przedziale 26,8–33,5°C według metody PTO oraz 27,9–32,5°C dla metody Waclawika.

Można zauważyć, że wartość maksymalna temperatury z prognozy odpowiada wartości minimalnej wydatku powietrza ($450 \text{ m}^3/\text{min}$). Błędy względne w obu prognozach są większe niż w ścianie S-3 i dochodzą do kilkunastu procent. Średnia wartość błędów w prognozie metodą Waclawika jest prawie dwukrotnie mniejsza i wynosi 4%.

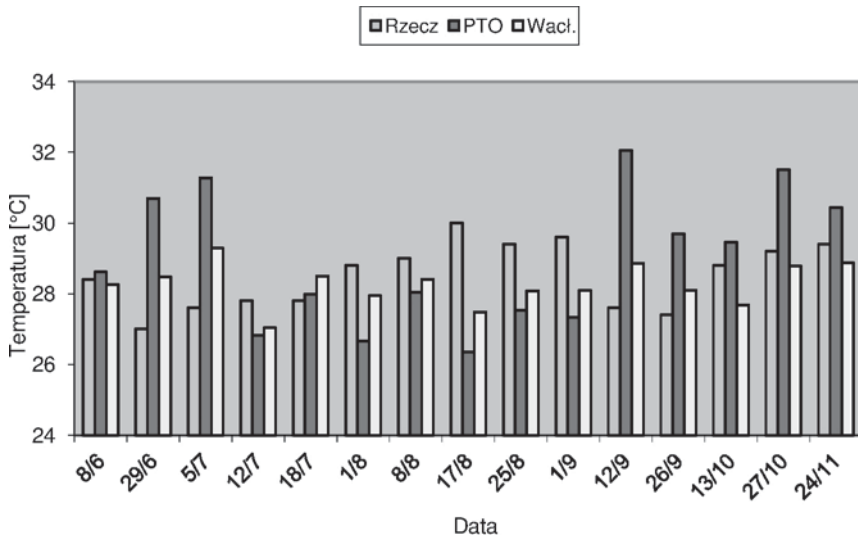


Rys. 3. Rozkład temperatury powietrza w ścianie S-3 uzyskany z pomiarów i obliczeń

Ściana B-1

Ściana B-1 była przewietrzana systemem Y. Temperatura pierwotna górotworu wynosiła 40°C . Ilość powietrza płynącego przez wyrobisko była bardzo zróżnicowana i wahała się od $550 \text{ m}^3/\text{min}$ do $900 \text{ m}^3/\text{min}$. Ściana wyposażona została w kombajn KGS-345 oraz przenośnik ścianowy z napędami o mocy urządzeń 360 kW na wlocie i 315 kW na wylocie ze ściany. Wydobycie dobowe wahało się w granicy $1870\text{--}2440 \text{ Mg}$.

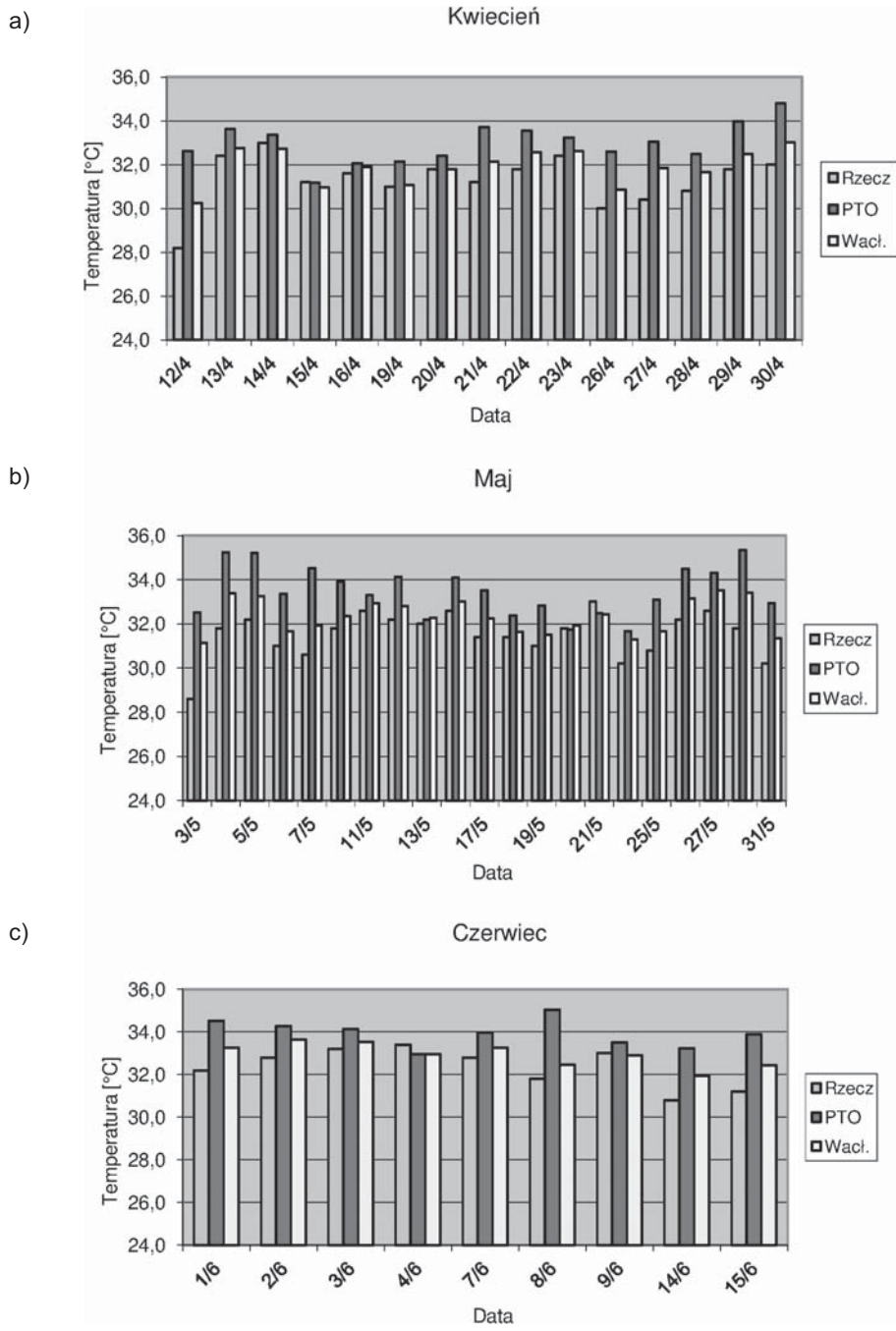
Na rysunku 4 przedstawiono w formie graficznej rozkład temperatury powietrza w ścianie B-1 uzyskany z pomiarów i obliczony metodami PTO-2 i metodą Waclawika. Wartość temperatury powietrza z pomiarów na wylocie ze ściany waha się w granicach $27\text{--}30^\circ\text{C}$. Natomiast prognozowane temperatury powietrza wynoszą odpowiednio $26,2\text{--}32^\circ\text{C}$ dla metody PTO oraz $27\text{--}29^\circ\text{C}$ dla metody Waclawika. Tutaj podobnie jak w ścianie K-9 można zauważyć, że dla mniejszych wartości wydatku powietrza metoda PTO wyraźnie prognozuje wyższe wartości temperatury od wartości rzeczywistych. Błędy względne obu metod są podobne jak w przypadku ściany K-9 i wynoszą do kilkunastu procent. Również średnia wartość błędów metodą PTO jest dwukrotnie większa i wynosi $7,14\%$.



Rys. 4. Rozkład temperatury powietrza w ścianie S-3 uzyskany z pomiarów i obliczeń

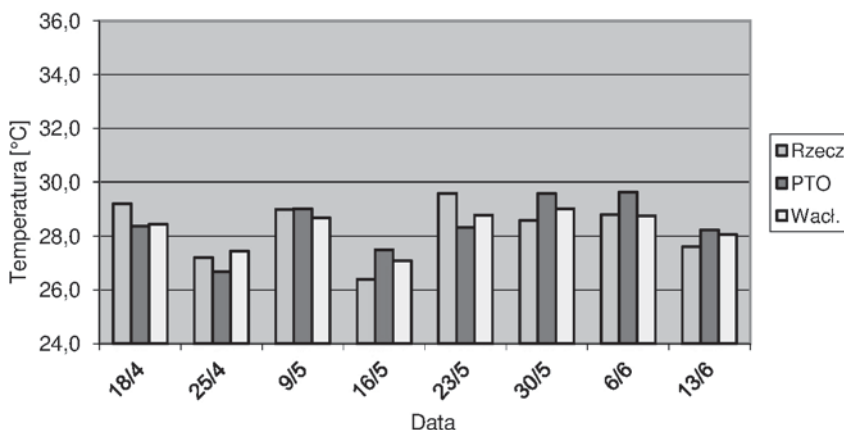
Ściana 10B

W ścianie 10B oprócz pomiarów w dni robocze prowadzone były również pomiary w dni wolne od pracy w czasie postojów kombajnu i przenośnika. Temperatura pierwotna górotworu wynosiła 32°C. Ściana 10B w pokładzie 416 prowadzona była na zawał systemem podłużnym na całą grubość pokładu od pola. Ściana przewietrzana była systemem Z. Nachylenie podłużne ściany wynosiło 0–8°. Ścianę wyposażono w kombajn ścianowy KGS-345, obudowę PUMA 08/22 POz i przenośnik ścianowy Rybnik 225/750/BP-K200. Długość ściany wynosiła 290 m, wysokość 2,0 m. Średni postęp ściany wynosił 6,0 m, zaś średnie wydobycie kształtowało się na poziomie 4300 Mg na dobę. Pomiary temperatury prowadzone były w dwóch przekrojach: na wlocie do ściany i na wylocie ze ściany. Na rysunku 5 przedstawiono rozkład temperatury w ścianie, a także temperatury prognozowane, a na rysunku 6 te same parametry, ale odnoszące się do dni bez wydobywania. Wartość temperatury pomierzonej na wylocie ze ściany waha się w granicach od 26,4 do 33,4°C. Wartości minimalne odpowiadają okresom, w których nie prowadzono wydobywania w ścianie. Prognozowane wartości temperatury zawierają się w przedziale 26,9–35,6°C według metody PTO oraz 27,3–33,3°C według metody Waclawika. Warto zauważyć, że obie prognozy dosyć dokładnie określają temperaturę w wyrobisku, gdy nie działają źródła lokalne, a główny wpływ na temperaturę ma ciepło przepływające z górotworu. W przypadku pracy urządzeń w ścianie obie metody prognozowania zawyżają temperaturę rzeczywistą wyrobiska. Błędy względne obu metod są znacznie wyższe według metody prognozowania w czasie pracy ściany i wynoszą 5,92% według PTO i 2,47% według metody Waclawika. Błędy w przypadku prognoz w chwili postojów ściany są niemal dwukrotnie niższe i wynoszą odpowiednio 2,73% i 1,65%.



Rys. 5. Rozkład temperatury powietrza w ścianie 10B uzyskany z pomiarów i obliczeń w dniach z wydobywaniem

Dni wolne od pracy



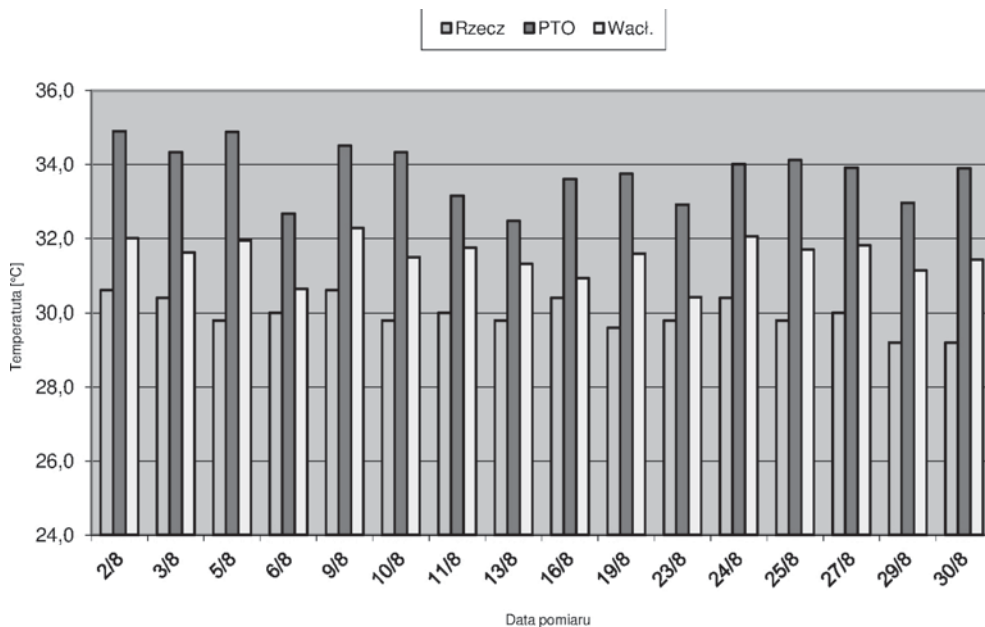
Rys. 6. Rozkład temperatury powietrza w ścianie 10B uzyskany z pomiarów i obliczeń dla dni bez wydobywania

Ściana 02b

Ściana ta charakteryzowała się wysoką koncentracją wydobywania, gdyż dobowe wydobywanie wynosiło średnio 5650 Mg. Łączna moc urządzeń elektrycznych pracujących w wyrobisku wynosiła 1985 kW. Długość ściany dochodziła do 260 m, a temperatura pierwotna górotworu wynosiła 34,8°C. Pomiarów temperatury prowadzone były w dwóch przekrojach: na wlocie do ściany i na wylocie ze ściany. Na rysunku 7 przedstawiono rozkład temperatury otrzymany z pomiarów, a także obliczony opisywanymi metodami. Wartość temperatury pomierzonej na wylocie ze ściany waha się w granicach 29,2–30,6°C. Prognozowane wartości temperatury zawierają się w przedziale 32,4–35°C dla metody PTO oraz 30,6–32,3°C dla metody Waclawika. Z rysunków tych widać jednoznacznie, iż obie metody prognozowania zawyżają temperatury w stosunku do rzeczywistych. Podobnie jak w przypadku ściany 10B większą odchyłkę wykazuje metoda PTO, a średni błąd względny dla pomiarów wynosi aż 12,74%. Metoda Waclawika jest bardziej dokładna, gdyż średni błąd względny jest przeszło dwukrotnie mniejszy i wynosi 5,17%.

Celem wykonywanych obliczeń była analiza dokładności metod prognozowania rozkładu temperatury w wyrobiskach ścianowych. Prognozy przeprowadzono w odniesieniu do pięciu różnych ścian o zmiennych koncentracjach wydobywania. Trzy pierwsze ściany można zaliczyć do ścian o średnim wydobywaniu (1700–2500 Mg/dobę). Dwie ostatnie można zaklasyfikować do ścian o wysokiej koncentracji wydobywania (4300 Mg/dobę i 5650 Mg/dobę). Wszystkie prognozy zostały wykonane w czynnych wyrobiskach, a wyniki pomiarów zostały porównane z wartościami uzyskanymi z prognozy. Na podstawie tych wyników można wysnuć wstępne wnioski, iż przedstawione wyniki obliczeń opisanymi metodami prognozowania są adekwatne do ścian o małej i średniej koncentracji. Z chwilą wzrostu wydobywania wartości temperatur prognozowanych w znacznym stopniu

zaczynają odbiegać od temperatur pomierzonych w wyrobisku. Jak można zauważyć na przykładzie ściany 10B istotny wpływ na to mają dodatkowe lokalne źródła ciepła znajdujące się w wyrobisku. W ścianie tej prowadzone były również pomiary w dniach wolnych od pracy i prognozowane wartości temperatury odpowiadały wartościom pomierzonym. Nasuwa się wniosek, że wymiana ciepła między górotworem i przepływającym powietrzem jest prawidłowo opisana podanymi wzorami. Istotny wpływ na kształtowanie się temperatury w wyrobisku muszą mieć więc inne źródła lokalne. Wraz ze wzrostem koncentracji wydobywania rośnie moc zabudowanych urządzeń energomechanicznych i wzrasta udział ciepła utajonego. Wzrost mocy elektrycznych zainstalowanych urządzeń przekłada się bezpośrednio na wymianę ciepła i wilgoci ze źródeł lokalnych w wyrobisku.

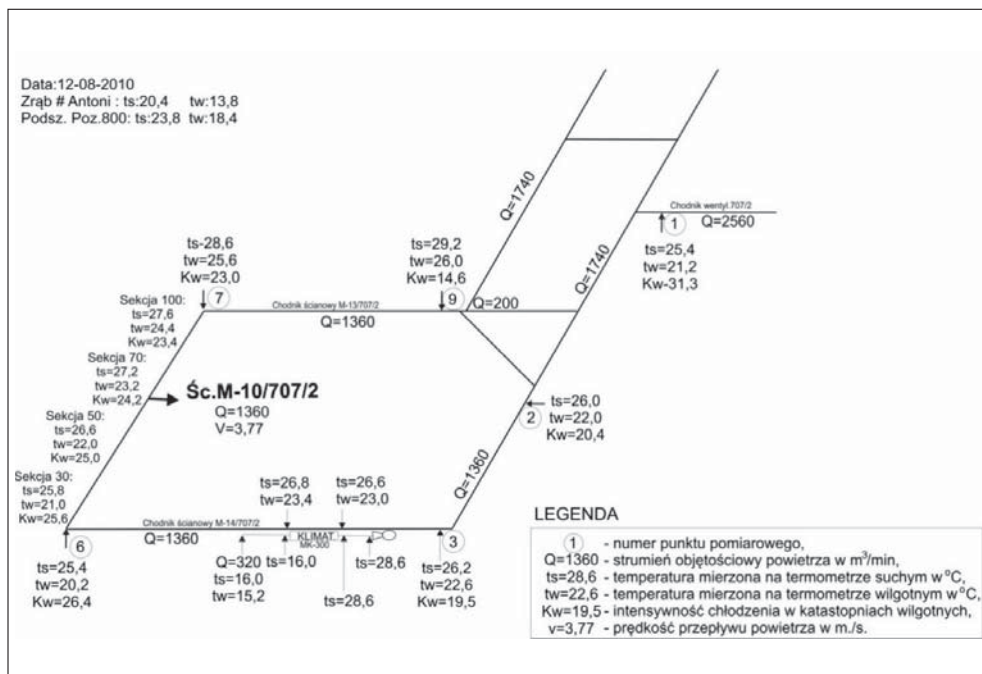


Rys. 7. Rozkład temperatury powietrza w ścianie 02b uzyskany z pomiarów i obliczeń

5. Przykład prognozy warunków klimatycznych

W celu oceny wpływu lokalnych źródeł ciepła i wilgoci na parametry mikroklimatu powietrza kopalnianego należy wykonać pomiary warunków klimatycznych w wyrobiskach z grupowymi i rejonowymi prądami powietrza i przeprowadzić ich analizę. Do analizy zagrożenia temperaturowego wykorzystano wyniki pomiarów mikroklimatu z okresu od maja do sierpnia 2010 roku prowadzonych w odniesieniu do ściany X w pokładzie 707/2.

Pomierzone wartości w rejonie ściany X przedstawiono na rysunku 8. Dane te pozwoliły na wykonanie prognozy metodą PTO i skorygowanie zmian zawilgocenia powietrza i ciepła z dodatkowych źródeł w rejonie rozpatrywanej ściany.



Rys. 8. Wyniki pomiarów parametrów termodynamicznych powietrza w rejonie ściany X na poziomie 1000 m

6. Dane dla prognozowania temperatury powietrza

W celu określenia zapotrzebowania na moc chłodniczą na każdej ścianie eksploatacyjnej wykonano prognozę temperatury powietrza oraz wilgotności właściwej. Rozpatrywane ściany eksploatacyjne są przewietrzane systemem U od granic. Przy takim sposobie prowadzenia eksploatacji i przewietrzania ścian następuje skracanie wyrobisk doprowadzających świeże powietrze. Stąd roboty przygotowawcze wyprzedzają w czasie roboty eksploatacyjne i w obliczeniach przyjęto długości wyrobisk dla maksymalnego wybiegu. Natomiast ilość doprowadzanego powietrza odpowiednio do rejonu eksploatacji i ściany przyjęto na podstawie wyników pomiarów w aktualnie eksploatowanych ścianach. Ilość doprowadzanego powietrza przyjęto w zależności od wielkości zagrożenia metanowego. W warunkach mniejszego zagrożenia metanowego przyjmowano ilość powietrza równą

1200 m³/min. Natomiast w pokładach o dużym zagrożeniu metanowym przyjmowano 1500 m³/min. Przyjęty rozplyw powietrza oraz wyposażenie i moc urządzeń w rejonie ścian przedstawia rysunek 9. Długość wyrobisk eksploatacyjnych przyjmowano, opierając się na mapie pokładu.

W przypadku kopalni istniejącej w prognozie uwzględnia się pomiary temperatury w istniejących wyrobiskach górniczych. Progностyczne obliczenia zmian temperatury rozpoczęto od najwyższych temperatur w okresie letnim, które występują na podszybiu szybu wdechowego. Wartości temperatur powietrza wlotowego do oddziałów wydobywczych zależą od wielu czynników. Do obliczeń przyjęto parametry powietrza zamieszczone w tabeli 1.

TABELA 1

Parametry powietrza wlotowego do oddziału wydobywczego

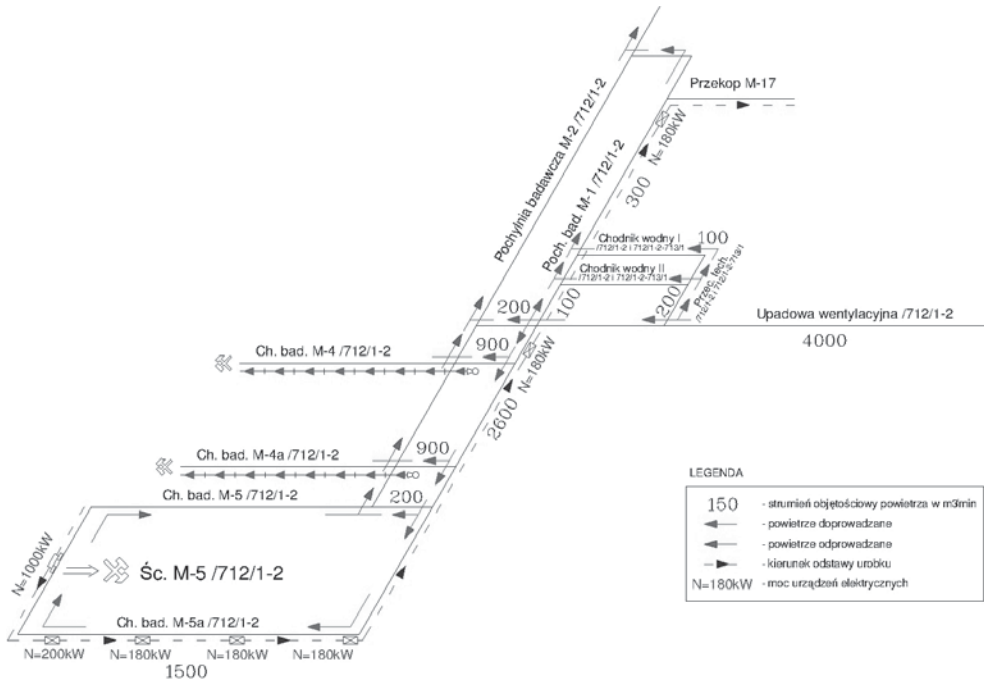
Poziom 800	Temperatura sucha [°C]	Temperatura wilgotna [°C]	Wilgotność właściwa [g/kg _{ps}]	Wilgotność względna [%]
Podszybie szybu	25,0	22,6	14,6	70,0
Wlot do pokładu	25,6	21,0	13,0	76,0

Temperaturę górotworu przyjmowano, opierając się na mapie izolinii zmian temperatury dla danego pokładu, a wyposażenie rejonu ściany w urządzenia energomechaniczne przedstawiono w tabeli 2 oraz na rysunku 9.

TABELA 2

Wyposażenie i moc urządzeń dla rejonu ściany

Wyposażenie oddziału wydobywczego	Moc urządzeń	Moce transformatorów zasilających
kombajn ścianowy + przenośnik zgrzeblowy ścianowy	1000 kW	2x1000 kVA
przenośnik zgrzeblowy przyścianowy	200 kW	–
odstawa oddziałowa: przenośnik taśmowy 1 przenośnik taśmowy 2 przenośnik taśmowy 3	180 kW 180 kW 180 kW	400 kVA 400 kVA 400 kVA



Rys. 9. Rozpływ powietrza oraz wyposażenie i moc urządzeń dla ściany

7. Prognozowanie temperatury w wyrobiskach eksploatacyjnych

W obliczeniach wykorzystano zmodyfikowaną metodę prognozowania temperatury powietrza w wyrobiskach górniczych opracowaną w GIG. W metodzie tej na podstawie uzyskanych wyników z pomiarów dokonano korekty współczynników.

W metodzie uwzględniono występujące w wyrobiskach kopalnianych lokalne (miejscowe) źródła ciepła takie jak:

- urządzenia urabiające, transportujące, a także wentylatory, pompy;
- transportowany węgiel;
- utleniające się odsłonięte powierzchnie skał węglowych;
- woda dopływająca z górotworu do wyrobisk;
- rurociągi transportujące media o temperaturze różnej od temperatury powietrza.

Wykorzystując wcześniej przygotowane dane, wykonano prognozę zagrożenia temperaturowego w wyrobiskach ścianowych. W tabeli 3 przedstawiono arkusz do prognozowania zmian temperatury w wyrobiskach górniczych.

TABELA 3

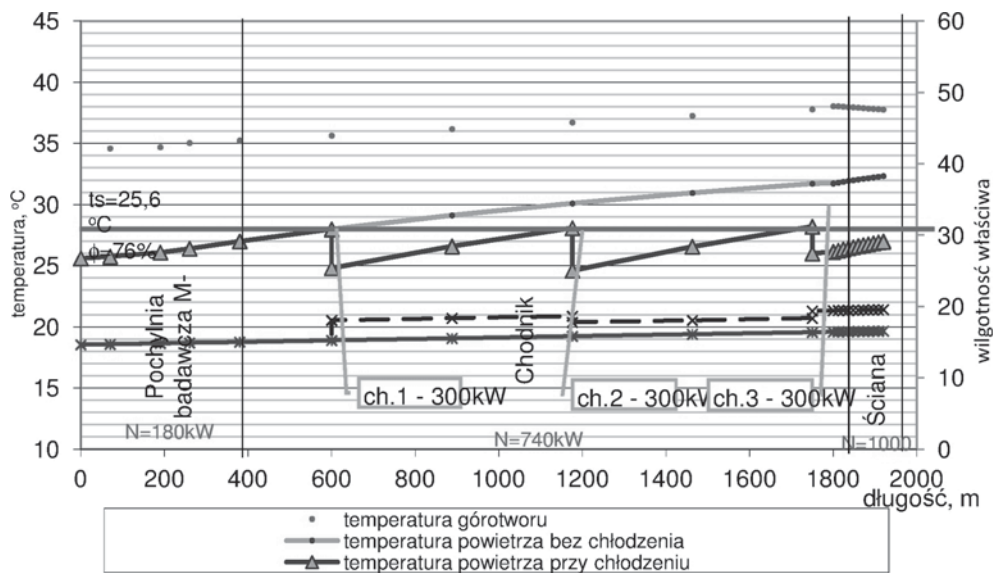
Arkusz do prognozowania zmian temperatury w wyrobiskach

Lp.	Wyszczególnienie	Oznaczenie	Jednostka	Wyrobisko
1	Węzeł (punkt pomiarowy)	–	–	Up. bad. 712/1-2
2	Rodzaj obudowy wyrobiska	–	–	ŁP
3	Pole przekroju poprzecznego	A_w	m ²	12,8
4	Długość wyrobiska	l	m	160
4a	Mięszczość pokładu	m	m	0
5	Część węglowa obwodu wyrobiska	k_w	%/100	0,00
6	Temperatura pierwotna skał	t_{pg}	°C	30,0
7	Temperatura powietrza w przekroju dopływu	t_d	°C	25,0
8	Kąt nachylenia wyrobiska	γ	°	-10,0
9	Kąt nachylenia wyrobiska	γ	rad	-0,174
10	Objętościowy wydatek przepływu powietrza	V	m ³ /s	73,3
11	Prędkość przepływu powietrza	v	m/s	5,7
12	Czas istnienia wyrobiska	τ	m-c	12
13	Czas przewietrzania wyrobiska	τ	s	3,11E+07
14	Moc znamionowa silnika (maszyny)	N	W	0
15	Jednostkowy przyrost stopnia zawilżenia powietrza	K	kg/kg m	1,00E-06
16	Średnica zainstalowanego w wyrobisku rurociągu	D_r	m	0,5
17	Temperatura powierzchni rurociągu	t_r	°C	25,0
18	Długość rurociągu w wyrobisku	l_r	m	160
19	Wydobycie ze ściany	W	Mg/db	0
20	Masa urobku przenoszona taśmociągiem	m_w	kg/s	0
21	Długość taśmociągu w wyrobisku	L	m	160
22	Szacunkowa średnia temperatura wilgotna powietrza	t_n	°C	23,0
23	Gęstość powietrza	ρ	kg/m ³	1,24
24	Pojemność cieplna powietrza	c_p	J/(kg K)	1006
25	Ciepło parowania wody	a'	J/kg	2445000
26	Wielkość empiryczna	b	°C	9,68
27	Liczba bezwymiarowa	Ks	–	0,167
28	Gęstość strumienia ciepła	q_0	W/m ²	7,72
29	Współczynnik	k	–	0,05
30	Współczynnik wyrównania temperatury skał	a	m ³ /s	0,00000105
31	Współczynnik przewodzenia ciepła skał	λ	W/(m K)	2,37

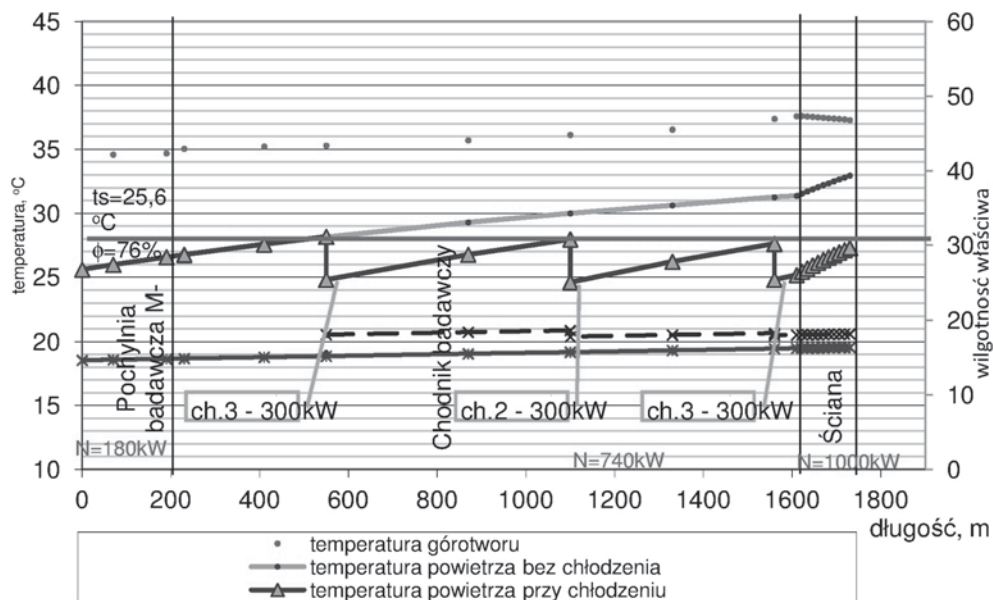
TABELA 3 cd.

Lp.	Wyszczególnienie	Oznaczenie	Jednostka	Wyrobisko
32	Obwód wyrobiska	B	m	14,883
33	Promień równoważny wyrobiska	r_s	m	2,369
34	Masowy wydatek przepływu powietrza	m	kg/s	91,2
35	Prędkość przepływu powietrza	w_d	m/s	5,7
36	Współczynnik wnikania ciepła z poboczniczy wyrobiska	α	W/(m ² K)	20,00
37	Liczba Fouriera	Fo	–	5,82
38	Liczba Biota	Bi	–	19,99
39	Liczba Kirpiczewa	Ks	–	0,50
40	Bezwymiarowa współrzędna odległościowa	x'	–	0,03
41	Bezwymiarowy współczynnik	φ	–	0,01
42	Różnica temperatur (pierwotnej skał i powietrza)	$\Delta\Theta$	°C	5,00
43	Bezwymiarowy współczynnik	Ω	–	0,993
44	Ciepło wydzielone z maszyn i urządzeń	$Q1$	W	0
45	Ciepło z procesu utleniania węgla	$Q2$	W	0
46	Ciepło od wymiany z rurociągiem	$Q3$	W	0
47	Ciepło od transportowanego urobku	$Q4$	W	0
48	Przyrost temperatury z dodatkowych źródeł	dt_z	°C	0,0
49	Bezwymiarowy współczynnik	ϕ	–	0,2
50	Przyrost temperatury ze zmiany stanu skupienia wody	dt_x	°C	–0,4
51	Współczynnik	$A0$	°C	25,0
52	Współczynnik	$A1$	°C	0,1
53	Współczynnik	$A2$	°C	0,0
54	Współczynnik	$A3$	°C	–0,06
55	Całkowity przyrost temperatury	dt	°C	0,0
I	Całkowita długość wyrobisk	L	m	160
II	Stopień zwilżenia powietrza w przekroju dopływu	x_d	kg/kg	0,0131
III	Temperatura sucha powietrza na wylocie	t'_s	°C	25,0

Opierając się na przygotowanych danych, wykonano prognozę zagrożenia temperaturowego w dwóch wyrobiskach ścianowych. Obliczenia zmian temperatury powietrza przedstawiono na rysunkach 10 i 11. Wyniki obliczeń pozwalają na obliczenie niezbędnej mocy chłodniczej urządzenia, które należy zabudować w rejonie ściany aby nie dopuścić do przekroczenia dopuszczalnej temperatury powietrza.



Rys. 10. Zmiany temperatury na drodze dopływu powietrza do ściany X-1 w pokładzie 712/1-2



Rys. 11. Zmiany temperatury na drodze dopływu powietrza do ściany X-2 w pokładzie 712/1-2

8. Podsumowanie

Pomierzone wartości temperatur i wilgotności powietrza w kopalni, w której wykonuje się prognozę zagrożenia temperaturowego, pozwalają na skorygowanie zmian zawilgożenia powietrza i ciepła z dodatkowych źródeł.

Przeprowadzone obliczenia temperatury, do której należy ochłodzić powietrze, aby na wylocie z wyrobiska ścianowego otrzymać dopuszczaną przepisami temperaturę powietrza, pozwoliły na obliczenie mocy chłodniczej urządzeń, które należy zbudować w wyrobiskach górniczych.

Przy określaniu mocy chłodniczej uwzględniono wykraplanie wilgoci z chłodzonego powietrza. Obliczona wartość mocy chłodniczej określa ilość ciepła, którą należy odebrać w rejonie ściany na drodze dopływu powietrza doprowadzanego, aby zapewnić temperaturę powietrza określoną przepisami.

Wykorzystując obliczenia zapotrzebowania na moc chłodniczą, można sporządzić wykresy zmiany mocy chłodniczej w poszczególnych kwartałach każdego roku w rejonie, w którym będzie prowadzona eksploatacja. Dopiero znajomość całkowitego zapotrzebowania mocy chłodniczej umożliwi wybór odpowiedniej metody klimatyzacji wyrobisk rozpatrywanego rejonu.

LITERATURA

- [1] *Kapusta M.*: Ocena skuteczności wybranych metod prognozowania zagrożenia klimatycznego dla ścian o wysokiej koncentracji wydobywania (praca doktorska w realizacji)
- [2] *Szlązak N., Obracaj D., Borowski M.*: Warunki klimatyczne w wyrobiskach górniczych ścianowych przy miejscowym i rozłożonym schładzaniu powietrza. *Górnictwo* (kwartalnik AGH), r. 23, z. 4, 1999
- [3] *Wacławik J., Branny M.*: Próba oszacowania zmian temperatury gazów przepływających przez zroby. *Materiały 3. Szkoły Aerologii Górniczej, Zakopane, 12–15 października 2004*, s. 485–497
- [4] *Wacławik J., Cygankiewicz J., Knechtel J.*: Warunki klimatyczne w kopalniach głębokich. Seria: Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Wyd. PAN CPPGSMiE, Kraków 1995
- [5] Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych w górnictwie węgla kamiennego. Katowice, GIG 2009