Prace Naukowe Instytutu Górnictwa
Nr 123 Politechniki Wrocławskiej Nr 123

Studia i Materiały Nr 34 2010

klimatyzacja kopalń,
urządzenia klimatyzacyjne,
chłodnice powietrza

Franciszek ROSIEK*, Marek SIKORA*,
Jacek URBAŃSKI*, Łukasz WYSOCKI*

WYZNACZANIE ZDOLNOŚCI CHŁODNICZEJ CHŁODNIC POWIETRZA W OPARCIU O POMIARY PARAMETRÓW POWIETRZA I WODY

Wpłynęło 6 kwietnia 2010 r., zaakceptowano 12 kwietnia 2010 r.

Przeanalizowano wpływ wybranych parametrów powietrza i wody na zdolność chłodniczą przeponowych chodnic powietrza. Określono jak błędy pomiaru poszczególnych parametrów wpływają na wartość wyznaczanej zdolności chłodniczej chłodnic powietrza.

1. WPROWADZENIE

Osiągnięcie przez polskie kopalnie rud miedzi głębokości, na których temperatury pierwotne skał przekraczają 40 °C, wymaga zastosowania w szerokim zakresie klimatyzowania powietrza. Dlatego też w jednej z kopalń rudy miedzi wdrożono układ klimatyzacji centralnej. Zastosowany w kopalni rudy miedzi układ klimatyzacji centralnej charakteryzuje się tym, że ziębiarki zlokalizowane na powierzchni wytwarzają „wodę lodową", która sprowadzona na dół kopalni chłodzi powietrze. Do chłodzenia przez wodę lodową powietrza wykorzystuje się przeponowe chłodnice powietrza, zwane dalej chłodnicami powietrza. W kopalni pracuje obecnie kilkadziesiąt chłodnic powietrza. Z uwagi na fakt, po raz pierwszy w kopalni rud miedzi wdrażano tego typu rozwiązania klimatyzacyjne, stosowane są różne rozwiązania techniczne chłodnic powietrza.

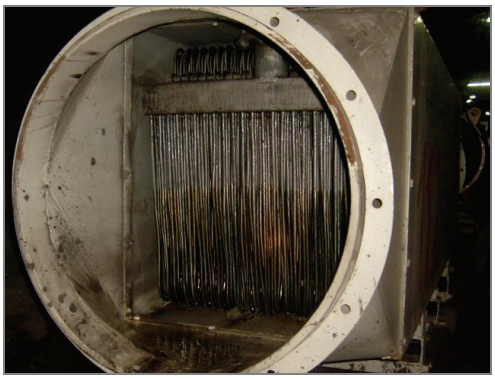
* Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii, Instytut Górnictwa, pl. Teatralny 2, 50-051 Wrocław.

Po uruchomieniu w kopalni rudy miedzi klimatyzacji centralnej stosowano chłodnice powietrza firmy Mostostal Wrocław S.A. Są to chłodnice ożebrowane, o stosunkowo niewielkich gabarytach. Wadą tych chłodnic był duży spadek wydajności związany z przyrostem warstwy zanieczyszczeń, a co za tym idzie, ze zwiększeniem się oporów przepływu powietrza. Wymienniki tych chłodnic wymagały comiesięcznej konserwacji, ponieważ zarastały przestrzenie między żebrami (rys. 1). Wprowadzone w nich zmiany konstrukcyjne, polegające na zwiększeniu odległości między żebrami, nie rozwiązały tych problemów, a jedynie wydłużyły czas między kolejnymi czyszczeniami.

Dalszą wadą tych chłodnic jest mała odporność na chemiczne czyszczenie ich powierzchni i w związku z tym po kilku procesach czyszczenia nie nadają się do dalszej eksploatacji.

Obecnie wprowadza się do eksploatacji chłodnice gładkorurowe. Uzyskanie podobnych wydajności jak w przypadku chłodnic ożebrowanych wymagało zwiększenia gabarytów chłodnic. Zastosowanie gładkich pionowo ułożonych rurek umożliwia grawitacyjny odpływ wykroplonej wody wraz z osiadającymi zanieczyszczeniami. Chłodnice gładkorurowe (rys. 2) w praktyce rzadko wymagają czyszczenia wymienników.

Rys. 1. Fragment zanieczyszczonego wymiennika chłodnicy firmy Mostostal [11]
Fig. 1. Part of polluted Mostostal's heat exchanger [11]



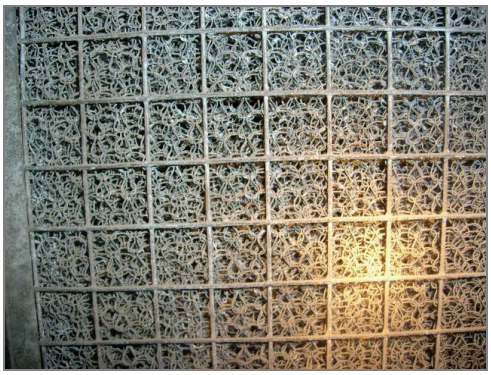
Rys. 2. Wymiennik chłodnicy gładkorurowej [11]
Fig. 2. Smooth-pipe heat exchanger [11]

W kopalni nie stosuje się odkraplaczy, ze względu na dodatkowy opór przepływu powietrza występujący przy ich stosowaniu. W wielu przypadkach wylot z chłodnicy jest zakończony lutnią z wyciętymi na spodzie otworami umożliwiającymi odpływ porwanych cząsteczek wody.

Na wlocie powietrza do wentylatora stosowane są filtry powietrza zbudowane z metalowej siatki (rys. 3).

Wszystkie chłodnice powietrza stosowane w kopalni rudy miedzi działają w połączeniu z wentylatorem WOW1-80/2. Do wentylatorów zawsze podłączony jest tłumik hałasu T-L800/1500. Nominalny wydatek wentylatora WOW1-80/2 jest równy 11,2 m^3/s, natomiast spiętrzenie jest równe 1850 Pa [12]. Przykładowy zestaw chłodniczy, złożony z tłumika, wentylatora i chłodnicy powietrza pokazano na rysunku 4.

Rys. 3a. Filtr powietrza zamontowany na wlocie do wentylatora [11]
Fig. 3a. Air filter mounted at the fan inlet [11]



Rys. 3b. Filtr powietrza w zbliżeniu [11]
Fig. 3b. Air filter in enlargement [11]

Rys. 4. Chłodnica powietrza firmy Mostostal z zainstalowanymi wentylatorami i tłumikiem [11]
Fig. 4. Mostostal's air cooler with fans and the damper installed [11]

W kopalni aktualnie stosowane są chłodnice produkowane przez firmy Mostostal (Mostostal Wrocław S.A.), Eurotech (Eurotech Sp. z o. o. z siedzibą w Mielcu), Arkton (Arkton Chłodnictwo i Klimatyzacja z siedzibą w Lesznie) i Imikius (Imikius – Inżynieria Maszyn Klimatycznych i Urządzeń Specjalnych S.A. z siedzibą firmy w Kaczycach). Chłodnice pracują w układach równoległych obejmujących od 2 do 5 chłodnic.

2. POMIARY RUCHOWE A BILANS CIEPLNY CHŁODNIC POWIETRZA

Efektywność działania klimatyzacji centralnej w dużej mierze zależy od efektywnej pracy jej ostatniego ogniwa, którym są przeponowe chłodnice powietrza [10].

Chcąc właściwie wykorzystać moc chłodniczą wody lodowej należy precyzyjnie przewidzieć jej zużycie przez poszczególne chłodnice powietrza. W tym celu konieczna jest znajomość efektów klimatyzowania powietrza przez poszczególne chłodnice powietrza.

W chłodnicach powietrza różnica temperatur wody przepływającej przez wężownicę i powietrza płynącego przez chłodnicę powoduje przepływ energii z powietrza w kierunku wody, powodując jego ochłodzenie. Ilość tej energii w danym czasie, czyli moc, bilansować można zarówno po stronie wody jak i po stronie powietrza. W stanie ustalonym moc obliczona po stronie wody opisuje zależność

$$Q = \dot{m} \cdot c_w \cdot \left(t_{wy} - t_{wl}\right) \text{ [kW]}, \tag{1}$$

gdzie:

$\dot{m}$ – zmierzony strumień masy wody przepływający przez chłodnicę, m^3/min,

c_w – ciepło właściwe wody, kJ/(kg·K),

t_{wy} – zmierzona temperatura wody na wylocie z chłodnicy, °C,

t_{wl} – zmierzona temperatura wody na wlocie do chłodnicy, °C.

W kopalni wyznaczenia mocy chłodniczej dokonuje się po stronie wody. Czujniki mierzące temperatury wody oraz jej wydatek są na stałe zainstalowane przy rozdzielaczach, z których zasilane są chłodnice powietrza.

Woda lodowa z rozdzielacza do chłodnic powietrza podawana jest za pośrednictwem nieizolowanych elastycznych rurociągów, których długość, zależnie od warunków lokalnych może wynosić do 110 metrów. Duża różnica temperatur między mediami oraz brak izolacji rurociągu powoduje podgrzewanie wody lodowej już przed chłodnicą, co dla ruchu kopalni może nie mieć większego znaczenia, jeśli rurociągi są umieszczone w prądzie powietrza poddawanego procesowi klimatyzacji. Dla potrzeb bilansu ciepła w chłodnicy powietrza temperatury wody powinny być zmierzone bezpośrednio na wlocie i wylocie z chłodnicy. W przypadku pomiarów ruchowych zazwyczaj nie uwzględnia się strat ciepła na rurociągach i przyjmuje, że temperatury wody na wlocie i wylocie chłodnicy są analogiczne jak na rozdzielaczu.

Wyznaczenie mocy chłodniczej po stronie powietrza, głównie z uwagi na wykroplenie wody z powietrza, jest zagadnieniem bardziej skomplikowanym. Moc chłodniczą po stronie powietrza określa zależność

$$Q = \dot{m}_d \cdot \left(h_{we} - h_{wy}\right) \text{ [kW]}, \tag{2}$$

gdzie:

$\dot{m}_d$ – strumień masy powietrza suchego przepływającego przez chłodnicę, m^3/s,

h_{wl} – entalpia powietrza wlotowego do chłodnicy, kJ/(1 + x) kg,

h_{wy} – entalpia powietrza zamglonego na wylocie z chłodnicy, kJ/(1 + x) kg.

Aby określić moc chłodniczą w oparciu o pomiary ruchowe należy wyznaczyć strumień masy powietrza oraz entalpie powietrza na wlocie i wylocie, co wiąże się z pomiarem prędkości wlotowej powietrza do chłodnicy, średnicy przekroju wlotu do chłodnicy, temperatury suchej i wilgotnej powietrza na wlocie i wylocie z chłodnicy oraz ciśnienia atmosferycznego w wyrobisku, w którym znajduje się chłodnica powietrza.

Pomiary niezbędne do obliczenia mocy chłodniczej należy uzupełnić o pomiary temperatury i wilgotności powietrza przed wentylatorem aby zbadać jego wpływ na temperaturę powietrza wlotowego do chłodnicy. W kopalni wszystkie chłodnice powietrza współpracują z wentylatorami typu WOW1-80/2. Wpływ wentylatora na temperaturę powietrza można zbadać wszędzie tam gdzie możliwe jest umieszczenie czujnika pomiarowego między wentylatorem a wymiennikiem chłodnicy powietrza. Jest to możliwe tylko w przypadku połączenia wentylatora i chłodnicy za pomocą lutni. Temperaturę powietrza między wentylatorem a chłodnicą, kiedy pomiar temperatury nie jest możliwy w warunkach ruchowych, przyjmuje się taką jak dla przypadków, w których możliwe było wykonanie stosownych pomiarów.

Wyznaczenie strumienia masy powietrza przepływającego przez chłodnicę wymaga znajomości strumienia objętości powietrza oraz jego gęstości. Strumień objętości można określić z zależności

$$\dot{V}_p = \frac{w_m \cdot \pi \cdot D^2}{4} \text{ [m}^3\text{/s]}, \tag{3}$$

gdzie:

w_m – zmierzona prędkość średnia powietrza, m/s,

D – zmierzona średnica wlotu do chłodnicy, m.

Strumień objętości powietrza można także odczytać wprost z charakterystyki wentylatorów po wcześniejszym zmierzeniu ich spiętrzenia za pomocą U-rurki. Można ten sposób wykorzystać do zgrubnej weryfikacji poprawności wyznaczenia z pomiarów strumienia objętości powietrza przepływającego przez chłodnicę.

Dla wyznaczenia gęstości powietrza na wlocie i wylocie chłodnicy konieczne jest wykonanie pomiarów temperatur powietrza termometrami suchym i wilgotnym lub temperatury termometrem suchym i wilgotności powietrza oraz ciśnienia powietrza.

Strumień masy powietrza wilgotnego wyznacza się z zależności

$$\dot{m} = \dot{V}_p \cdot \rho = w_m \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \rho \ \text{[kg/s]}. \tag{4}$$

Natomiast strumień masy powietrza suchego oblicza się z zależności

$$\dot{m}_d = \frac{\dot{m}}{1+x} \ \text{[kg/s]}. \tag{5}$$

Entalpię powietrza wlotowego można wyznaczyć z zależności

$$h_{we} = 1{,}005 \cdot t_{swl} + (2500 + 1{,}86 \cdot t_{swl}) \cdot x_{wl} \ \text{[kJ/(1 + x) kg]}, \tag{6}$$

gdzie:

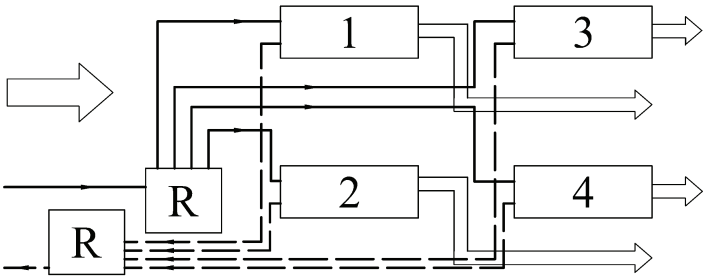
t_{swl} – temperatura zmierzona termometrem suchym na wlocie do chłodnicy, °C,

x_{wl} – stopień zawilżenia powietrza na wlocie do chłodnicy, kg/kg.

Jeżeli podczas przepływu powietrza przez chłodnicę nie nastąpi wykroplenie wody z powietrza entalpię powietrza na wylocie oblicza się z tej samej zależności. W przypadku gdy wykroplenie nastąpi entalpia powietrza zamglonego na wylocie opisana jest zależnością

$$h_{wy} = 1{,}005 \cdot t_{swy} + (2500 + 1{,}86 \cdot t_{swy}) \cdot x_{wy} + 4{,}19 \cdot (x_{wl} - x_{wy}) \cdot t_{swy}. \tag{7}$$

Określanie mocy chłodniczej po stronie powietrza wg wzorów (2) do (7) wymaga wykonania dokładnych pomiarów, co w warunkach ruchowych jest bardzo trudne.



Rys. 5. Schemat rozmieszczenia chłodnic powietrza na wlocie do oddziału [11], gdzie:
R – rozdzielacz, 1 – chłodnica firmy Arkton, 2 – chłodnica firmy Eurotech,
3, 4 – chłodnice firmy Eurotech (zmodernizowane)
Fig. 5. Location scheme of air coolers in the district [11], where:
R – divider, 1 – Arkton's cooler, 2 – Eurotech's cooler (old type)
3, 4 – Eurotech's coolers (upgraded)

Nawet taki prosty pomiar jak pomiar temperatur suchej i wilgotnej powietrza w przekroju wlotowym chłodnicy może być obarczony znacznym błędem wynikającym z zespołowej pracy chłodnic (rys. 5), szczególnie dla chłodnic 3 i 4, pracujących

w drugim rzędzie. Także pomiar temperatur powietrza na wylocie z chłodnicy sprawia problem, z uwagi, że często rezygnuje się ze stosowania odkraplacza i pomiar trzeba dokonywać w pewnej odległości za wylotem z chłodnicy.

Pomiaru prędkości powietrza przepływającego przez chłodnicę wykonuje się zazwyczaj w przekroju wlotu do wentylatora. Pomiary te mogą być obarczone błędem, ponieważ w miejscu pomiaru następuje znaczne przyspieszenie strug powietrza, wywołujące nierównomierny jego przepływ przez przekrój, przez co łatwo wypatrzyć wynik pomiaru. Ponadto na wlocie do chłodnicy często umieszcza się filtr powietrza, który dodatkowo utrudnia pomiar prędkości powietrza. Pomiar ten nie uwzględnia także ewentualnych strat powietrza wynikających z łączenia wentylatorów z chłodnicą za pomocą lutni. Pomiar prędkości powietrza na wypływie z chłodnicy często może być obarczony jeszcze większym błędem, z uwagi na nieszczelności na połączeniu chłodnicy z lutniociągiem elastycznym.

Tabela 1. Wyniki pomiarów parametrów pracy chłodnicy firmy Eurotech [11]
Table 1. Measurements results of work parameters of Eurotech's air cooler [11]

Parametr	Symb.	Jedn.	Bez filtra			Z filtrem		
			1	2	3	1	2	3
Temperatura wody na wlocie	t_{we}	°C	3,9	3,9	3,9	4,1	4,1	4,1
Temperatura wody na wylocie	t_{wy}	°C	16,2	13,8	12,3	15,9	13,6	12,3
Wydatek wody	m_w	m^3/h	10,1	14,3	17,7	10,1	13,9	17,7
Temperatura sucha powietrza na wlocie do wentylatora	t_{1s}	°C	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	29
Temperatura wilgotna powietrza na wlocie do wentylatora	t_{1w}	°C	19,5	19,3	19,4	20,2	20,2	19,4
Temperatura sucha powietrza na wlocie do chłodnicy	t_{2s}	°C	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,2
Temperatura wilgotna powietrza na wlocie do chłodnicy	t_{2w}	°C	22,1	21,9	22,0	22,9	22,9	22,0
Temperatura sucha powietrza na wylocie z chłodnicy	t_{3s}	°C	15,3	13,9	13,2	16,6	15,2	13,0
Temperatura wilgotna powietrza na wylocie z chłodnicy	t_{3w}	°C	13,5	12,1	11,8	13,8	13,1	11,1
Średnia prędkość powietrza na wlocie do wentylatora	w_m	m/s	13,78	13,78	13,78	12,38	12,38	12,38
Ciśnienie atmosferyczne	p	hPa	1123,9	1123,9	1123,9	1103,0	1103,0	1124,0
Wynki obliczeń								
Moc chłodnicza po stronie wody	Q_w	kW	144,6	164,8	173,0	138,7	153,7	168,9
Moc chłodnicza po stronie powietrza	Q_p	kW	190,3	219,7	231,2	183,4	200,1	222,7

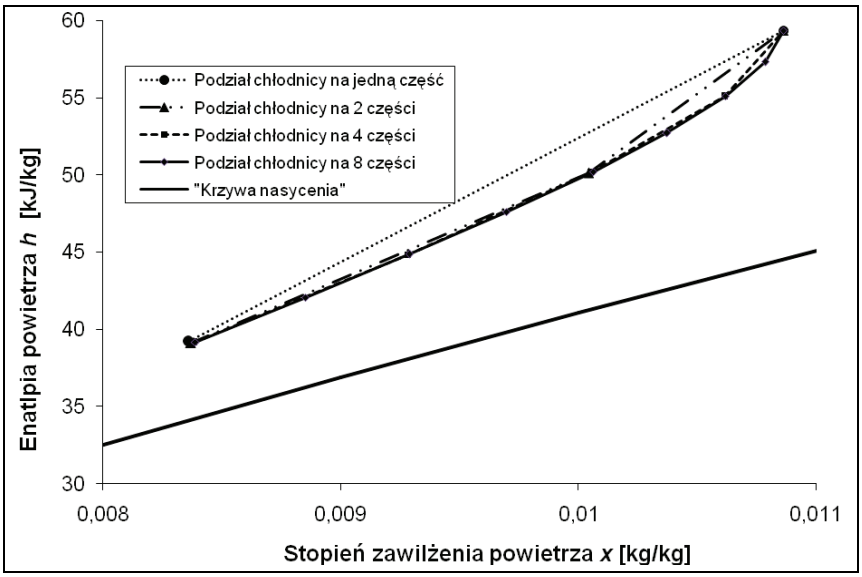
W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów i obliczeń bilansu po stronie powietrza i wody dla wybranych chłodnic firmy Eurotech z rurkami o przekroju kołowym.

Chcąc zminimalizować błędy popełniane w trakcie ruchowych pomiarów wykorzystywanych do wyznaczania bilansu cieplnego chłodnic powietrza, szczególnie przy pomiarach parametrów powietrza, w ramach niniejszej pracy przeprowadzono obliczenia mające na celu wykazać, przy pomiarze jakich parametrów należy dochować szczególnej staranności, a przy których nie ma to takiego znaczenia, bo ich wpływ na wyznaczenie zdolności chłodniczej chłodnic powietrza jest stosunkowo mały.

3. WYZNACZANIE PARAMETRÓW PRACY CHŁODNIC POWIETRZA

Tematyce obliczania przeponowych chłodnic powietrza w ostatnich latach w Polsce poświęcono wiele publikacji. Większość z nich [1–8] dotyczy badań teoretycznych, weryfikowanych przeważnie w oparciu o pomiary przeponowej wodnej chłodnicy GCCP-115.

Chcąc określić zależności między parametrami chłodnic stosowanych w O/ZG „Rudna" wykorzystano rozważania zamieszczone w pracach [8, 9]. Obliczenia parametrów powietrza oraz wody dokonano w oparciu o przybliżoną metodę graficzną, przedstawioną w pracy [8]. Dla potrzeb tej pracy sporządzono program obliczeniowy, który wykorzystując założenia tej metody, w sposób analityczny wyznacza parametry wylotowe chłodnicy powietrza.



Rys. 6. Zmiany wilgotności właściwej i entalpii dla chłodnicy przeponowej przy przeciwprądowym przepływie powietrza
Fig. 6. Specific humidity and enthalpy changes of a diaphragmatic air cooler with countercurrent air flow

W tej metodzie również zakłada się, że część strumienia przepływa przez chłodnicę w stanie niezmienionym, natomiast część kontaktuje się z powierzchnią wymiennika i obniża swoją temperaturę i ewentualnie wykrapla się z niego wilgoć.

Tabela 2. Wyniki obliczeń parametrów pracy chłodnicy firmy Eurotech
Table 2. Calculation results of work parameters of the Eurotech's air cooler

Parametry powietrza i wody na dopływie chłodnicy			
Temperatura sucha powietrza wlotowego	t_{ps}	°C	31,4
Temperatura wilgotna powietrza wlotowego	t_{pw}	°C	21,9
Strumień powietrza	V	m^3/s	8,0
Temperatura wody na wlocie	t_{wwl}	°C	3,90
Strumień masy wody	m_w	kg/s	3,972
Ciśnienie atmosferyczne	p	Pa	112389,9
Parametry geometryczne chłodnicy powietrza			
Długość chłodnicy	L	m	2,88
Liczba rzędów rurek (po długości)	n_{rz}	–	128
Szerokość baterii chłodnicy	s_b	m	0,81
Wysokość baterii chłodnicy	h_b	m	0,89
Powierzchnia czynnego przekroju chłodnicy	F_{ch}	m^2	0,4024
Powierzchnia zewnętrzna rurek + ew. ożebrowania	F_z	m^2	121,81
Średnica wewnętrzna rurek	d_w	m	0,0096
Liczba rurek w rzędzie (po szerokości)	n_r	–	24
Zewnętrzna średnica rurek	d_z	m	0,0126
Parametry dodatkowe			
Lepkość kinematyczna powietrza	ν	m^2/s	0,000016
Współczynnik przewodzenia ciepła (stal)	λ_{st}	W/(mK)	40
Liczba Prandtla dla (t = 30 °C)	Pr	–	0,701
Współczynnik przewodzenia ciepła	λ_p	W(mK)	0,0265
Gęstość wody	ς_w	kg/m^3	1000
Ciepło właściwe wody	c_c	J/(kgK)	4190
Wyniki obliczeń			
Temperatura powietrza na wylocie z chłodnicy	t_{spwy}	°C	17,82
Wilgotność właściwa powietrza na wylocie	x_{wy}	kg/kg	0,0084
Temperatura wody zimnej za chłodnicą	t_{wwy}	°C	16,6
Moc chłodnicza	Q	kW	211,4

Metoda graficzna bazuje na wykresie entalpia – stopień zawilżenia. Zgodnie z rysunkiem 6 stan powietrza na wylocie znajduje się na odcinku wytyczonym przez stan powietrza wejściowego i stan powietrza przy powierzchni przepony. Wykres ten przedstawia stan powietrza w przypadku, gdy przyjmuje się stałą temperaturę całej przepony.

W rzeczywistości temperatura przepony zmienia się w szerokim zakresie. W chłodnicy przeciwprądowej najwyższa temperatura wody jest na wlocie powietrza. Aby uzyskać charakterystykę przemiany powietrza w chłodnicy zbliżoną do rzeczywistej należy podzielić chłodnicę na części.

Dla każdej z części przyjmuje się stałą wartość temperatury przepony. Należy także obliczyć dla każdej z tych części współczynnik bocznikowania. Znając temperaturę powietrza na wlocie do danego elementu, średnią temperaturę przepony oraz współczynnik bocznikowania na charakterystyce można wykreślić stan powietrza na wylocie tego elementu, a następnie obliczyć moc chłodniczą przemiany a także temperaturę wody na dopływie. Przykład otrzymanej w ten sposób charakterystyki zaprezentowano na rysunku 6.

Metoda ta dzieli chłodnicę na określoną liczbę szeregowo połączonych chłodnic, w których parametry wejściowe mediów jednej chłodnicy zależą od parametrów wyjściowych mediów drugiej chłodnicy. Charakterystyka rzeczywista przemian stanu powietrza w chłodnicach przeciwprądowych ma kształt wypukły.

Zgodnie z powyższą metodą przeprowadzono obliczenia parametrów wylotowych powietrza i wody dla chłodnicy powietrza firmy Eurotech. Ich wyniki zestawiono w tabeli 2.

Porównując wyznaczoną z obliczeń zdolność chłodniczą chłodnicy firmy Eurotech z wynikami uzyskanymi z pomiarów ruchowych i stosownych przeliczeń widać, że moc chłodnicza po stronie powietrza jest porównywalna (211,4 kW z obliczeń i 219,7 kW z pomiarów (tabela 1, kolumna nr 2 bez filtra), natomiast po stronie wody z pomiarów otrzymano moc chłodniczą równą tylko 164,8 kW, co świadczyć może o złych wskazaniach czujników na rozdzielaczu i to tym bardziej, że nie uwzględniono strat mocy chłodniczej na wężach łączących chłodnicę z rozdzielaczem.

4. WPŁYW WYBRANYCH PARAMETRÓW NA ZDOLNOŚĆ CHŁODNICZĄ CHŁODNIC POWIETRZA

Dla stwierdzenia jak błędy popełniane w trakcie pomiarów ruchowych wpływają na wyznaczaną moc chłodniczą chłodnic powietrza wykonano stosowne obliczenia programem przedstawionym w punkcie 3. W trakcie tych obliczeń, dla przykładowej chłodnicy firmy Eurotech, której dane zamieszczono w tabeli 2, dokonywano zmian parametrów geometrycznych chłodnicy oraz parametrów doprowadzanego powietrza i wody. Zmian parametrów dokonywano w zakresie błędów wynikających ze stosowanych do pomiaru przyrządów i metod pomiarowych.

Tabela 3a. Zmiana mocy chłodniczej przy zmianie parametrów geometrycznych chłodnic
Table 3a. Cooling power changes resulting from changes of geometrical parameters of air coolers

Parametr	bez zmian	d_w		d_z		F_{ch}		F_z		L	
		–0,1 mm	+0,1 mm	–0,1 mm	+0,1 mm	–5 %	+5 %	–5 m^2	+5 m^2	–0,1 m	+0,1 m
Temperatura powietrza na wylocie z chłodnicy, °C	17,8	17,8	17,8	17,9	17,7	17,6	18,0	18,1	17,6	17,9	17,8
Wilgotność właściwa powietrza na wylocie, kg/kg	8,4 $*10^{-3}$	8,4 $*10^{-3}$	8,4 $*10^{-3}$	8,4 $*10^{-3}$	8,4 $*10^{-3}$	8,4 $*10^{-3}$	8,4 $*10^{-3}$	8,4 $*10^{-3}$	8,4 $*10^{-3}$	8,4 $*10^{-3}$	8,4 $*10^{-3}$
Temperatura wody zimnej za chłodnicą, °C	16,6	16,6	16,6	16,5	16,7	16,8	16,4	16,4	16,8	16,6	16,6
Moc chłodnicza, kW	211,4	211,4	211,4	210,2	212,6	214,5	208,5	207,5	215,1	210,9	211,9
Błąd względny średni, %	0	0		0,57		1,41		1,78		0,25	

Tabela 3b. Zmiana mocy chłodniczej przy zmianie parametrów wlotowych powietrza i wody
Table 3b. Cooling power changes resulting from changes of inlet air and water parameters

Parametr	bez zmian	V		t_{pswl}		t_{pwwl}		m_w		t_{wwl}	
		–10 %	+10 %	–1 °C	+1 °C	–1 °C	+1 °C	–5 m^2	+5 m^2	–1 °C	+1 °C
Temperatura powietrza na wylocie z chłodnicy, °C	17,8	17,2	18,4	17,5	18,2	17,6	18,1	18,2	17,5	17,4	18,3
Wilgotność właściwa powietrza na wylocie, kg/kg	8,4 $*10^{-3}$	8,2 $*10^{-3}$	8,6 $*10^{-3}$	8,6 $*10^{-3}$	8,2 $*10^{-3}$	7,8 $*10^{-3}$	9,1 $*10^{-3}$	8,6 $*10^{-3}$	8,2 $*10^{-3}$	8,2 $*10^{-3}$	8,6 $*10^{-3}$
Temperatura wody zimnej za chłodnicą, °C	16,6	16,0	17,2	16,6	16,6	15,7	17,5	17,42	15,9	16,2	17,0
Moc chłodnicza, kW	211,4	200,9	220,7	211,7	211,2	196,3	226,9	202,6	218,7	221,8	200,9
Błąd względny średni, %	0	4,70		0,11		7,24		3,82		4,95	

Analizie poddano zmianę:

- parametrów dotyczących geometrii chłodnic
  – średnica wewnętrzna rurek d_w,
  – średnica zewnętrzna rurek d_z,
  – powierzchnia przekroju czynnego F_{ch},

– powierzchnia zewnętrzna rurek F_z,
– długość chłodnicy L,

- parametrów dotyczących dopływającego do chłodnicy powietrza
  – strumień objętości powietrza V,
  – temperatura sucha powietrza t_{pswl},
  – temperatura wilgotna powietrza t_{pwwl},
- parametrów dotyczących dopływającej do chłodnicy wody
  – strumień masy wody m_w,
  – temperatura wody t_{wwl}.

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 3.

W tabeli 3 zamieszczono wyniki obliczeń parametrów wylotowych powietrza i wody oraz mocy chłodniczej chłodnic powietrza, uzyskane przy zmianie wybranych parametrów wejściowych. Analizie poddano zmiany mocy chłodniczej.

Wyznaczone błędy pokazują, że w trakcie pomiarów ruchowych szczególną uwagę należy zwrócić na pomiary temperatury wilgotnej powietrza, temperatury wody oraz wydatków wody i powietrza. Pomiar pozostałych parametrów nie wpływa znacząco na wyznaczaną moc chłodniczą chłodnic powietrza.

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono problemy przy wyznaczaniu z pomiarów ruchowych prowadzanych w kopalni mocy chłodniczej chłodnic powietrza. Wykazano, że największy wpływ na otrzymywaną moc chłodniczą mają błędy popełniane w trakcie pomiarów temperatury wilgotnej powietrza, temperatury wody i wydatków powietrza i wody. Pomiar innych parametrów jest mniej istotny dla końcowej wartości mocy chłodnic powietrza.

Dokładne pomiary parametrów wody w warunkach ruchowych są możliwe jedynie w przypadku instalacji na każdej chłodnicy atestowanych czujników temperatur wlotowej i wylotowej oraz wydatku wody.

W przypadku pomiarów parametrów powietrza problemy stwarza stosowanie filtrów na wlocie i brak odkraplaczy na wylocie. Dla oszacowania wpływu pracy wentylatora konieczne byłoby zainstalowanie stosownego czujnika temperatury między wentylatorem a chłodnicą.

LITERATURA

[1] FRYCZ A., DOMAGAŁA L., *Efekty energetyczne chłodnic powietrza GCCP–115N i ich rzeczywista charakterystyka badana w warunkach dołowych*, Wiadomości górnicze, 1990, nr 2–3.
[2] WACŁAWIK J., CYGANKIEWICZ J., KNECHTEL J., *Warunki klimatyczne w kopalniach głębokich*, Poradnik, PAN, Kraków, 1995.
[3] WACŁAWIK J., CYGANKIEWICZ J., KNEHTEL J., *Bilans cieplny przeponowych chłodnic powietrza*, Mat. Konf. Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Szczyrk, 2002.

[4] WACŁAWIK J., CYGANKIEWICZ J., KNEHTEL J., *Chłodnice przeponowe powietrza i wody w układach klimatyzacji kopalń o małej mocy*, Międzynarodowa konf. na temat: Najnowsze osiągnięcia w zakresie przewietrzania kopalń oraz zwalczania zagrożeń pożarowych, gazowych i klimatycznych, GIG, Szczyrk, 1999.
[5] FILEK K., HOLESZ K., NOWAK B., ROSZKOWSKI J., *Chłodzenie powietrza górniczą chłodnicą przeponową z kondensacją pary wodnej*, Archives of Mining Sciences, 1999, Vol. 44, issue 1.
[6] FILEK K., NOWAK B., ROSZKOWSKI J., *Przybliżona metoda obliczania parametrów termodynamicznych czynnika chłodzonego i chłodzącego w przeciwprądowej chłodnicy powietrza*, Międzynarodowa Konf. na temat: Najnowsze osiągnięcia w zakresie przewietrzania kopalń oraz zwalczania zagrożeń pożarowych, gazowych i klimatycznych, Materiały konferencyjne, GIG, Katowice, 1999.
[7] WACŁAWIK J., CYGANKIEWICZ J., KNECHTEL J., *Wymiana ciepła i masy (wilgoci) w górniczych urządzeniach klimatyzacyjnych*, Szkoła Aerologii Górniczej, Zakopane, 2002.
[8] WACŁAWIK J., MIKOŁAJCZYK W., BRANNY M., *O wydajności cieplnej górniczych chłodnic powietrza*, Zeszyty Naukowe Polit. Śląskiej, Seria Górnictwo, z. 205, Gliwice, 1992.
[9] JONES W., *Klimatyzacja*, Arkady, Warszawa, 1981.
[10] ROSIEK F., SIKORA M., URBAŃSKI J., WYSOCKI Ł., *Analiza pracy przeponowych chłodnic powietrza w warunkach kopalń LGOM*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Polit. Wrocławskiej. Seria: Studia i Materiały nr 36, Górnictwo i geologia XII, Wrocław, 2009.
[11] WYSOCKI Ł., *Analiza metod obliczeniowych przeponowych chłodnic powietrza i ich weryfikacja w warunkach KGHM „Polska Miedź SA" O/ZG „Rudna*", Praca dyplomowa, Polit. Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Wrocław, 2009.
[12] Instrukcja obsługi i konserwacji wentylatorów osiowych typu WOO-25÷40, WOW2-80 oraz lutniowych WOO-63/63S, WOW1-80/2, Gdańsk 2009.

DETERMINATION OF REFRIGERATION CAPACITY OF AIR COOLERS BASED ON MEASUREMENTS OF AIR AND WATER PARAMETERS

The influence of selected air and water parameters on refrigeration capacity of the diaphragmatic air coolers has been analyzed. Effect of measurement errors in selected parameters on the value of refrigeration air coolers capacity has been determined.