

*Krzysztof Filek\**, *Waldemar Franczuk\*\**, *Piotr Łuska\*\*\**, *Bernard Nowak\**,  
*Janusz Roszkowski\**

## CHŁODZENIE POWIETRZA MAŁOGABARYTOWYMI WODNYMI CHŁODNICAMI ŚCIANOWYMI

---

### 1. Wprowadzenie

W wyrobiskach ścianowych podziemnych kopalń węgla występują często niekorzystne warunki klimatyczne. Na głębokich poziomach wysoka temperatura pierwotna górotworu i wysoki stopień koncentracji wydobywania sprawiają, że nawet przy intensywnej wentylacji nie udaje się niekiedy utrzymać temperatury powietrza na całej długości ścian w dopuszczalnych granicach. Wynikiem tego są gorsze warunki pracy górników i gorsze efekty ekonomiczne kopalń, związane ze skracaniem czasu pracy.

Zagrożenie cieplne w wyrobiskach ścianowych zwalcza się w takich przypadkach metodą schładzania powietrza, które najczęściej przeprowadza się z wykorzystaniem przeponowych chłodnic o bezpośrednim lub pośrednim działaniu. Skoncentrowanie dużej mocy chłodniczej w jednym miejscu (zwykle w prądzie powietrza świeżego przed wlotem do ściany) nie jest korzystne, gdyż znaczne obniżenie temperatury powietrza zwiększa wydajność istniejących w wyrobisku źródeł ciepła (górotwór, maszyny) i może być szkodliwe dla zdrowia górników. Dobre efekty, również w postaci mniejszej wymaganej mocy chłodniczej, daje zastosowanie kilku niedużych chłodnic rozmieszczonych wzdłuż ściany w pewnych odstępach od siebie.

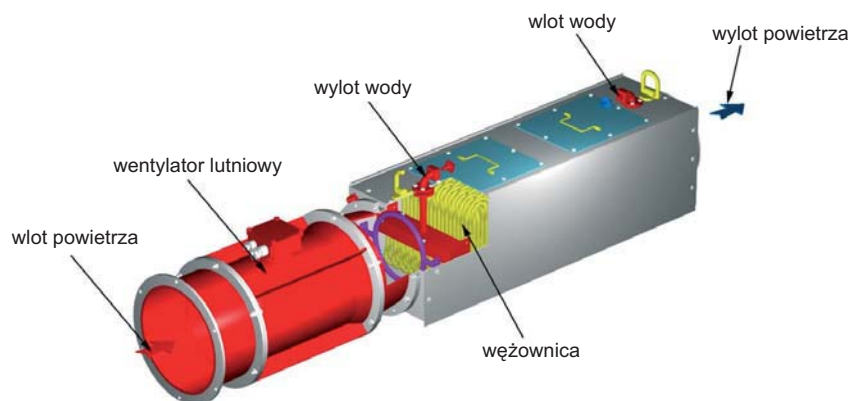
Artykuł niniejszy dotyczy chłodzenia powietrza takim właśnie systemem, złożonym z czterech małogabarytowych wodnych przeponowych chłodnic typu SCP-40. Przedstawiono wyniki pomiarów parametrów wymieniających ciepło mediów (chłodzonego powietrza i wody chłodzącej), wykonanych w ścianie 3J w pokładzie 502 KWK „Śląsk”; zamieszczono też rezultaty obliczeń wylotowych parametrów mediów i porównano je z wartościami uzyskanymi z eksperymentów.

---

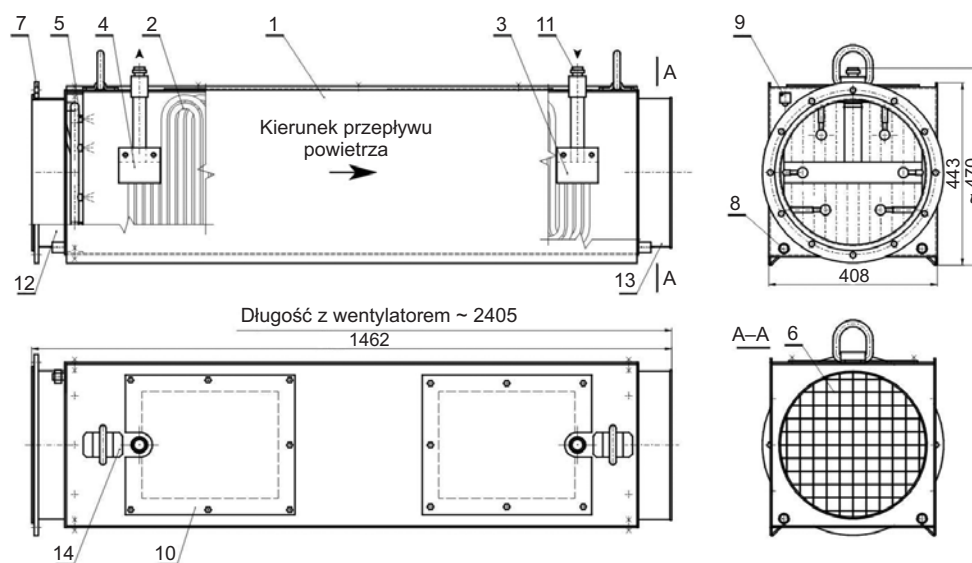
\* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków  
\*\* KWK „Śląsk”, Ruda Śląska  
\*\*\* Termospec” sp. z o.o. Żory

## 2. Opis eksperymentów

Ścianową chłodnicę powietrza SCP-40 (rys. 1 i 2) stanowi przepływowy przeciwprądowy wymiennik ciepła, zbudowany z pakietu węzownicowo wygiętych miedzianych rurek z zimną wodą, omywanych z zewnątrz przez chłodzone powietrze. Jego przepływ wymusza zamocowany do stalowej obudowy wymiennika wentylator lutniowy WLE-303A/1.

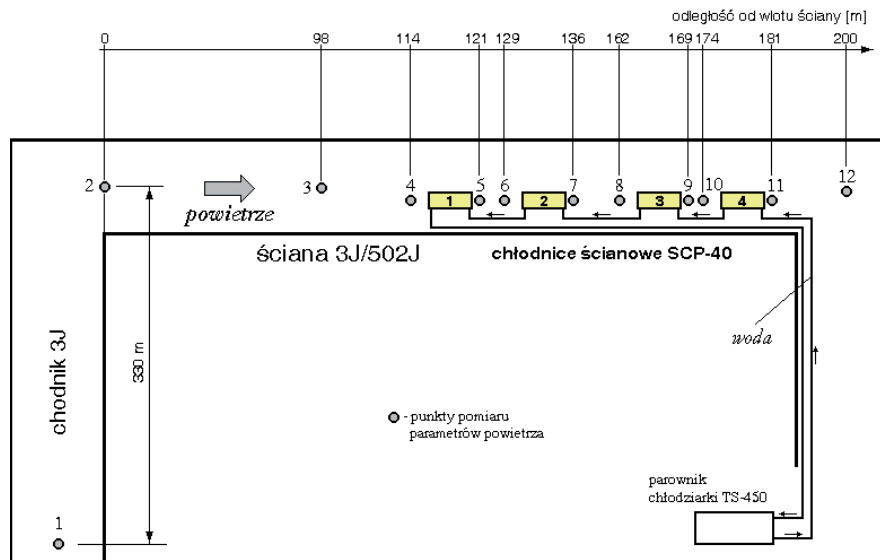


Rys. 1. Widok chłodnicy ścianowej SCP-40; usunięto górną część obudowy

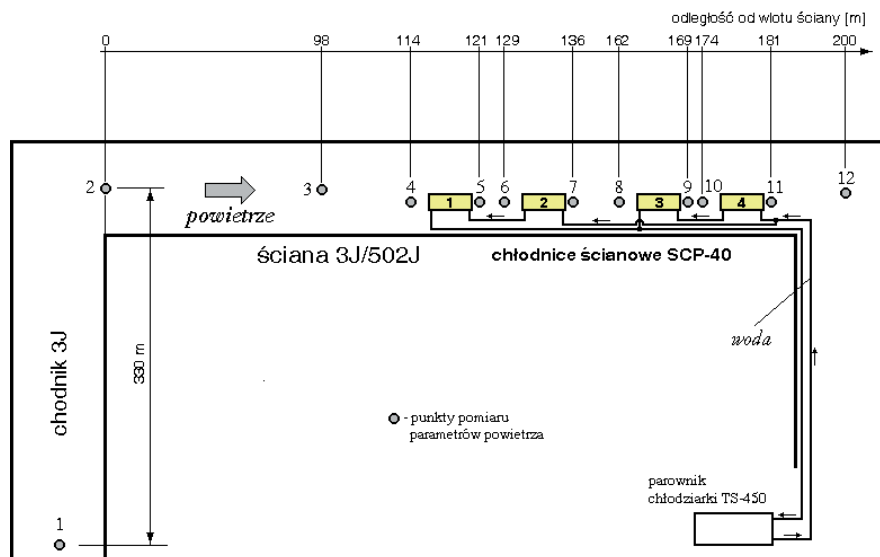


Rys. 2. Schemat budowy chłodnicy ścianowej SCP-40: 1 – obudowa chłodnicy, 2 – zespół węzownic, 3 – kolektor wlotowy wody, 4 – kolektor wylotowy wody, 5 – zespół dysz zraszających, 6 – kratka zabezpieczająca, 7 – kołnierz do montażu wentylatora, 8 – odpływ skroplin, 9 – przyłącze wody zraszacza, 10 – pokrywa rewizyjna górna, 11 – przyłącze wody chłodzącej, 12 – pokrywa czołowa, 13 – pokrywa tylna, 14 – zaczep transportowy

Zbadano dwa systemy chłodzenia powietrza różniące się sposobem doprowadzenia wody do chłodziw ścianowych. Schematy tych dwóch wariantów instalacji chłodniczej pokazano na rysunkach 3 (wariant A) i 4 (wariant B).



Rys. 3. Schemat wykorzystującego małogabarytowe chłodziwice ścienne układu chłodzenia powietrza (wariant A) w ścianie 3J w pokładzie 502 KWK „Śląsk”



Rys. 4. Schemat wykorzystującego małogabarytowe chłodziwice ścienne układu chłodzenia powietrza (wariant B) w ścianie 3J w pokładzie 502 KWK „Śląsk”

W wariantcie A chłodnice ściane połączone były szeregowo – płynąca z parownika chłodziarki TS-450 zimna woda przepływała kolejno przez chłodnice nr 4, 3, 2 i 1, przejmując ciepło od powietrza i stopniowo się ogrzewając, a następnie ogrzana powracała do parownika, gdzie była schładzana i powracała do obiegu. Natomiast w wariantcie B chłodnice ściane połączone były szeregowo po dwie, przy czym obie pary chłodziarek połączone były równolegle – płynąca z parownika zimna woda rozdzielała się i wpływała do chłodziarek nr 4 i nr 2, a następnie z chłodziarki nr 4 do chłodziarki nr 3, a z chłodziarki nr 2 do chłodziarki nr 1, po czym ogrzana woda wypływająca z chłodziarek o numerach nieparzystych wspólnym przewodem wracała do parownika. W obydwóch wariantach usytuowanie chłodziarek ścianowych w wyrobisku było identyczne – chłodzone powietrze przepływało przez chłodnice w kolejności od nr 1 poprzez nr 2 i nr 3 do nr 4.

W układzie B, na skutek mniejszego oporu przepływu (chłodnice w dwóch równoległych gałęziach), uzyskano nieco większy sumaryczny wydatek wody chłodzącej; w układzie A przez wszystkie chłodnice płynęła woda z wydatkiem 2,5 kg/s, zaś w układzie B – z wydatkiem 3,0 kg/s (w układzie tym wydatek wody w każdej chłodziarce ścianej wynosił 1,5 kg/s). Dodać tu należy, że o ile w wymianie ciepła w chłodziarach ścianowych brała udział cała schładzana w parowniku chłodziarki TS-450 woda, to uczestniczyła w tej wymianie jedynie część płynącego wyrobiskiem ścianowym powietrza – końcowy rezultat chłodzenia powietrza daną chłodziarką był efektem mieszania się w wyrobisku strugi powietrza wypływającej z chłodziarki i strugi powietrza omijającej ją.

Badane układy chłodzenia powietrza obejmowały:

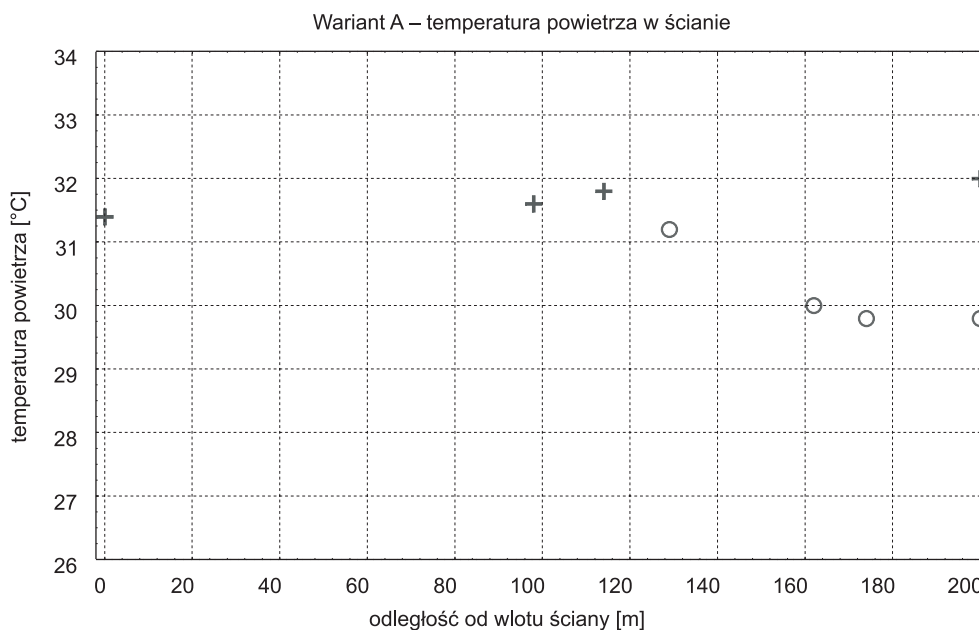
- parownik chłodziarki sprężarkowej typu TS-450, w którym chłodzona była woda przeznaczona do zasilania małogabarytowych chłodziarek ścianowych typu SCP-450;
- cztery chłodnice ściane SCP-40 wraz z wentylatorami lutniowymi typu WLE-303A/1;
- izolowany zasilający przewód wodny transportujący zimną wodę z parownika chłodziarki TS-450 do chłodziarek ścianowych;
- nieizolowany powrotny przewód wodny transportujący ogrzaną wodę z chłodziarek ścianowych do parownika chłodziarki TS-450;
- przewody wodne łączące poszczególne chłodnice ściane;
- armaturę (złącza przewodów wodnych, zawory wody itp.).

W ramach przeprowadzonych badań mierzone były następujące wielkości:

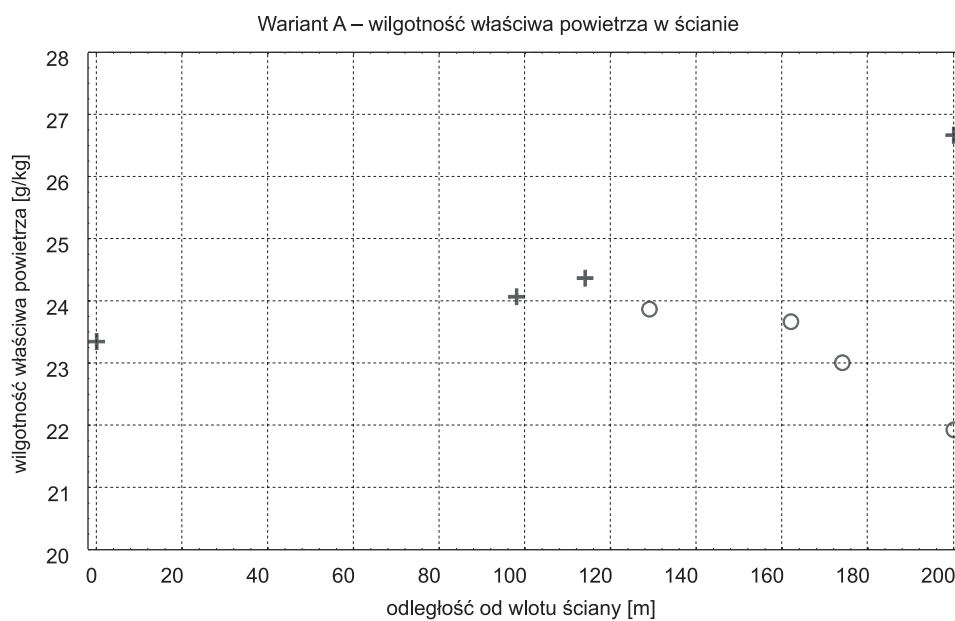
- bezwzględne ciśnienie powietrza w wyrobisku,
- wydatek przepływu powietrza w wyrobisku,
- wydatek przepływu powietrza w każdej chłodziarce ścianej SCP-40,
- temperatura powietrza w wyrobisku (pomiar termometrem suchym),
- temperatura powietrza w wyrobisku (pomiar termometrem wilgotnym),
- temperatura powietrza na wlocie wentylatora każdej chłodziarki SCP-40 (pomiar termometrem suchym),
- temperatura powietrza na wlocie wentylatora każdej chłodziarki SCP-40 (pomiar termometrem wilgotnym),
- temperatura powietrza na wylocie wentylatora każdej chłodziarki SCP-40 (pomiar termometrem suchym),
- temperatura powietrza na wylocie każdej chłodziarki SCP-40 (pomiar termometrem suchym),

- temperatura powietrza na wylocie każdej chłodnicy SCP-40 (pomiar termometrem wilgotnym),
- wydatek przepływu wody chłodzącej,
- temperatura wody na wylocie parownika chłodziarki TS-450,
- temperatura wody na wlocie parownika chłodziarki TS-450,
- temperatura wody na wlocie każdej chłodnicy SCP-40,
- temperatura wody na wylocie każdej chłodnicy SCP-40.

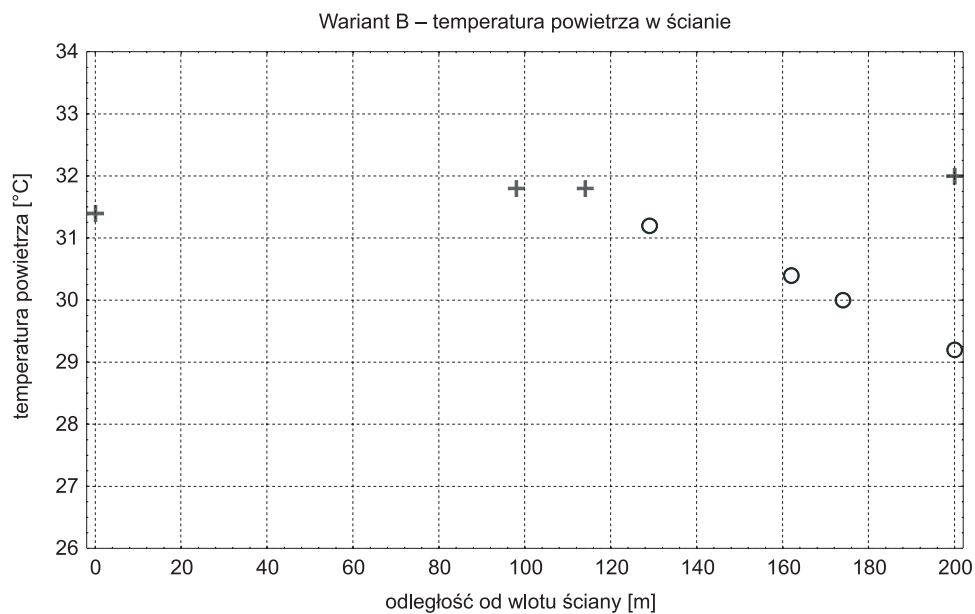
Ciśnienie powietrza mierzono elektronicznym aneroidem typu PAE-03, jego wydatek w wyrobisku i w chłodnicach określano jako iloczyn zmierzonej anemometrem typu  $\mu$ As średniej prędkości przepływu i pola przekroju poprzecznego wyrobiska lub chłodnicy, temperaturę zaś – psychrometrem aspiracyjnym Assmana. Na podstawie wskazań termometrów psychrometru (termometru suchego i wilgotnego) oraz aneroidu wyznaczano względną i właściwą wilgotność powietrza. Wydatek przepływu wody chłodzącej mierzony był przepływomierzem typu SONO 2500CT firmy Danfoss, a jej temperatura – termometrami rtęciowymi. Miejsca pomiarów parametrów powietrza zaznaczono na rysunkach 3 i 4, a ich wyniki zestawiono w tabelach 1 i 2 (na wklejce) oraz na wykresach (rys. 5–8). Na wykresach tych naniesiono punktami w kształcie krzyżyków wyniki pomiarów temperatury i wilgotności powietrza w ścianie w sytuacji bez chłodzenia, zaś w sytuacji z chłodzeniem powietrza dla odcinka ściany z zainstalowanymi chłodnicami odpowiednie wyniki pomiarów naniesiono punktami w kształcie okręgów. W tabelach 3 i 4 podano wyniki pomiarów parametrów wody.



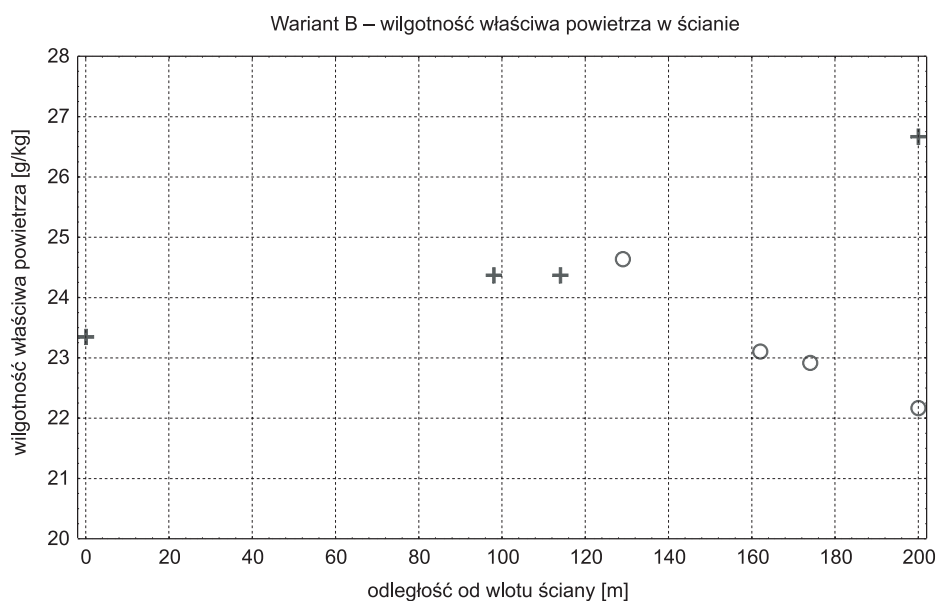
**Rys. 5.** Wariant A układu chłodzenia powietrza. Wyniki pomiarów temperatury powietrza w ścianie 3J bez chłodzenia (+) i z chłodzeniem (O)



**Rys. 6.** Wariant A układu chłodzenia powietrza. Wyniki pomiarów wilgotności właściwej powietrza w ścianie 3J bez chłodzenia (+) i z chłodzeniem (O)



**Rys. 7.** Wariant B układu chłodzenia powietrza. Wyniki pomiarów temperatury powietrza w ścianie 3J bez chłodzenia (+) i z chłodzeniem (O)



**Rys. 8.** Wariant B układu chłodzenia powietrza. Wyniki pomiarów wilgotności właściwej powietrza w ścianie 3J bez chłodzenia (+) i z chłodzeniem (O)

TABELA 3

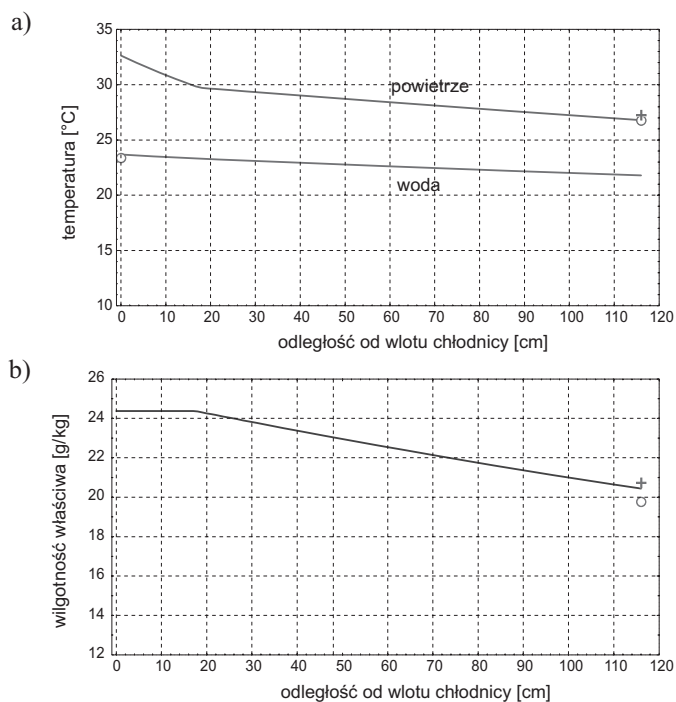
**Wyniki pomiarów parametrów wody chłodzącej w instalacji chłodniczej wykorzystującej małogabarytowe wodne chłodnice ścienne w ścianie 3J/502J – wariant A**

Usytuowanie punktu pomiarowego	Wydatek przepływu wody	Temperatura wody	Przyrost temperatury wody	Moc chłodniczy
	kg/s	°C	°C	kW
Wylot parownika chłodziarki TS-450	2,5	5,6		
Wlot chłodnicy ściennej nr 4	2,5	10,8	5,2	–
Wylot chłodnicy ściennej nr 4	2,5	14,6	3,8	39,8
Wlot chłodnicy ściennej nr 3	2,5	15,0	0,4	–
Wylot chłodnicy ściennej nr 3	2,5	18,3	3,3	34,6
Wlot chłodnicy ściennej nr 2	2,5	18,5	0,2	–
Wylot chłodnicy ściennej nr 2	2,5	21,4	2,9	30,4
Wlot chłodnicy ściennej nr 1	2,5	21,8	0,4	–
Wylot chłodnicy ściennej nr 1	2,5	23,4	1,6	16,8
Wlot parownika chłodziarki TS-450	2,5	25,5	2,1	–

TABELA 4

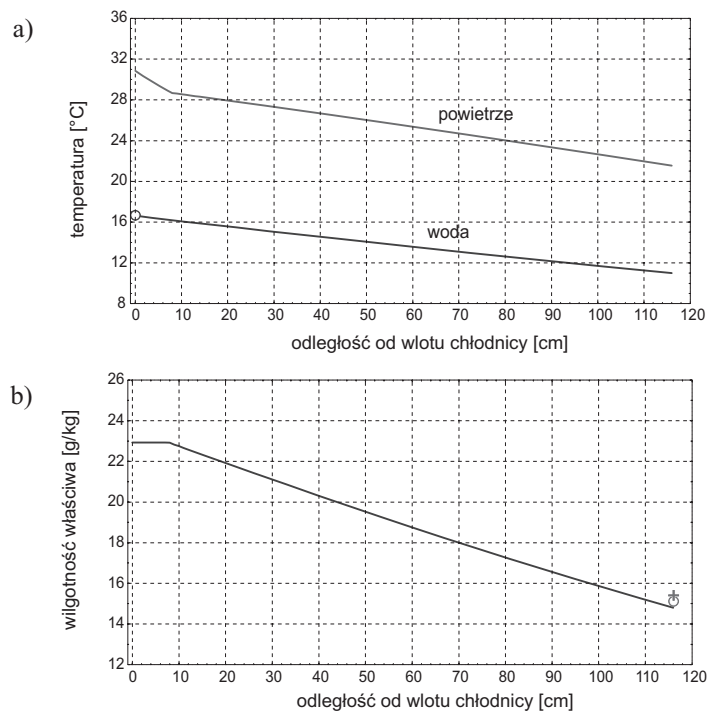
**Wyniki pomiarów parametrów wody chłodzącej w instalacji chłodniczej wykorzystującej małogabarytowe wodne chłodnice ścienne w ścianie 3J/502J – wariant B**

Usytuowanie punktu pomiarowego	Wydatek przepływu wody	Temperatura wody	Przyrost temperatury wody	Moc chłodnicy
	kg/s	°C	°C	kW
Wylot parownika chłodziarki TS-450	3,0	5,8	5,2	–
Wlot chłodnicy ściennej nr 4	1,5	11,0		
Wylot chłodnicy ściennej nr 4	1,5	16,7	5,7	35,8
Wlot chłodnicy ściennej nr 3	1,5	16,8	0,1	–
Wylot chłodnicy ściennej nr 3	1,5	21,2	4,4	27,7
Wlot chłodnicy ściennej nr 2	1,5	11,4	–	–
Wylot chłodnicy ściennej nr 2	1,5	18,0	6,6	41,5
Wlot chłodnicy ściennej nr 1	1,5	18,0	0,0	–
Wylot chłodnicy ściennej nr 1	1,5	21,8	3,8	23,9
Wlot parownika chłodziarki TS-450	3,0	24,5	2,7	–



**Rys. 9.** Wariant A układu chłodzenia powietrza. Wyliczone rozkłady: a) temperatury powietrza i wody; b) wilgotności właściwej powietrza w chłodnicy nr 1. Punktami zaznaczono: wylotowe wyliczone (+) i zmierzone (o) parametry powietrza i wody





**Rys. 10.** Wariant B układu chłodzenia powietrza. Wyliczone rozkłady: a) temperatury powietrza i wody; b) wilgotności właściwej powietrza w chłodnicy nr 4. Punktami zaznaczono: wylotowe wyliczone (+) i zmierzone (O) parametry powietrza i wody

Wyniki pomiarów temperatury i wilgotności właściwej powietrza oraz temperatury wody na wylotach poszczególnych chłodnic podano w tychże tabelach oraz dodatkowo wraz z wynikami obliczeń na wykresach (rys. 9 i 10) (tylko dla wybranych przypadków: chłodnica 1 w wariantcie A i chłodnica 4 w wariantcie B).

### 3. Wyniki obliczeń parametrów powietrza i wody

Dla każdej chłodnicy ścianowej oddzielnie wykonano odpowiadające warunkom pomiarowym obliczenia. Dane wejściowe do obliczeń (wydatek, ciśnienie, temperaturę i wilgotność powietrza na wlocie wentylatora chłodnicy oraz wydatek i temperaturę wody na wlocie chłodnicy) wzięto z pomiarów. Wielkości wyjściowe (temperatura i wilgotność powietrza na wylocie chłodnicy, temperatura wody na wylocie chłodnicy, moc cieplna chłodnicy) były natomiast wyliczane z równań podanych poniżej.

Matematyczny model wodnej chłodnicy powietrza wraz z wyprowadzeniem poszczególnych równań i z warunkami brzegowymi do równań różniczkowych przedstawiono we wcześniejszych pracach [1, 2, 5], tu przytoczona zostanie jedynie końcowa jego postać.

Z obniżaniem temperatury powietrza w wymienniku ciepła wiąże się wzrost jego wilgotności względnej. Gdy temperatura zewnętrznej powierzchni miedzianych rurek, stanowiących przeponę wymiennika, jest niższa od temperatury punktu rosy powietrza, na powierzchni tej następuje kondensacja pary wodnej zawartej w części strugi powietrza kontaktującej się bezpośrednio z przeponą. W rzeczywistości bowiem temperatura powietrza w poprzecznym przekroju chłodnicy jest zróżnicowana – w pobliżu przepony jest niższa, w oddaleniu od niej wyższa. Zamieszczony niżej opis matematyczny opiera się na upraszczającym założeniu, że kondensacja pary wodnej zawartej w chłodzonym powietrzu następuje jednak dopiero od tego poprzecznego przekroju chłodnicy, w którym średnia temperatura całego strumienia powietrza osiąga wartość odpowiadającą punktowi rosy, a w części parownika bliższej wlotu powietrza chłodzenie odbywa się bez skraplania pary. Wprowadzenie tego założenia umożliwia potraktowanie wymiennika ciepła jako elementu przestrzennie jednowymiarowego, uwzględniającego zmienność parametrów powietrza i wody jedynie w kierunku równoległym do jego podłużnej osi. Upraszcza to w sposób zdecydowany uzyskanie praktycznie użytecznego rozwiązania skomplikowanego rzeczywistego zagadnienia. Wykonywane wielokrotnie pomiary w warunkach rzeczywistych potwierdziły przydatność i wystarczającą dla praktyki dokładność wyników uzyskanych z rozwiązania podanego niżej modelu [2, 3, 4]. Podane wyżej założenie daje w efekcie podział chłodnicy na dwie strefy – strefę suchego (A) i mokrego (B) chłodzenia powietrza.

W równaniach użyto następujących oznaczeń:

- $b$  — bezwzględne ciśnienie powietrza [Pa],
- $b_f$  — współczynnik bocznikowania chłodnicy, zdefiniowany jako stosunek masy nie chłodzonej umownej strugi powietrza do całkowitej jego masy [–],
- $c_c$  — ciepło właściwe wody [J/(kg·K)],
- $c_p$  — ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],
- $c_w$  — ciepło właściwe pary wodnej przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],
- $F$  — pole powierzchni czynnego poprzecznego przekroju chłodnicy dla powietrza [m<sup>2</sup>],
- $F_w$  — całkowite pole powierzchni wewnętrznej rurek chłodnicy [m<sup>2</sup>],
- $F_z$  — całkowite pole powierzchni zewnętrznej rurek chłodnicy [m<sup>2</sup>],
- $L$  — długość chłodnicy [m],
- $Q$  — objętościowy wydatek powietrza w chłodnicy [m<sup>3</sup>/s],
- $Q_w$  — objętościowy wydatek wody w chłodnicy [m<sup>3</sup>/s],
- $r_p$  — utajone ciepło parowania wody [J/kg],
- $s$  — współrzędna bieżąca równoległa do podłużnej osi chłodnicy [m],
- $t_1$  — temperatura powietrza przed schłodzeniem (na wlocie wentylatora) [°C],
- $t_2$  — temperatura powietrza na wlocie chłodnicy (za wentylatorem) [°C]

$$t_2 = t_1 + \Delta t_w \quad (1)$$

- $t_c$  — temperatura chłodzonej części powietrza (pojęcie „chłodzona część powietrza” wiąże się ze wspomnianym wyżej umownym współczynnikiem bocznikowania) [°C],

- $t_{pr}$  — temperatura punktu rosy powietrza wlotowego [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $t_w$  — temperatura wody chłodzącej [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $t_{w0}$  — temperatura wody chłodzącej na wlocie chłodnicy [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $\Delta t_w$  — przyrost temperatury powietrza w wentylatorze [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $V_{cw}$  — całkowita objętość przestrzeni zajętej w chłodnicy przez wodę [ $\text{m}^3$ ],  
 $v$  — średnia prędkość przepływu powietrza przez chłodnicę [ $\text{m/s}$ ]

$$v = \frac{Q}{F} \quad (2)$$

- $v_{w0}$  — obliczeniowa prędkość przepływu wody przez chłodnicę [ $\text{m/s}$ ]

$$v_{w0} = \frac{Q_w L}{V_{cw}} \quad (3)$$

- $x_1$  — wilgotność właściwa powietrza przed schłodzeniem (na wlocie wentylatora) [ $\text{kg}$  pary  $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$  such. pow.],  
 $x_2$  — wilgotność właściwa powietrza na wlocie chłodnicy (za wentylatorem) [ $\text{kg}$  pary  $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$  such. pow.],  
 $x_c$  — wilgotność właściwa chłodzonej części powietrza w chłodnicy [ $\text{kg}$  pary  $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$  such. pow.],  
 $\alpha_w$  — współczynnik przejmowania ciepła przez wodę na wewnętrznej powierzchni rurek chłodnicy [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],  
 $\alpha_z$  — współczynnik przejmowania ciepła od powietrza na zewnętrznej powierzchni rurek chłodnicy [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],  
 $\rho$  — gęstość powietrza [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  
 $\rho_w$  — gęstość wody [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Dla uniknięcia niejednoznaczności, w równaniach modelu zmienne parametry powietrza i wody zaopatrzone w dodatkowe górne indeksy:  $(A)$  dla strefy A i  $(B)$  dla strefy B.

Układy równań matematycznego modelu chłodnicy ścianowej są następujące:

- W rozciągającej się od wlotowego przekroju wymiennika  $s = 0$  do przekroju granicznego  $s = s_g$  strefie A, w której średnia temperatura powietrza jest wyższa od temperatury punktu rosy

$$\begin{cases}
 \frac{dt_c^{(A)}}{ds} = - \frac{\alpha_w F_w \alpha_z F_z}{v \rho F L (1 - b_f) (c_p + c_w x_1) (\alpha_w F_w + \alpha_z F_z)} (t_c^{(A)} - t_w^{(A)}) \\
 \frac{dt_w^{(A)}}{ds} = - \frac{\alpha_w F_w \alpha_z F_z}{v_{w0} \rho_w V_{cw} c_c (\alpha_w F_w + \alpha_z F_z)} (t_c^{(A)} - t_w^{(A)}) \\
 x_c^{(A)} = x_1 = x_2
 \end{cases} \quad (4)$$

Warunki brzegowe dla strefy A mają postać:

$$\begin{aligned} t_c^{(A)}(s=0) &= t_2 \\ t_w^{(A)}(s=s_g) &= t_w^{(B)}(s=s_g) \end{aligned} \quad (5)$$

- W rozciągającej się od przekroju granicznego  $s = s_g$  do wylotowego przekroju wymiennika  $s = L$  strefie B, w której średnia temperatura powietrza jest niższa od temperatury punktu rosy powietrza wlotowego

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dt_c^{(B)}}{ds} &= - \frac{\alpha_w F_w \alpha_z F_z}{v \rho FL(1-b_f)(c_p + \Phi r_p)(\alpha_w F_w + \alpha_z F_z)} (t_c^{(B)} - t_w^{(B)}) \\ \frac{dt_w^{(B)}}{ds} &= - \frac{\alpha_w F_w \alpha_z F_z}{v_{w0} \rho_w V_{cw} c_c (\alpha_w F_w + \alpha_z F_z)} (t_c^{(B)} - t_w^{(B)}) \\ x_c^{(B)} = x_n(t_c^{(B)}) &= \frac{379,8 \cdot 10^u}{b - 610,6 \cdot 10^u}, \quad \text{gdzie } u = \frac{7,5 t_c^{(B)}}{t_c^{(B)} + 237,29} \\ \Phi = \frac{dx_c^{(B)}}{dt_c^{(B)}} &= \frac{379,8 \cdot 7,5 \cdot 237,29 \cdot \ln 10 \cdot 10^u \cdot b}{(t_c^{(B)} + 237,29)^2 (b - 610,6 \cdot 10^u)^2} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

z warunkami brzegowymi:

$$\begin{aligned} t_c^{(B)}(s=s_g) &= t_{pr} \\ t_w^{(B)}(s=L) &= t_{w0} \end{aligned} \quad (7)$$

Współrzędną graniczną  $s_g$  wyznacza się z warunku

$$t_c^{(A)}(s=s_g) = t_{pr} \quad (8)$$

Rezultaty obliczeń parametrów powietrza i wody na wylotach poszczególnych chłodnic ścianowych podano w tabelach 5–8. Dodatkowo na rysunkach 9 i 10 dla wymienionych wcześniej wybranych przypadków (chłodnica 1 w wariantcie A i chłodnica 4 w wariantcie B) pokazano w postaci wykresów wyliczone rozkłady (linie) temperatury i wilgotności właściwej chłodzonej części powietrza oraz temperatury wody wzdłuż chłodnicy, wyliczone wartości wylotowe parametrów powietrza i wody (krzyżyki) oraz dla porównania odpowiadające im wartości otrzymane z pomiarów (okręgi).

TABELA 5  
**Wyniki obliczeń parametrów powietrza w ścianie 3J/502J z instalacją chłodniczą wykorzystującą małogabarytowe wodne chłodnice ścienne (wariant A)**

	Numer i usytuowanie punktu, którego dotyczy wyliczenie	Temperatura termometru suchego	Wilgotność właściwa powietrza	Wilgotność względna powietrza	Moc ochładzania powietrza	Moc osuszania powietrza	Całkowita moc cieplna chłodnicy
		°C	g/kg	%	kW	kW	kW
4	Przed wlotem chłodnicy ścianowej nr 1, 114 m od wlotu ściany 3J	31,8	24,37	88,8	7,9	11,7	19,7
5	Na wylocie chłodnicy ścianowej nr 1, 121 m od wlotu ściany 3J	27,2	20,73	98,8			
6	Przed wlotem chłodnicy ścianowej nr 2, 129 m od wlotu ściany 3J	31,2	23,87	90,1	10,2	17,5	27,7
7	Na wylocie chłodnicy ścianowej nr 2, 136 m od wlotu ściany 3J	25,7	18,86	99,0			
8	Przed wlotem chłodnicy ścianowej nr 3, 162 m od wlotu ściany 3J	30,0	23,67	95,6	10,9	22,8	33,7
9	Na wylocie chłodnicy ścianowej nr 3, 169 m od wlotu ściany 3J	23,8	16,93	99,7			
10	Przed wlotem chłodnicy ścianowej nr 4, 174 m od wlotu ściany 3J	29,8	23,01	94,1	13,0	26,1	39,1
11	Na wylocie chłodnicy ścianowej nr 4, 181 m od wlotu ściany 3J	21,4	14,62	100,0			

TABELA 6

Wyniki obliczeń parametrów powietrza w ścianie 3J/502J z instalacją chłodniczą wykorzystującą małogabarytowe wodne chłodnice ścienne (wariant B)

	Numer i usytuowanie punktu, którego dotyczy wyliczenie	Temperatura termometru suchego	Wilgotność właściwa powietrza	Wilgotność względna powietrza	Moc ochładzania powietrza	Moc osuszania powietrza	Całkowita moc cieplna chłodnicy
		°C	g/kg	%	kW	kW	kW
4	Przed wlotem chłodnicy ścianowej nr 1, 114 m od wlotu ściany 3J	31,8	24,37	88,8	9,5	15,9	25,4
5	Na wylocie chłodnicy ścianowej nr 1, 121 m od wlotu ściany 3J	26,2	19,43	98,9			
6	Przed wlotem chłodnicy ścianowej nr 2, 129 m od wlotu ściany 3J	31,2	24,64	92,8	13,4	27,4	40,7
7	Na wylocie chłodnicy ścianowej nr 2, 136 m od wlotu ściany 3J	23,6	16,78	99,6			
8	Przed wlotem chłodnicy ścianowej nr 3, 162 m od wlotu ściany 3J	30,4	23,11	91,3	9,6	16,8	26,4
9	Na wylocie chłodnicy ścianowej nr 3, 169 m od wlotu ściany 3J	25,0	18,14	99,1			
10	Przed wlotem chłodnicy ścianowej nr 4, 174 m od wlotu ściany 3J	30,0	22,92	92,7	12,0	23,3	35,4
11	Na wylocie chłodnicy ścianowej nr 4, 181 m od wlotu ściany 3J	22,3	15,42	99,6			

TABELA 7

**Wyniki obliczeń parametrów wody chłodzącej w instalacji chłodniczej wykorzystującej małowabarytowe wodne chłodnice ścienne w ścianie 3J/502J (wariant A)**

Usytuowanie punktu pomiarowego	Temperatura wody	Przyrost temperatury wody	Moc chłodnicy
	°C	°C	kW
Wlot chłodnicy ściennej nr 4	10,8	3,7	39,1
Wylot chłodnicy ściennej nr 4	14,5		
Wlot chłodnicy ściennej nr 3	15,0	3,2	33,7
Wylot chłodnicy ściennej nr 3	18,2		
Wlot chłodnicy ściennej nr 2	18,5	2,6	27,7
Wylot chłodnicy ściennej nr 2	21,1		
Wlot chłodnicy ściennej nr 1	21,8	1,9	19,7
Wylot chłodnicy ściennej nr 1	23,7		

TABELA 8

**Wyniki obliczeń parametrów wody chłodzącej w instalacji chłodniczej wykorzystującej małowabarytowe wodne chłodnice ścienne w ścianie 3J/502J (wariant B)**

Usytuowanie punktu pomiarowego	Temperatura wody	Przyrost temperatury wody	Moc chłodnicy
	°C	°C	kW
Wlot chłodnicy ściennej nr 4	11,0	5,6	35,4
Wylot chłodnicy ściennej nr 4	16,6		
Wlot chłodnicy ściennej nr 3	16,8	4,2	26,4
Wylot chłodnicy ściennej nr 3	21,0		
Wlot chłodnicy ściennej nr 2	11,4	6,5	40,7
Wylot chłodnicy ściennej nr 2	17,9		
Wlot chłodnicy ściennej nr 1	18,0	4,0	25,4
Wylot chłodnicy ściennej nr 1	22,0		

TABELA 9

## Porównanie wyników pomiarów i obliczeń parametrów chłodnic SCP-40 zainstalowanych w ścianie 3J/502J

Porównywana wielkość	wariant A				wariant B				
	numer chłodnicy ścianowej				numer chłodnicy ścianowej				
	1	2	3	4	1	2	3	4	
Temperatura powietrza schłodzonego (na wylocie chłodnicy) $t_3$ [°C]	wartość pomierzona $t_{3p}$	26,8	26,0	24,0	21,0	25,8	23,2	24,8	22,2
	wartość obliczona $t_{3o}$	27,2	25,7	23,8	21,4	26,2	23,6	25,0	22,3
	odchyłka $\Delta t_3 = t_{3o} - t_{3p}$	0,4	-0,3	-0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,1
	odchyłka względna $\delta t_3 = \frac{\Delta t_3}{t_{3p}} \cdot 100\%$	1,5%	-1,2%	-0,8%	1,9%	1,6%	1,7%	0,8%	0,5%
Temperatura ogrzewanej wody (na wylocie chłodnicy) $t_{w1}$ [°C]	wartość pomierzona $t_{w1p}$	23,4	21,4	18,3	14,6	21,8	18,0	21,2	16,7
	wartość obliczona $t_{w1o}$	23,7	21,1	18,2	14,5	22,0	17,9	21,0	16,6
	odchyłka $\Delta t_{w1} = t_{w1o} - t_{w1p}$	0,3	-0,3	-0,1	-0,1	0,2	-0,1	-0,2	-0,1
	odchyłka względna $\delta t_{w1} = \frac{\Delta t_{w1}}{t_{w1p}} \cdot 100\%$	1,3%	-1,4%	-0,5%	-0,7%	0,9%	-0,6%	-0,9%	-0,6%
Moc cieplna chłodnicy $N_c$ [kW]	wartość pomierzona $N_{cp}$	16,8	30,4	34,6	39,8	23,9	41,5	27,7	35,8
	wartość obliczona $N_{co}$	19,7	27,7	33,7	39,1	25,4	40,7	26,4	35,4
	odchyłka $\Delta N_c = N_{co} - N_{cp}$	2,9	-2,7	-0,9	-0,7	1,5	-0,8	-1,3	-0,4
	odchyłka względna $\delta N_c = \frac{\Delta N_c}{N_{cp}} \cdot 100\%$	17,3%	-8,9%	-2,6%	-1,8%	6,3%	-1,9%	-4,7%	-1,1%



W tabeli 9 przedstawiono porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów następujących parametrów chłodnic:

- temperatura powietrza schłodzonego ( $t_3$ ),
- temperatura ogrzanej wody ( $t_{w1}$ ),
- moc cieplna chłodnicy ( $N_c$ ).

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania dwóch systemów chłodzenia powietrza (wersja A i wersja B) złożonych z czterech małogabarytowych wodnych chłodnic ścianowych pozwalają stwierdzić, zarówno w jednym, jak i w drugim przypadku, ich pozytywne oddziaływanie na mikroklimat w wyrobisku.

Sumaryczna pomierzona moc chłodnic w wariancie A wynosi 121,6 kW, a moc obliczona 120,2 kW, natomiast w wariancie B odpowiednie wielkości są równe 128,9 kW i 127,9 kW – widać zatem bardzo dużą zgodność (odchyłki rzędu 1%) stwierdzonego eksperymentalnie efektu działania systemów chłodzenia z wynikami obliczeń. W rozbięciu na poszczególne chłodnice zgodność ta jest mniejsza (maksymalna odchyłka mocy obliczonej od mocy pomierzonej w wariancie A wynosi 17,3% dla chłodnicy nr 1, a w wariancie B 6,3% również dla chłodnicy nr 1).

Badanie obydwóch wariantów systemu chłodzenia powietrza czterema chłodnicami ścianowymi pozwoliło stwierdzić przewagę wariantu B, czyli szeregowo-równoległego połączenia chłodnic od strony wody. Większa sumaryczna moc chłodnicza układu w wariancie B uwidacznia się w postaci nieco niższej temperatury powietrza w wyrobisku za wylotem ściany 3J – temperatura powietrza w wariancie A równa jest 29,8°C, a w wariancie B 29,2°C.

W punkcie pomiarowym nr 12 (rys. 3 i 4), tj. 10 m za wylotem ściany 3J, w sytuacji bez chłodzenia stwierdzono eksperymentalnie temperaturę powietrza równą 32,0°C, wilgotność względną równą 95,7% i wilgotność właściwą równą 26,67 g/kg. A zatem z pomiarów wynika, że obniżenie temperatury powietrza w punkcie 12 w porównaniu z sytuacją bez chłodzenia wyniosło w wariancie A 2,2°C (od 32,0°C do 29,8°C), podczas gdy w wariancie B 2,8°C (od 32,0°C do 29,2°C). Z danych zamieszczonych w tabelach 1 i 2 wynika też, że na skutek skroplenia się pary wodnej w chłodzonym powietrzu obniżenie jego wilgotności właściwej w tym punkcie w wariancie A wyniosło 4,74 g/kg (od 26,67 g/kg do 21,93 g/kg), a w wariancie B 4,50 g/kg (od 26,67 g/kg do 22,17 g/kg), natomiast dla wilgotności względnej analogiczne dane są równe: dla wariantu A 5,9% (od 95,7% do 89,8%), zaś dla wariantu B 1,7% (od 95,7% do 94,0%).

#### LITERATURA

- [1] Filek K., Holesz K., Nowak B., Roszkowski J.: Chłodzenie powietrza górnicy chłodnicą przeponową z kondensacją pary wodnej. Archives of Mining Sciences, vol. 44, z. 1, 1999
- [2] Filek K., Nowak B.: Wymiana ciepła i masy w górnicych przeponowych chłodnicach powietrza o działaniu pośrednim. Kraków, Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej 1999

- [3] *Filek K., Holesz K., Nowak B., Roszkowski J.*: Eksperymentalne badania górniczej chłodnicy przeponowej przy chłodzeniu z kondensacją pary wodnej. *Kwartalnik AGH Górnictwo*, z. 4, 1998
- [4] *Filek K., Łuska P., Nowak B., Roszkowski J.*: Badania małowabarytowej wodnej chłodnicy ścianowej. *Archives of Mining Sciences PAN*, vol. 49, issue 4, 2004
- [5] *Holesz K.*: Temperatura i wilgotność powietrza w górniczych chłodnicach przeponowych w stanach nieustalonych. Kraków, 1997 (praca doktorska)