

Marian Branny, Krzysztof Filek*, Justyna Swolkień**

CHŁODZENIE POWIETRZA W WYROBISKACH CHŁODZIARKĄ SPRĘŻARKOWĄ O DZIAŁANIU BEZPOŚREDNIM**

1. Wstęp

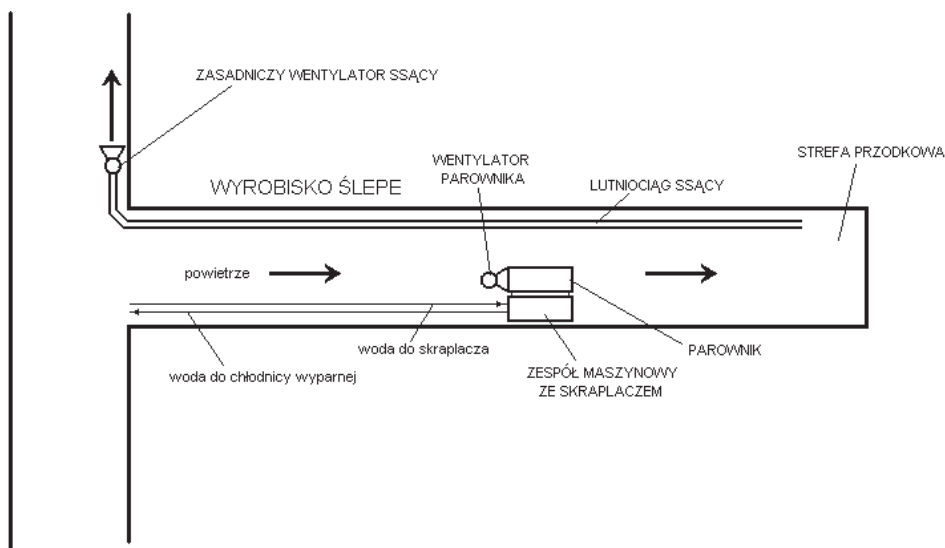
Do zwalczania zagrożenia cieplnego w przodkach wydobywczych wyrobisk ślepych mogą być wykorzystywane urządzenia chłodnicze – wodne przeponowe chłodnice powietrza przy pośrednim sposobie chłodzenia lub przystosowane do chłodzenia powietrza parowniki chłodziarek sprężarkowych przy chłodzeniu bezpośrednim. Lokalizacja tych urządzeń zależna jest między innymi od przyjętego w danym wyrobisku rodzaju lutniowej wentylacji odrębnej. Przy wentylacji tłoczącej wymiennik ciepła (wodną chłodnicę lub parownik) montuje się na lutniociągu w niewielkiej odległości od przodka – schładza on wtedy cały strumień powietrza świeżego płynący lutniociągiem, natomiast przy wentylacji ssącej wymiennik ten umieszczony jest w wyrobisku i wyposażony w dodatkowy wentylator, który tłoczy świeże powietrze do wymiennika – schładzana jest wtedy w wyrobisku ta część powietrza. Wentylator powinien zapewniać odpowiednie natężenie przepływu powietrza świeżego przy istniejącym oporze wymiennika i ewentualnie połączonego z nim krótkiego odcinka lutniociągu [5, 6].

W sytuacji wykorzystania chłodnicy wodnej ślepych wyrobiskiem prowadzone są przewody krążącej w obiegu zamkniętym wody zimnej (zasilający i powrotny), a samo chłodzenie wody odbywa się najczęściej poza omawianym wyrobiskiem w przystosowanym do chłodzenia wody parowniku chłodziarki sprężarkowej. Jeżeli natomiast powietrze chłodzone jest bezpośrednio w parowniku, to zespół maszynowy chłodziarki (silnik, sprężarka, skraplacz, zawór rozprężny, urządzenia sterowania i zabezpieczające) umieszcza się obok parownika tak, by długość przewodów krążącego między parownikiem a skraplaczem czynnika chłodniczego nie przekraczała kilku metrów. Wzdłuż wyrobiska prowadzone są wtedy przewody wody chłodzącej skraplacz chłodziarki; krąży ona zwykle także w obwodzie zamkniętym i jest chłodzona w chłodnicy wyparnej usytuowanej poza omawianym wyrobiskiem, w prądzie powietrza zużytego.

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

** Artykuł powstał w ramach prac statutowych nr 11.11.100.281

Artykuł dotyczy sytuacji bezpośredniego chłodzenia powietrza przy ssącej wentylacji lutniowej – schemat układu pokazano na rysunku 1. Rozważono pracę dwóch górniczych chłodziarek: typu DV-290 i typu TS-300B. Przedstawiono wyniki obliczeń pracy parowników tych chłodziarek w wariantach różniących się objętościowym natężeniem przepływu chłodzonego powietrza (Q_p) i jego temperaturą na wlocie do połączonych z parownikami wentylatorów (t_0). W odniesieniu do każdej z chłodziarek przyjęto dwie wartości Q_p oraz pięć wartości t_0 , otrzymując 20 wariantów obliczeniowych. Wszystkie obliczenia przeprowadzono dla wilgotności względnej powietrza na wlocie wentylatorów równej $\varphi_0 = 80\%$. Wyliczono temperaturę (t_2), wilgotność względną (φ_2) i wilgotność właściwą (x_2) powietrza na wlocie parownika, a także jego moc chłodniczą (N_p) z podziałem na związaną z ciepłem jawnym moc ochładzania powietrza (N_{pv}) i związaną z ciepłem utajonym kondensacji pary wodnej moc osuszania powietrza (N_{px}).



Rys. 1. Schemat wyrobiska ślepego z bezpośrednim chłodzeniem powietrza przy ssącej wentylacji lutniowej

2. Równania matematycznego modelu parownika

Obliczenia wykonano, stosując wyprowadzony w [1] matematyczny model chłodziarki sprężarkowej. W modelu tym przyjęto, że poszczególne elementy chłodziarki mają charakter skupiony, co odpowiada założeniu o skokowych zmianach parametrów przepływających mediów. Poniżej przytoczono równania modelu odnoszące się do parownika:

$$k_p F_p (t_c - t_f) = Q_{pm} (1 - b_f) [c_p (t_1 - t_{c2}) + c_w (t_1 x_1 - t_{c2} x_{c2}) + (r_p - c_c t_{c2}) (x_1 - x_{c2})] \quad (1)$$

$$k_p F_p (t_c - t_f) = Q_f [e_{pf0} (t_{f2} - t_{f0} \chi_1) + (r_{f0} - c_{ef0} t_{f0}) (1 - \chi_1)] \quad (2)$$

$$t_2 = \frac{(c_p t_{c2} + c_w t_{c2} x_{c2} + r_p x_{c2})(1 - b_f) + (c_p t_1 + c_w t_1 x_1 + r_p x_1) b_f - r_p x_2}{c_p + c_w x_2} \quad (3)$$

$$x_2 = \begin{cases} x_{c2} (1 - b_f) + x_1 b_f & \text{dla } x_{c2} (1 - b_f) + x_1 b_f \leq x_{np} \\ x_{np} & \text{dla } x_{c2} (1 - b_f) + x_1 b_f > x_{np} \end{cases} \quad (4)$$

Równanie (1) wyraża równość ciepła przepływającego pod wpływem różnicy temperatur w jednostce czasu od powietrza do parującego czynnika chłodniczego przez przeponę parownika (miedziane ścianki rurek) i ciepła odebranego chłodzonemu powietrzu. Średnią różnicę temperatur chłodzonej części powietrza (t_c) i czynnika chłodniczego (t_f) obliczono jako różnicę średnią logarytmiczną, przyjmując $t_f = t_{f0}$, gdzie t_{f0} jest temperaturą parowania czynnika chłodniczego pod panującym w parowniku ciśnieniem p_0 . Przez c_p , c_w i c_c oznaczono ciepło właściwe odpowiednio powietrza suchego i pary wodnej przy stałym ciśnieniu oraz ciekłej wody, natomiast przez r_p ciepło parowania wody. Pozostałe symbole użyte w równaniu (1) oznaczają:

- b_f — współczynnik bocznikowania parownika, rozumiany [2, 3] jako stosunek masy chłodzonej (umownej) części powietrza do całej jego masy [–],
- F_p — pole powierzchni wymiany ciepła w parowniku [m^2],
- k_p — współczynnik przenikania ciepła przez przeponę parownika [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$],
- Q_{pm} — strumień masy powietrza suchego w parowniku [kg/s],
- t_{c2} — temperatura chłodzonej części powietrza (o wydatku masowym $Q_p(1 - b_f)$) na wylocie parownika [$^{\circ}\text{C}$],
- t_1 — temperatura powietrza na wlocie parownika [$^{\circ}\text{C}$]; jest ona równa

$$t_1 = t_0 + \Delta t_w \quad (5)$$

gdzie:

- t_0 — temperatura powietrza na wlocie wentylatora [$^{\circ}\text{C}$],
- t_w — przyrost temperatury powietrza w wentylatorze [$^{\circ}\text{C}$],
- x_{c2} — wilgotność właściwa chłodzonej części powietrza na wylocie parownika [kg/kg],
- x_1 — wilgotność właściwa powietrza na wlocie parownika [kg/kg]; obowiązuje zależność

$$x_1 = x_0 \quad (6)$$

gdzie x_0 — wilgotność właściwa powietrza na wlocie wentylatora [kg/kg].

Równanie (2) z kolei przyrównuje ciepło przepływające przez ścianki rurek parownika do ciepła oddanego czynnikowi chłodniczemu. Występujące w równaniu symbole c_{ef0} i c_{p0} to ciepło właściwe parującego pod ciśnieniem p_0 czynnika chłodniczego – odpowiednio jego fazy ciekłej i gazowej, a r_{f0} to jego ciepło parowania. Przez Q_f oznaczono strumień masy czynnika chłodniczego, a przez t_2 i χ_1 odpowiednio temperaturę jego przegrzanej pary na wylocie parownika i stopień suchości na wlocie parownika.

Równania (3) i (4) opisują mieszanie na wylocie parownika umownej chłodzonej części powietrza o temperaturze t_{c2} i wilgotności właściwej x_{c2} z częścią niechłodzoną o temperaturze i wilgotności równych wartościom wlotowym t_1 i x_1 . Parownik opuszcza powietrze o temperaturze t_2 , wilgotności właściwej x_2 i wilgotności względnej φ_2 . Przez x_{np} oznaczono wilgotność właściwą powietrza nasyconego parą wodną na wylocie parownika.

Całkowita moc (wydajność) chłodnicza parownika (N_p), rozumiana jako ciepło odebrane powietrzu w jednostce czasu, jest równa

$$N_p = Q_{pm} \left[c_p (t_1 - t_2) + c_w (t_1 x_1 - t_2 x_2) + (r_p - c_c t_2) (x_1 - x_2) \right] \quad (7)$$

Całkowita moc parownika jest sumą jego mocy jawnej (N_{pt}) związanej ze zmianą temperatury powietrza i mocy utajonej (N_{px}) związanej ze zmianą wilgotności właściwej powietrza na skutek kondensacji zawartej w powietrzu pary wodnej, przy czym:

$$N_{pt} = Q_{pm} \left[c_p (t_1 - t_2) + c_w (t_1 x_1 - t_2 x_2) \right] \quad (8)$$

$$N_{px} = Q_{pm} (r_p - c_c t_2) (x_1 - x_2) \quad (9)$$

3. Wyniki obliczeń

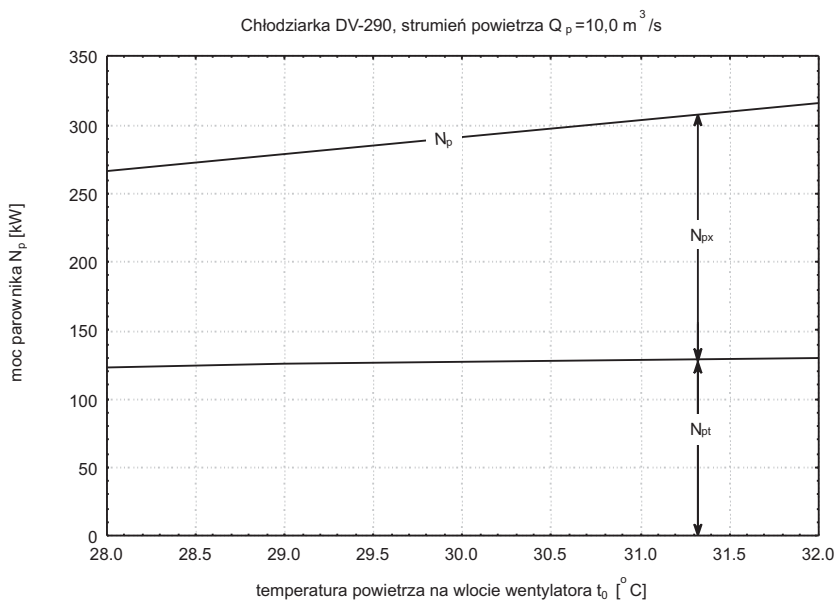
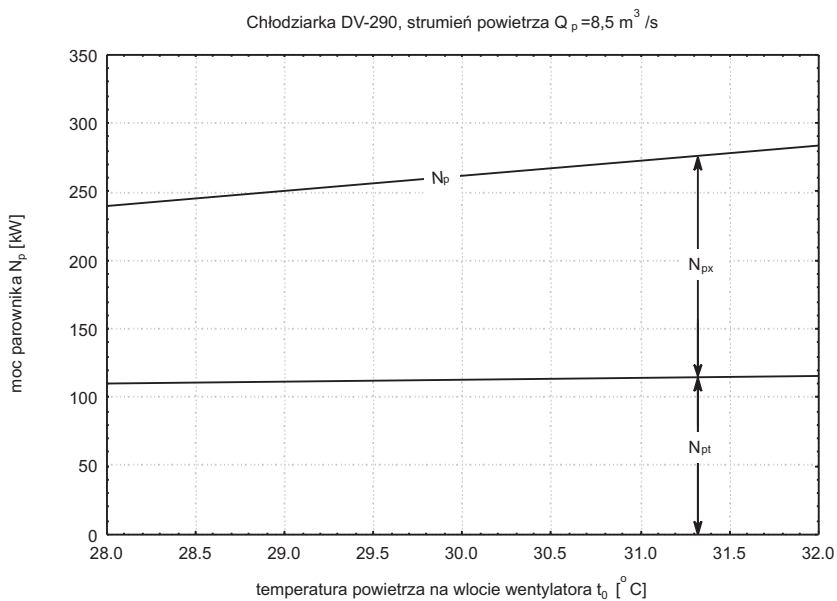
Obliczenia wykonano z wykorzystaniem utworzonego programu komputerowego, przyjmując dwie wartości strumienia powietrza w parowniku: $Q_p = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ i $Q_p = 8,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Pierwsza z tych wartości odpowiada pracy chłodziarki w warunkach zbliżonych do nominalnych, natomiast druga – obniżonej wydajności parownika na skutek zastąpienia jego wentylatora fabrycznego wentylatorem WLE-804AM. We wszystkich wariantach przyjęto $\Delta t_w = 2^\circ\text{C}$. Założono, że w chłodziarce DV-290 krąży czynnik chłodniczy R22, a w chłodziarce TS300B czynnik R407C. Niezbędne dane dotyczące czynników chłodniczych określono na podstawie [4].

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1, a także na wykresach (rys. 2–6), na których przedstawiono moc chłodniczą parownika N_p , z podziałem na część N_{pt} i N_{px} , temperaturę powietrza schłodzonego t_2 , jego wilgotność względną φ_2 i właściwą x_2 w funkcji temperatury powietrza na wlocie wentylatora t_0 . Użyte w tabeli 1 oznaczenia φ_0 i φ_1 to wilgotność względna powietrza odpowiednio na wlocie wentylatora i na wlocie parownika.

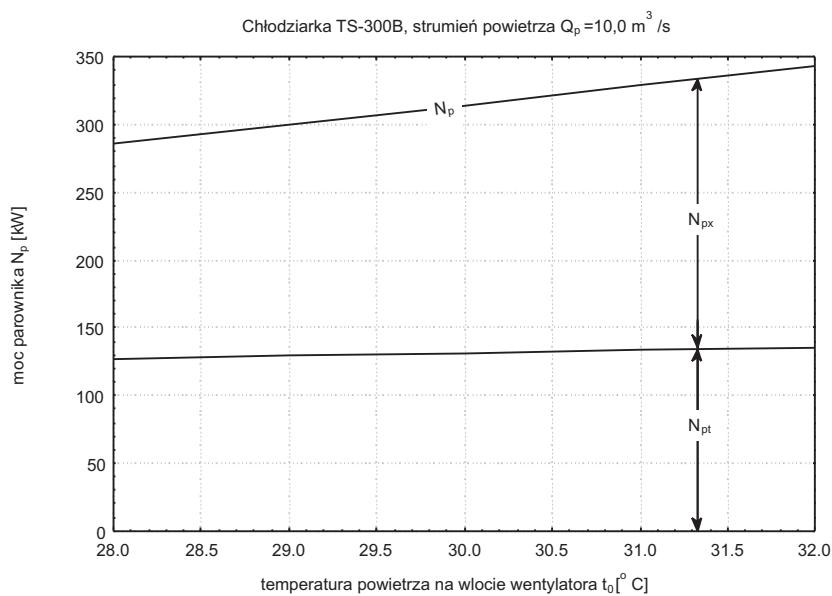
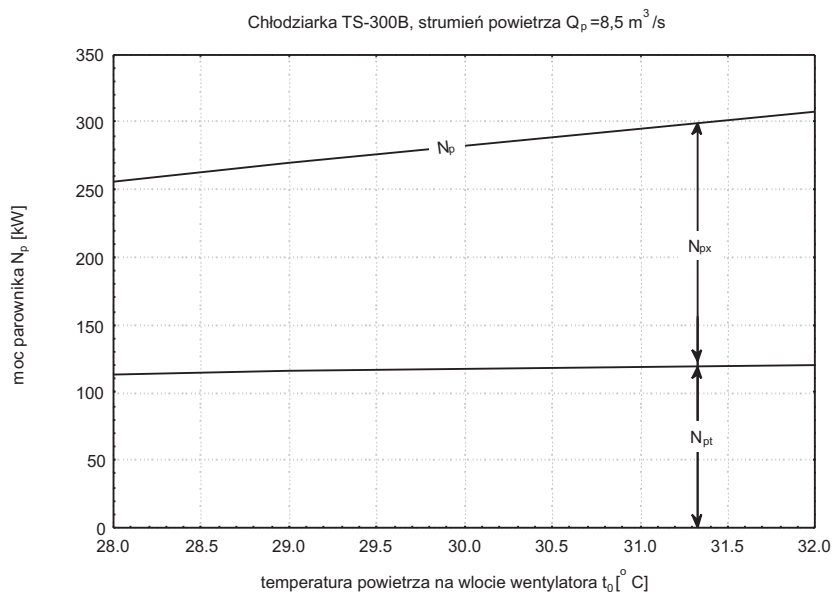
TABELA 1

Wyniki obliczeń parametrów powietrza schłodzonego i mocy parownika

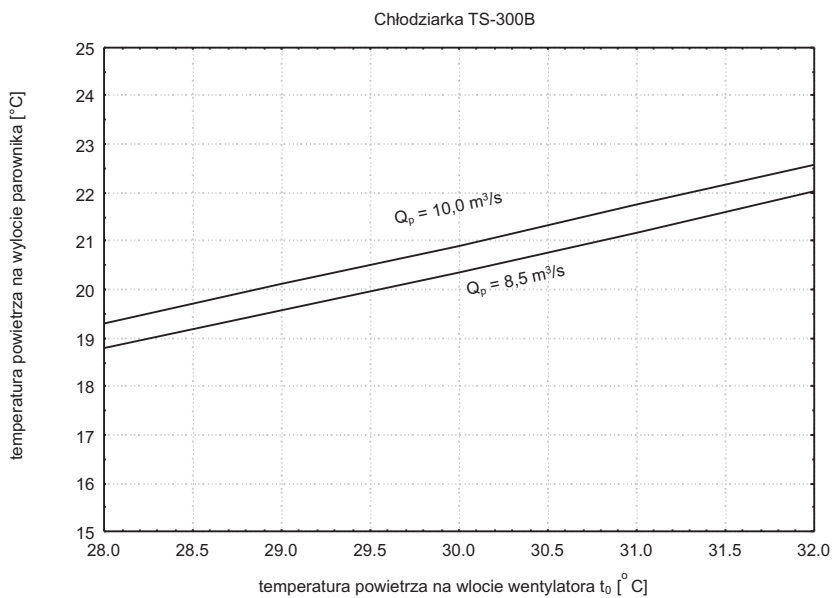
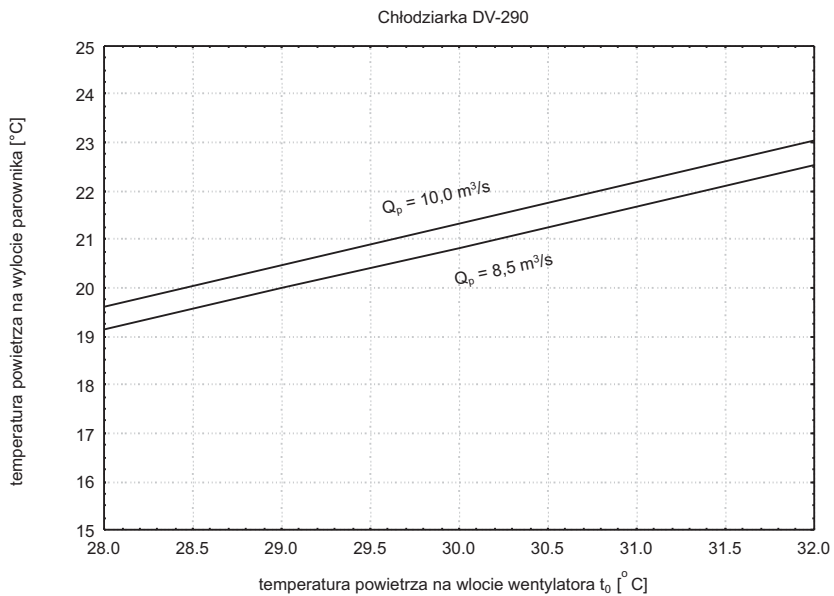
Typ chłodziarki	Q_p	t_0	φ_0	t_1	φ_1	$x_1 = x_0$	t_2	φ_2	x_2	N_{pt}	N_{px}	N_p
	[m ³ /s]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[g/kg]	[°C]	[%]	[g/kg]	[kW]	[kW]	[kW]
chłodziarka DV-290	8,5	28,0	80,0	30,0	71,27	19,29	19,15	97,42	13,66	109,6	129,7	239,3
		29,0		31,0	71,33	20,48	19,98	97,44	14,40	111,2	139,1	250,3
		30,0		32,0	71,39	21,74	20,82	97,46	15,20	112,8	148,7	261,5
		31,0		33,0	71,45	23,06	21,68	97,48	16,04	114,1	158,6	272,7
	10,0	32,0	34,0	71,51	24,46	22,55	97,49	16,94	115,3	168,6	283,9	
		28,0	30,0	71,27	19,29	19,62	96,96	14,01	123,4	143,0	266,4	
		29,0	31,0	71,33	20,48	20,46	96,98	14,78	125,2	153,5	278,7	
		30,0	32,0	71,39	21,74	21,31	97,00	15,59	126,9	164,1	291,0	
chłodziarka TS-300B	8,5	31,0	80,0	33,0	71,45	23,06	22,17	97,02	16,46	128,4	175,1	303,5
		32,0		34,0	71,51	24,46	23,05	97,04	17,39	129,8	186,2	316,0
		28,0		30,0	71,27	19,29	18,78	95,62	13,09	113,5	142,9	256,4
		29,0		31,0	71,33	20,48	19,57	95,69	13,77	115,5	153,6	269,1
	10,0	30,0	32,0	71,39	21,74	20,37	95,76	14,50	117,4	164,6	282,0	
		31,0	33,0	71,45	23,06	21,19	95,81	15,28	119,1	175,8	294,9	
		32,0	34,0	71,51	24,46	22,03	95,86	16,11	120,7	187,3	308,0	
		28,0	30,0	71,27	19,29	19,30	95,00	13,44	127,4	158,5	285,9	
10,0	29,0	31,0	71,33	20,48	20,10	95,07	14,15	129,7	170,4	300,1		
	30,0	32,0	71,39	21,74	20,91	95,13	14,91	131,7	182,6	314,3		
	31,0	33,0	71,45	23,06	21,74	95,19	15,72	133,7	195,1	328,8		
	32,0	34,0	71,51	24,46	22,59	95,23	16,58	135,4	207,9	343,3		



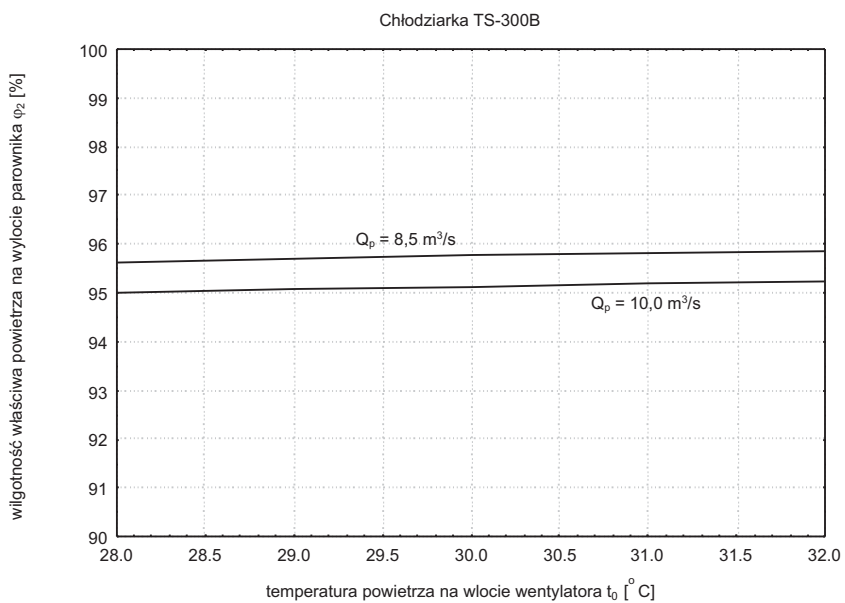
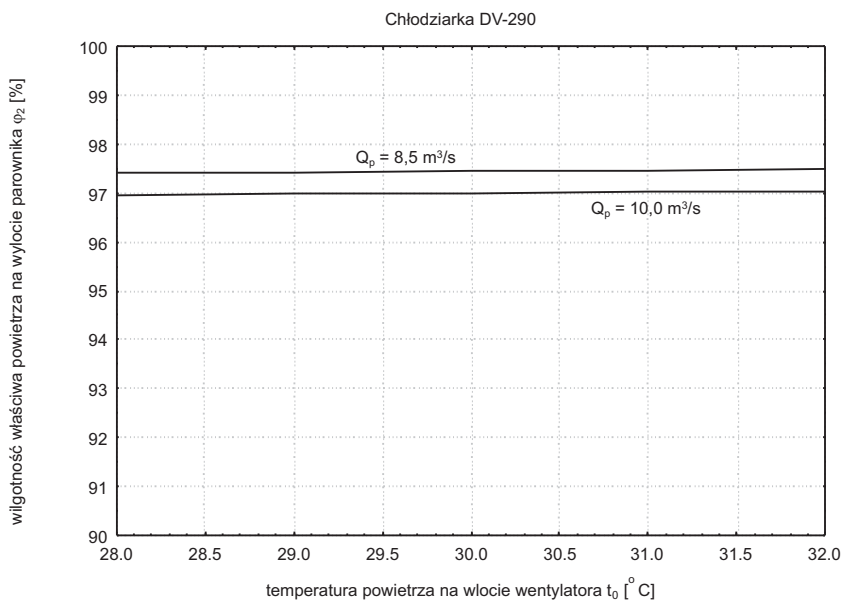
Rys. 2. Moc chłodnicza (N_p) parownika chłodziarki DV-290 z podziałem na moc ochładzania (N_{pt}) i moc osuszania (N_{px}) w funkcji temperatury powietrza w wyrobisku przed schłodzeniem (t_0) przy natężeniu przepływu powietrza: a) $Q_p = 8,5 \text{ m}^3/\text{s}$; b) $Q_p = 10,0 \text{ m}^3/\text{s}$



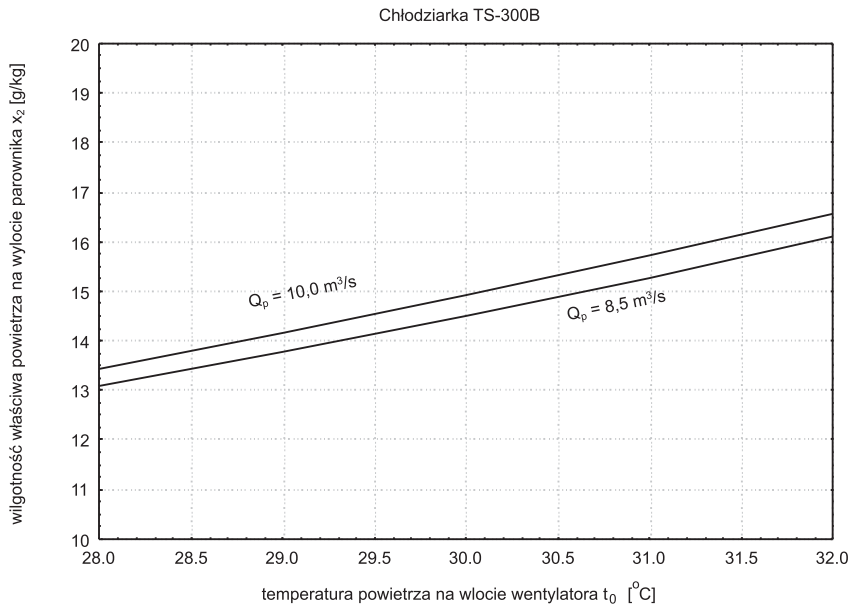
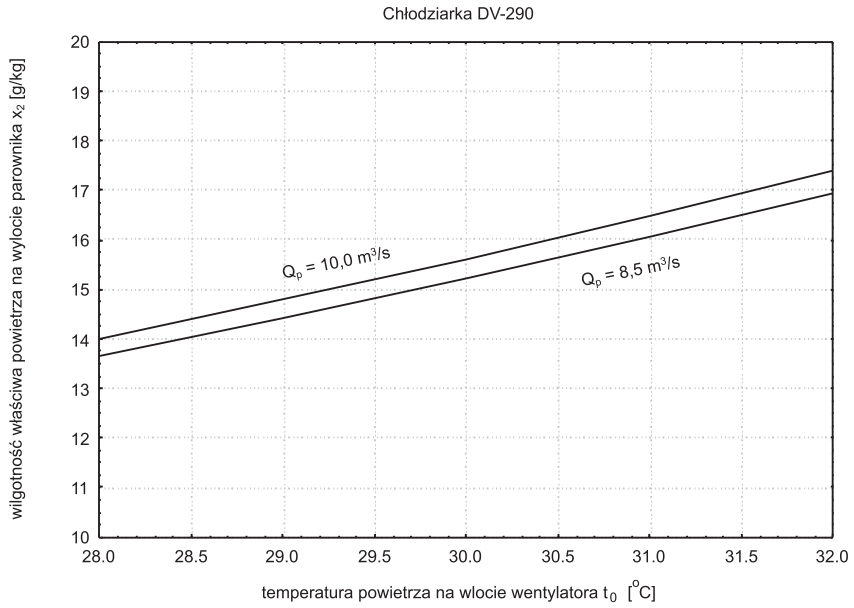
Rys. 3. Moc chłodnicza (N_p) parownika chłodziarki TS-300B z podziałem na moc ochładzania (N_{pt}) i moc osuszania (N_{px}) w funkcji temperatury powietrza w wyrobisku przed schłodzeniem (t_0) przy natężeniu przepływu powietrza: a) $Q_p = 8,5 \text{ m}^3/\text{s}$; b) $Q_p = 10,0 \text{ m}^3/\text{s}$



Rys. 4. Temperatura powietrza schłodzonego (t_2) w funkcji temperatury powietrza w wyrobisku przed schłodzeniem (t_0): a) chłodziarka DV-290; b) chłodziarka TS-300B



Rys. 5. Wilgotność względna powietrza schłodzonego (ϕ_2) w funkcji temperatury powietrza w wyrobisku przed schłodzeniem (t_0): a) chłodziarka DV-290; b) chłodziarka TS-300B



Rys. 6. Wilgotność właściwa powietrza schłodzonego (x_2) w funkcji temperatury powietrza w wyrobisku przed schłodzeniem (t_0): a) chłodziarka DV-290; b) chłodziarka TS-300B

4. Podsumowanie

W przypadkach gdy temperatura powietrza płynącego ślepym wyrobiskiem w stronę przodka mieści się w granicach między 28°C a 32°C, przy jego wilgotności względnej około 80% i przy wzroście temperatury powietrza w wentylatorze o około 2°C, można oczekiwać temperatury powietrza schłodzonego w granicach od około 19°C do 23°C (czyli o około 9°C niższej niż przed wentylatorem) i wilgotności względnej od 95% do 97,5%. Ograniczenie natężenia przepływu powietrza z 10 m³/s do 8,5 m³/s przy niezmiennych pozostałych parametrach powietrza na wlocie powoduje obniżenie jego temperatury na wylocie parownika o około 0,5°C i wilgotności względnej o około 0,5–0,6%.

Wyliczona moc chłodnicza parownika mieści się w zakresie od około 240 kW do około 340 kW. Temperatura powietrza poddawanego chłodzeniu wyraźnie wpływa na wartość mocy – wzrost tej temperatury o 1°C daje efekt w postaci wzrostu mocy o około 11–14,5 kW, zależnie od typu chłodziarki i wydatku przepływu powietrza chłodzonego; temperatura powietrza na wylocie rośnie wtedy o około 0,8–0,9°C. Przy wilgotności względnej powietrza przed schłodzeniem równej 80% moc osuszania powietrza w każdym z rozważonych przypadków przekracza moc jego ochładzania – moc osuszania (utajona) stanowi około 55–60%, a moc ochładzania (jawna) około 40–45% całkowitej mocy parownika. Oznacza to, że nieco mniej niż połowa wydajności parownika daje skutek w postaci obniżenia temperatury powietrza, pozostała część jest zużywana na skroplenie pary wodnej zawartej w chłodzonym powietrzu.

Literatura

- [1] Nowak B., Filek K.: *Mathematical description of media parameters changes in the compression refrigerator*. Archives of Mining Sciences, issue 1, vol. 54, 2009
- [2] Häussler W.: *Zastosowanie wykresu i-x w inżynierii sanitarnej*. Warszawa, Arkady, 1971
- [3] Kołodziejczyk L., Rubik M.: *Technika chłodnicza w klimatyzacji*. Warszawa, Arkady, 1976
- [4] Bonca Z., Butrymowicz D., Dambek D., Depta A., Targański W.: *Czynniki chłodnicze i nośniki ciepła. Własności cieplne, chemiczne i eksploatacyjne. Poradnik*. Gdańsk, Wyd. IPPU Masta, 1998
- [5] Nowak B.: *Temperatura i wilgotność powietrza w wyrobiskach korytarzowych przewietrzanych nieszczelnymi lutnociągami*. Rozprawy Monografie, nr 56, Kraków, Wydawnictwa AGH, 1997
- [6] Sinha A.: *Variation of temperature and humidity of cooled air in mine dog heading galleries ventilated through leaky duct lines*. Kraków, AGH, 1996