

*Krzysztof Filek**, *Piotr Łuska***, *Bernard Nowak**

WYKORZYSTANIE CZYNNIKÓW CHŁODNICZYCH R507 I R404A W GÓRNICZEJ CHŁODZIARCE POWIETRZA***

1. Wstęp

Do zwalczania zagrożenia cieplnego w kopalniach podziemnych stosowane są coraz częściej urządzenia chłodnicze – zwykle chłodziarki sprężarkowe, w których do przenoszenia ciepła wykorzystuje się czynniki chłodnicze. Są nimi ciecze niskowrzące; ostatnio coraz powszechniej używa się czynników niezawierających niszczącego ziemską warstwę ozonową chloru.

Tematem artykułu jest praca górnicy chłodziarki sprężarkowej typu TS-300 wypełnionej czynnikiem chłodniczym R404A lub R507. Dla każdego z tych czynników przeprowadzono, na stacji prób chłodziarek bezpośredniego działania [1, 2], pomiary wywołanych pracą chłodziarki zmian parametrów termodynamicznych chłodzonego powietrza oraz określono na ich podstawie moc cieplną parownika.

Zbadano 90 wariantów chłodzenia powietrza (po 45 dla każdego z wymienionych czynników chłodniczych) różniących się takimi parametrami powietrza przed schłodzeniem, jak temperatura (3 wartości) i wilgotność względna (3 wartości) oraz natężenie przepływu przez parownik (5 wartości). Dla tych samych danych wejściowych, w oparciu o publikowany wcześniej matematyczny opis [4–6], wykonano także obliczenia parametrów powietrza schłodzonego; poniżej przedstawiono równania dotyczące parownika chłodziarki.

Zarówno wyniki pomiarów, jak i obliczeń zestawiono w tabelach, przy czym ograniczono się jedynie do wariantów dotyczących parametrów powietrza najbardziej odpowiadających warunkom kopalnianym.

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** „Termospec” Sp. z o.o.

*** Artykuł powstał w ramach projektu badawczego nr 5 T12 A01425 finansowanego przez MNiI

2. Matematyczny opis parownika

Tworząc matematyczny model przeciwprądowego parownika [4–6], przyjęto upraszczające założenia:

- kondensacja pary wodnej zawartej w chłodzonym powietrzu następuje dopiero od tego przekroju parownika, 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;
- przepływy powietrza i czynnika chłodniczego w parowniku odbywają się tylko w kierunku równoległym do podłużnej jego osi;
- ciśnienia powietrza i czynnika chłodniczego wzdłuż parownika nie zmieniają się, ciśnienie czynnika chłodniczego w parowniku jest równe ciśnieniu parowania p_0 ;
- masa przepływu, pole powierzchni wymiany ciepła oraz objętość zajmowana przez powietrze i czynnik chłodniczy w parowniku są równomiernie rozłożone wzdłuż jego osi;
- nie ma wymiany ciepła przez zewnętrzne ściany parownika;
- opór cieplny przepływu parownika jest pomijalnie mały;
- nie ma przewodzenia ciepła w kierunku równoległym do podłużnej osi parownika;
- czynnik chłodniczy dopływa do parownika w postaci mieszaniny cieczy i pary (o temperaturze równej temperaturze parowania przy panującym w nim ciśnieniu), a wypływa w postaci pary nienasyconej (przegrzanej).

Równania matematycznego opisu przeciwprądowego parownika, jak również sposób ich wyprowadzenia w oparciu o bilanse entalpii powietrza, przepływu (ścianek miedzianych rurek parownika) i czynnika chłodniczego podano w [6], poniżej przytoczono jedynie ich końcową postać.

W równaniach użyto następujących oznaczeń:

- b — bezwzględne ciśnienie powietrza [Pa],
- b_f — współczynnik bocznikowania parownika [–],
- c_c — ciepło właściwe wody [J/(kg·K)],
- c_{c0} — ciepło właściwe ciekłego czynnika chłodniczego przy ciśnieniu parowania p_0 [J/(kg·K)],
- c_p — ciepło właściwe powietrza suchego przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],
- c_{p0} — ciepło właściwe pary czynnika chłodniczego przy stałym ciśnieniu p_0 [J/(kg·K)],
- c_w — ciepło właściwe pary wodnej przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],
- F_{pw} — pole wewnętrznej powierzchni przepływu parownika [m²],
- F_{pz} — pole zewnętrznej powierzchni przepływu parownika [m²],
- L_p — długość wymiennika ciepła w parowniku [m],
- p_0 — ciśnienie czynnika chłodniczego w parowniku [Pa],
- Q — strumień objętościowy powietrza w parowniku [m³/s],
- Q_m — strumień masowy powietrza w parowniku (odniesiony do powietrza suchego) [kg/s],
- Q_{mf} — strumień masowy czynnika chłodniczego w parowniku [kg/s],
- r_p — utajone ciepło parowania/kondensacji wody [J/kg],

- $r_{p/0}$ — utajone ciepło parowania czynnika chłodniczego przy ciśnieniu p_0 [J/kg],
- s_p — współrzędna bieżąca w parowniku [m],
- s_{pg} — współrzędna graniczna parowania czynnika chłodniczego w parowniku [m],
- s_{pw} — współrzędna graniczna kondensacji pary wodnej w parowniku [m],
- t_1 — temperatura powietrza na wlocie parownika [°C],
- t_2 — temperatura powietrza schłodzonego (na wylocie parownika) [°C],
- t_c — temperatura chłodzonej części powietrza (sformułowanie „chłodzona część powietrza” dotyczy uczestniczącej w wymianie ciepła części $(1-b_f)$) [°C],
- t_{f0} — temperatura parowania czynnika chłodniczego przy ciśnieniu p_0 [°C],
- t_{fp} — temperatura czynnika chłodniczego w parowniku [°C],
- t_{fp1} — temperatura pary czynnika chłodniczego na wylocie parownika [°C],
- t_{pr} — temperatura punktu rosy powietrza przed schłodzeniem [°C],
- x_1 — wilgotność właściwa powietrza na wlocie parownika [kg pary wodnej/kg suchego powietrza],
- x_2 — wilgotność właściwa powietrza schłodzonego (na wylocie parownika) [kg pary wodnej/kg suchego powietrza],
- x_c — wilgotność właściwa chłodzonej części powietrza w parowniku [kg pary wodnej/kg suchego powietrza],
- x_n — wilgotność właściwa powietrza nasyconego parą wodną [kg pary wodnej/kg suchego powietrza],
- α_{pw} — współczynnik przejmowania ciepła przez czynnik chłodniczy na wewnętrznej powierzchni przepony parownika [$W/(m^2 \cdot K)$],
- α_{pz} — współczynnik przejmowania ciepła od powietrza na zewnętrznej powierzchni przepony parownika [$W/(m^2 \cdot K)$],
- χ_p — stopień suchości czynnika chłodniczego w parowniku, zdefiniowany jako stosunek masy jego fazy gazowej do masy całkowitej [-],
- χ_{p1} — stopień suchości czynnika chłodniczego na wlocie parownika (w przekroju $s_p = L_p$) [-],
- φ_1 — wilgotność względna powietrza na wlocie parownika [%],
- φ_2 — wilgotność względna powietrza na wylocie parownika [%].

Z wymienionym wyżej jako pierwsze założeniem związany jest umowny podział parownika na dwie strefy (od strony powietrza): strefę chłodzenia suchego rozciągającą się od wlotu ($s_p = 0$) do przekroju, w którym średnia temperatura powietrza spada do poziomu punktu rosy ($s_p = s_{pw}$), oraz strefę chłodzenia mokrego (od $s_p = s_{pw}$ do $s_p = L_p$). Podobnie jakościowo różne zjawiska zachodzą wewnątrz rurek parownika; od strony czynnika chłodniczego podzielono zatem parownik również na dwie strefy: strefę pary mokrej (od $s_p = s_{pg}$ do $s_p = L_p$) i strefę pary suchej (od $s_p = 0$ do $s_p = s_{pg}$). W efekcie tego w ogólnym przypadku w parowniku wyróżnia się trzy strefy – od strony wlotu powietrza strefę suchego chłodzenia powietrza i suchej pary czynnika chłodniczego, od strony wlotu czynnika chłodniczego strefę mokrego chłodzenia powietrza i mokrej pary czynnika chłodniczego oraz rozdzielającą te dwie strefę pośrednią, w której alternatywnie występują suche chłodzenie z mokrą parą czynnika bądź mokre chłodzenie z suchą parą czynnika. W poniższych rów-

nianiach użyto górnych indeksów ⁽¹⁾, ⁽²⁾ i ⁽³⁾ dla rozróżnienia poszukiwanych wielkości w poszczególnych strefach parownika: temperatury (t_c) i wilgotności właściwej (x_c) chłodzonej części powietrza oraz temperatury (t_{fp}) i stopnia suchości (χ_p) czynnika chłodniczego.

Równania matematycznego modelu parownika mają postać:

- w strefie suchego chłodzenia powietrza i suchej przegrzanej pary czynnika chłodniczego, gdzie $x_c^{(1)}(s_p) = x_1$, $\chi_p^{(1)}(s_p) = 1$

$$\begin{cases} \frac{dt_c^{(1)}}{ds_p} = - \frac{\alpha_{pz} F_{pz} \alpha_{pw} F_{pw}}{Q_m L_p (1 - b_f) (c_p + c_w x_1) (\alpha_{pz} F_{pz} + \alpha_{pw} F_{pw})} (t_c^{(1)} - t_{fp}^{(1)}) \\ \frac{dt_{fp}^{(1)}}{ds_p} = - \frac{\alpha_{pz} F_{pz} \alpha_{pw} F_{pw}}{Q_{mf} L_p c_{pf0} (\alpha_{pz} F_{pz} + \alpha_{pw} F_{pw})} (t_c^{(1)} - t_{fp}^{(1)}) \end{cases} \quad (1)$$

- w strefie suchego chłodzenia powietrza i mokrej pary czynnika chłodniczego, gdzie $x_c^{(2)}(s_p) = x_1$, $t_{fp}^{(2)}(s_p) = t_{f0} = \text{const}$

$$\begin{cases} \frac{dt_c^{(2)}}{ds_p} = - \frac{\alpha_{pz} F_{pz} \alpha_{pw} F_{pw}}{Q_m L_p (1 - b_f) (c_p + c_w x_1) (\alpha_{pz} F_{pz} + \alpha_{pw} F_{pw})} (t_c^{(2)} - t_{f0}) \\ \frac{d\chi_p^{(2)}}{ds_p} = - \frac{\alpha_{pz} F_{pz} \alpha_{pw} F_{pw}}{Q_{mf} L_p [r_{pf0} - (c_{cf0} - c_{pf0}) t_{f0}] (\alpha_{pz} F_{pz} + \alpha_{pw} F_{pw})} (t_c^{(2)} - t_{f0}) \end{cases} \quad (2)$$

- w strefie mokrego chłodzenia powietrza i suchej przegrzanej pary czynnika chłodniczego, gdzie $x_c^{(2)}(s_p) = x_n(t_c^{(2)})$, $\chi_p^{(2)}(s_p) = 1$

$$\begin{cases} \frac{dt_c^{(2)}}{ds_p} = - \frac{\alpha_{pz} F_{pz} \alpha_{pw} F_{pw}}{Q_m L_p (1 - b_f) [c_p + c_w x_c^{(2)} + (r_p + c_w t_c^{(2)} - c_c t_c^{(2)}) \Phi] (\alpha_{pz} F_{pz} + \alpha_{pw} F_{pw})} (t_c^{(2)} - t_{fp}^{(2)}) \\ \frac{dt_{fp}^{(2)}}{ds_p} = - \frac{\alpha_{pz} F_{pz} \alpha_{pw} F_{pw}}{Q_{mf} L_p c_{pf0} (\alpha_{pz} F_{pz} + \alpha_{pw} F_{pw})} (t_c^{(2)} - t_{fp}^{(2)}) \end{cases} \quad (3)$$

- w strefie mokrego chłodzenia powietrza i mokrej pary czynnika chłodniczego, gdzie $x_c^{(3)}(s_p) = x_n(t_c^{(3)})$, $t_{fp}^{(3)}(s_p) = t_{f0} = \text{const}$

$$\begin{cases} \frac{dt_c^{(3)}}{ds_p} = - \frac{\alpha_{pz} F_{pz} \alpha_{pw} F_{pw}}{Q_m L_p (1 - b_f) [c_p + c_w x_c^{(3)} + (r_p + c_w t_c^{(3)} - c_c t_c^{(3)}) \Phi] (\alpha_{pz} F_{pz} + \alpha_{pw} F_{pw})} (t_c^{(3)} - t_{f0}) \\ \frac{d\chi_p^{(3)}}{ds_p} = - \frac{\alpha_{pz} F_{pz} \alpha_{pw} F_{pw}}{Q_{mf} L_p [r_{pf0} - (c_{cf0} - c_{pf0}) t_{f0}] (\alpha_{pz} F_{pz} + \alpha_{pw} F_{pw})} (t_c^{(3)} - t_{f0}) \end{cases} \quad (4)$$

Równania (3) i (4) występują w modelu alternatywnie w zależności od tego, która z dwóch współrzędnych granicznych (s_{pg} czy s_{pw}) jest większa. Wielkości Φ i $x_n(t_c)$ określone są zależnościami

$$\Phi = \frac{379,8 \cdot 237,29 \cdot 7,5 \cdot \ln 10 \cdot b \cdot 10^u}{[(t_c + 237,29)(b - 610,6 \cdot 10^u)]^2} \quad (5)$$

$$x_n(t_c) = \frac{379,8 \cdot 10^u}{b - 610,6 \cdot 10^u} \quad (6)$$

gdzie

$$u = \frac{7,5 t_c}{t_c + 237,29} \quad (7)$$

przy czym we wzorach (5)–(7) należy podstawiać t_c odpowiadające rozważanej strefie, czyli $t_c^{(2)}$ lub $t_c^{(3)}$.

Warunki brzegowe do równań (1)–(4) są następujące:

— do układu równań (1):

$$t_c^{(1)}(s_p = 0) = t_1 \quad (8)$$

$$t_{fp}^{(1)}(s_p = s_{pg}) = t_{f0} \quad \text{dla} \quad s_{pg} < s_{pw} \quad (9)$$

$$t_{fp}^{(1)}(s_p = s_{pw}) = t_{fp}^{(2)}(s_p = s_{pw}) \quad \text{dla} \quad s_{pg} > s_{pw} \quad (10)$$

— do układu równań (2):

$$t_c^{(2)}(s_p = s_{pg}) = t_c^{(1)}(s_p = s_{pg}) \quad (11)$$

$$\chi_p^{(2)}(s_p = s_{pw}) = \chi_p^{(3)}(s_p = s_{pw}) \quad (12)$$

— do układu równań (3):

$$t_c^{(2)}(s_p = s_{pw}) = t_{pr} \quad (13)$$

$$t_{fp}^{(2)}(s_p = s_{pg}) = t_{f0} \quad (14)$$

— do układu równań (4):

$$t_c^{(3)}(s_p = s_{pw}) = t_{pr} \quad \text{dla} \quad s_{pg} < s_{pw} \quad (15)$$

$$t_c^{(3)}(s_p = s_{pg}) = t_c^{(2)}(s_p = s_{pg}) \quad \text{dla} \quad s_{pg} > s_{pw} \quad (16)$$

$$\chi_p^{(3)}(s_p = L_p) = \chi_{p1} \quad (17)$$

Współrzędne graniczne s_{pg} i s_{pw} wyznacza się z warunków:

$$\chi_p^{(2)}(s_p = s_{pg}) = 1 \quad \text{dla} \quad s_{pg} < s_{pw} \quad (18)$$

$$\chi_p^{(3)}(s_p = s_{pg}) = 1 \quad \text{dla} \quad s_{pg} > s_{pw} \quad (19)$$

$$t_c^{(2)}(s_p = s_{pw}) = t_{pr} \quad \text{dla} \quad s_{pg} < s_{pw} \quad (20)$$

$$t_c^{(3)}(s_p = s_{pw}) = t_{pr} \quad \text{dla} \quad s_{pg} > s_{pw} \quad (21)$$

3. Czynniki chłodnicze R507 i R404A

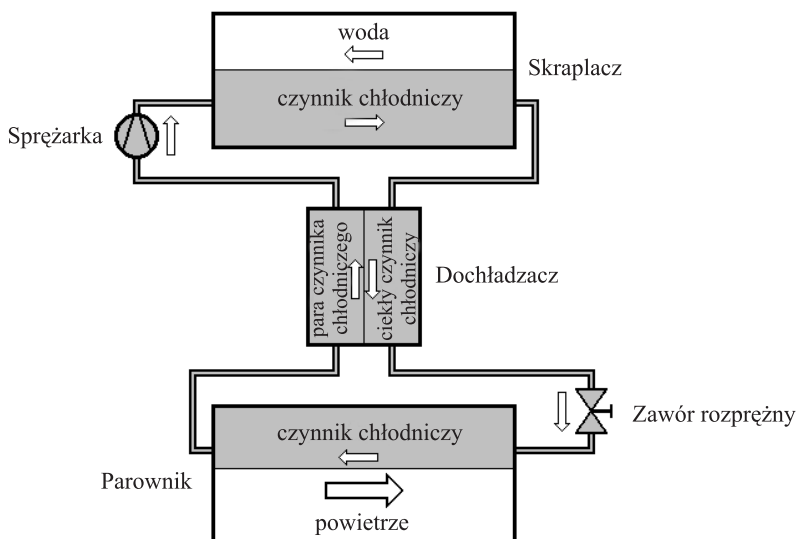
Czynnik chłodniczy R507 [3] jest azeotropową mieszaniną dwóch czynników o równych udziałach wagowych (po 50%) – R125 i R143a. Cechą mieszanin azeotropowych jest to, że ich wrzenie pod stałym ciśnieniem zachodzi przy stałej temperaturze bez zmiany składu, co korzystnie odróżnia je od mieszanin zeotropowych, których temperatura wrzenia pod stałym ciśnieniem zmienia się w zależności od składu, a ten z kolei zmienia się podczas wrzenia na skutek łatwiejszego odparowania składnika bardziej lotnego. Czynniki R125 jest związkiem o wzorze $\text{CHF}_2\text{-CF}_3$, jego potencjał niszczenia warstwy ozonowej (ODP) wynosi 0, a potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP) 3200. Czynniki R143a ($\text{CF}_3\text{-CH}_3$) ma potencjał ODP równy 0 i potencjał GWP równy 4400. Dla R507 ODP wynosi 0, a GWP – 3800.

Czynnik chłodniczy R404A [3] jest zbliżoną do azeotropowej mieszaniną trzech czynników: R143a, którego udział wagowy w mieszaninie wynosi 52%, R125 o udziale wagowym 44% i R134a ($\text{CH}_2\text{F-CF}_3$) o udziale wagowym 4%. Każdy z tych składników zaliczyć można do grupy węglowodorów częściowo fluorowanych, niezawierających atomów chloru (substancje HFC). Wskaźnik GWP czynnika R134a wynosi 1300, a wskaźnik ODP równy jest 0. Natomiast GWP całej mieszaniny R404A wynosi 3700, a jej ODP, podobnie jak w przypadku czynnika R507, równy jest 0.

4. Chłodziarka TS-300

Chłodziarka TS-300 składa się z pięciu zasadniczych elementów: parownika stanowiącego chłodnicę powietrza bezpośredniego działania, sprężarki, wewnętrznego wymiennika ciepła (tzw. dochładacza), skraplacza i zaworu rozprężnego, połączonych przewodami, którymi w układzie zamkniętym przepływa czynnik chłodniczy; schemat przepływu czynnika chłodniczego, chłodzonego powietrza i wody chłodzącej przedstawiono na rysunku 1.

Chłodnica powietrza (parownik) chłodziarki TS-300 ma kształt węzownicowego wymiennika ciepła zbudowanego z odpowiednio wygiętych miedzianych rurek, wewnątrz których przepływa parujący czynnik chłodniczy, a na zewnątrz chłodzone powietrze. Parownik, w odróżnieniu od pozostałych elementów (sprężarki wraz z silnikiem, dochładacza, skraplacza i zaworu rozprężnego) tworzących tzw. zespół maszynowy, stanowi oddzielny element połączony z resztą układu elastycznymi przewodami.



Rys. 1. Schemat przepływu powietrza, wody i czynnika chłodniczego przez chłodziarkę TS-300

5. Wyniki obliczeń i pomiarów parametrów powietrza oraz mocy chłodziarki TS-300

Badań eksperymentalnych parametrów pracy chłodziarki TS-300 dokonywano na wspomnianym stanowisku pomiarowym w stacji prób chłodziarek. W tabelach 1 i 2 pokazano rezultaty pomiarów, którymi objęto następujące wielkości:

- ciśnienie powietrza (b , kPa) – mierzono aneroidem elektronicznym typu PAE-03,
- objętościowe natężenie przepływu powietrza (Q , m³/min) – wynik mnożenia średniej prędkości przepływu na wlocie parownika (pomiar anemometrem skrzydełkowym typu μ As) i pola powierzchni wlotowej,
- temperaturę powietrza na wlocie parownika (t_1 , °C) – pomiar termometrem suchym,
- temperaturę powietrza na wlocie parownika (t_{1m} , °C) – pomiar termometrem wilgotnym,
- temperaturę powietrza na wylocie parownika (t_2 , °C) – pomiar termometrem suchym,
- temperaturę powietrza na wylocie parownika (t_{2m} , °C) – pomiar termometrem wilgotnym.

Pomiary temperatury powietrza (punkty c)–f)) przeprowadzono przy użyciu psychrometrów aspiracyjnych Assmanna.

Oprócz powyższych w tabeli 1 podano wielkości wyliczone z danych pomiarowych:

- wilgotność właściwą powietrza na wlocie parownika (x_1 , g/kg),
- wilgotność względną powietrza na wlocie parownika (φ_1 , %),
- wilgotność właściwą powietrza na wylocie parownika (x_2 , kg/kg),
- wilgotność względną powietrza na wylocie parownika (φ_2 , %),
- moc chłodniczą parownika (N_p , kW).

TABELA 1
Wyniki pomiarów i obliczeń parametrów powietrza oraz mocy parownika chłodziarki TS-300 z czynnikiem chłodniczym R507

Wariant	Dane wejściowe							Wyniki pomiarów					Wyniki obliczeń			
	b	Q	t_1	t_{1m}	x_1	φ_1	t_2	t_{2m}	x_2	φ_2	N_p	t_2	x_2	φ_2	N_p	
	kPa	m ³ /min	°C	°C	g/kg	%	°C	°C	g/kg	%	kW	°C	g/kg	%	kW	
1	105,0	498	30,0	27,0	20,53	79,1	18,6	18,4	12,71	98,1	301,9	18,05	12,40	99,12	315,0	
2	105,0	498	29,8	27,8	22,31	86,7	19,0	19,0	13,29	100	323,9	18,85	13,17	100	328,3	
3	105,0	498	31,6	28,2	22,00	77,2	19,4	19,2	13,38	98,1	326,8	19,35	13,43	98,85	326,0	
4	105,0	498	31,4	29,4	24,38	86,2	21,0	21,0	15,09	100	323,6	20,55	14,64	99,87	338,6	
5	102,0	552	30,0	27,2	21,54	80,5	19,2	19,0	13,62	98,2	321,1	19,01	13,55	98,96	324,6	
6	102,0	552	29,8	27,8	22,74	85,8	19,8	19,8	14,41	100	322,3	19,51	14,09	99,66	333,6	
7	102,0	552	31,6	28,6	23,47	79,8	20,6	20,4	14,88	98,2	337,2	20,50	14,88	98,83	338,3	
8	102,0	552	31,4	29,6	25,55	87,6	21,8	21,6	16,05	98,3	344,4	21,76	16,25	99,72	339,7	
9	106,4	606	29,8	26,8	19,96	78,9	19,2	19,0	13,03	98,1	336,4	19,09	12,98	98,45	339,1	
10	106,4	606	29,6	27,6	21,46	85,6	20,4	20,4	14,33	100	321,2	20,07	13,94	99,35	339,7	
11	106,4	606	31,6	28,4	22,05	78,4	21,2	21,0	14,80	98,2	340,3	21,09	14,70	98,25	344,4	
12	106,4	606	31,6	29,4	23,92	84,8	22,4	22,2	15,96	98,3	345,1	22,24	15,94	99,11	347,6	

TABELA 2
Wyniki pomiarów i obliczeń parametrów powietrza oraz mocy parownika chłodziarki TS-300 z czynnikiem chłodniczym R404A

Wariant	Dane wejściowe						Wyniki pomiarów						Wyniki obliczeń			
	b kPa	Q m ³ /min	t_1 °C	t_{1m} °C	x_1 g/kg	φ_1 %	t_2 °C	t_{2m} °C	x_2 g/kg	φ_2 %	N_p kW	t_2 °C	x_2 g/kg	φ_2 %	N_p kW	
1	99,7	504	30,0	27,4	22,48	82,0	18,8	18,4	13,31	96,3	318,4	19,49	14,34	99,17	288,1	
2	99,7	504	30,0	28,4	24,39	88,7	20,6	20,4	15,23	98,2	299,8	20,25	15,17	99,96	304,6	
3	99,7	504	31,6	28,4	23,68	78,7	20,0	19,8	14,66	98,2	316,7	20,31	15,04	98,83	305,1	
4	99,7	504	31,6	29,6	26,09	86,4	21,6	21,4	16,23	98,3	319,3	21,60	16,46	99,66	313,9	
5	99,0	546	29,8	27,2	22,36	81,9	19,2	18,8	13,76	96,4	322,4	19,75	14,65	98,96	294,7	
6	99,0	546	29,6	27,8	23,59	87,3	19,8	19,8	14,85	100	317,3	20,13	15,12	99,67	307,2	
7	99,0	546	31,6	28,4	23,87	78,7	20,8	20,6	15,54	98,2	315,0	20,65	15,45	98,61	318,8	
8	99,0	546	31,8	29,8	26,62	86,4	22,2	22,2	17,28	100	325,6	22,00	16,99	99,57	334,7	
9	100,1	600	29,8	27,0	21,73	80,6	19,2	19,0	13,87	98,2	338,3	19,96	14,61	98,54	309,1	
10	100,1	600	29,6	27,4	22,56	84,5	19,8	19,6	14,41	98,2	336,4	20,20	14,92	99,12	317,8	
11	100,1	600	32,0	29,0	24,58	80,1	22,0	21,8	16,57	98,3	331,8	22,10	16,70	98,41	327,1	
12	100,1	600	31,6	29,6	25,98	86,4	22,6	22,4	17,21	98,3	340,5	22,59	17,37	99,30	336,2	

Do wyliczenia wartości parametrów wymienionych w punktach g)–k) użyto następujących wzorów [6]:

— do obliczenia wilgotności właściwej x_1

$$x_1 = \frac{379,8 \cdot 10^{m_1} - 4,1161 \cdot 10^{-4} (t_1 - t_{1m})b}{b - 610,6 \cdot 10^{m_1} + 6,6176 \cdot 10^{-4} (t_1 - t_{1m})b}, \quad \text{gdzie } m_1 = \frac{7,5t_{1m}}{t_{1m} + 237,29} \quad (22)$$

— do obliczenia wilgotności względnej φ_1

$$\varphi_1 = \frac{x_1 (0,622 + x_{n1})}{x_{n1} (0,622 + x_1)}, \quad \text{gdzie: } x_{n1} = \frac{379,8 \cdot 10^{s_1}}{b - 610,6 \cdot 10^{s_1}}, \quad s_1 = \frac{7,5t_1}{t_1 + 237,29} \quad (23)$$

— do obliczenia wilgotności właściwej x_2

$$x_2 = \frac{379,8 \cdot 10^{m_2} - 4,1161 \cdot 10^{-4} (t_2 - t_{2m})b}{b - 610,6 \cdot 10^{m_2} + 6,6176 \cdot 10^{-4} (t_2 - t_{2m})b}, \quad \text{gdzie } m_2 = \frac{7,5t_{2m}}{t_{2m} + 237,29} \quad (24)$$

— do obliczenia wilgotności względnej φ_2

$$\varphi_2 = \frac{x_2 (0,622 + x_{n2})}{x_{n2} (0,622 + x_2)}, \quad \text{gdzie: } x_{n2} = \frac{379,8 \cdot 10^{s_2}}{b - 610,6 \cdot 10^{s_2}}, \quad s_2 = \frac{7,5t_2}{t_2 + 237,29} \quad (25)$$

— do obliczenia mocy cieplnej parownika N_p

$$N_p = Q_m [c_p (t_1 - t_2) + c_w (t_1 x_1 - t_2 x_2)] + Q_m (r_p - c_c t_2) (x_1 - x_2) \quad (26)$$

W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań 12 (spośród 45) wariantów pracy chłodziarki z czynnikiem R507. Temperatura i wilgotność względna powietrza na wlocie parownika przyjmowała w tej serii badań wartości z przedziałów $(29,6 \div 31,6)^\circ\text{C}$ i $(77,2 \div 87,6)\%$. W tabeli 2, uwzględniając wyniki 12 wariantów spośród 45, pokazano rezultaty pomiarów wykonanych podczas pracy chłodziarki z czynnikiem R404A. W serii badań z tym czynnikiem temperatura i wilgotność względna powietrza na wlocie parownika przyjmowała wartości z przedziałów $(29,6 \div 32,0)^\circ\text{C}$ i $(78,7 \div 88,7)\%$. Jak widać, w obu przypadkach przedziały te określają w przybliżeniu wymagające schładzania powietrza warunki kopalniane.

W tabeli 3 zestawiono, zarówno dla R507, jak i dla R404A, wyniki porównania rezultatów pomiarów z rezultatami obliczeń. Podano wartości odchyłek bezwzględnych i względnych dwóch wielkości: temperatury powietrza schłodzonego i mocy cieplnej parownika. Odchyłki bezwzględne (Δt_2 i ΔN_p) i względne (δt_2 i δN_p) wyliczono z zależności:

$$\Delta t_2 = t_{2,obl} - t_{2,pom} \quad (27)$$

$$\Delta N_p = N_{p,obl} - N_{p,pom} \quad (28)$$

$$\delta t_2 = \frac{\Delta t_2}{t_{2,pom}} \quad (29)$$

$$\delta N_p = \frac{\Delta N_p}{N_{p,pom}} \quad (30)$$

gdzie:

$t_{2,obl}, N_{p,obl}$ — wartości otrzymane drogą obliczeń,
 $t_{2,pom}, N_{p,pom}$ — wartości otrzymane drogą pomiarów.

TABELA 3

Odchyłki wyliczonych temperatur powietrza schłodzonego i mocy parownika chłodziarki TS-300 od wartości pomierzonych

Wariant	Czynnik chłodniczy R507				Czynnik chłodniczy R404A			
	Odchyłka temperatury powietrza schłodzonego		Odchyłka mocy parownika		Odchyłka temperatury powietrza schłodzonego		Odchyłka mocy parownika	
	bez-względna Δt_2 °C	względna δt_2 %	bez-względna ΔN_p kW	względna δN_p %	bez-względna Δt_2 °C	względna δt_2 %	bez-względna ΔN_p kW	względna δN_p %
1	-0,55	-2,957	13,1	4,339	0,69	3,670	-30,3	-9,516
2	-0,15	-0,789	4,4	1,358	-0,35	-1,699	4,8	1,601
3	-0,05	-0,258	-0,8	-0,245	0,31	1,550	-11,6	-3,663
4	-0,45	-2,143	15,0	4,635	0,00	0,000	-5,4	-1,691
5	-0,19	-0,990	3,5	1,090	0,55	2,865	-27,7	-8,592
6	-0,29	-1,465	11,3	3,506	0,33	1,667	-10,1	-3,183
7	-0,10	-0,485	1,1	0,326	-0,15	-0,721	3,8	1,206
8	-0,04	-0,183	-4,7	-1,365	-0,20	-0,901	9,1	2,795
9	-0,11	-0,573	2,7	0,803	0,96	5,000	-29,2	-8,631
10	-0,33	-1,618	18,5	5,760	0,60	3,030	-18,6	-5,529
11	-0,11	-0,519	4,1	1,205	0,10	0,455	-4,7	-1,417
12	-0,16	-0,714	2,5	0,724	0,19	0,841	-4,3	-1,263

6. Podsumowanie, uwagi końcowe

Podane w tabelach 1–3 wartości pozwalają stwierdzić, że:

- otrzymana z pomiarów moc cieplna parownika chłodziarki TS-300 nie zależy od tego, czy użyto w niej czynnika chłodniczego R507 czy R404A; różnica średniej arytmetycznej mocy $N_{p,R507}$ (328,7 kW) i $N_{p,R404A}$ (323,5 kW) wynosi tylko około 5,2 kW, co stanowi około 1,6%;

- daje się zauważyć około 6,5-procentową różnicę (na korzyść czynnika R507) między średnimi mocami parownika otrzymanymi drogą obliczeń;
- podobne jakościowo wnioski można też odnieść do obniżenia temperatury powietrza w parowniku; średnie pomierzone spadki tej temperatury wynoszą $\Delta t_{2,R507} = 10,47^{\circ}\text{C}$ i $\Delta t_{2,R404A} = 10,20^{\circ}\text{C}$, zaś średnie obliczone $\Delta t_{2,R507} = 10,68^{\circ}\text{C}$ i $\Delta t_{2,R404A} = 10,00^{\circ}\text{C}$;
- jeśli weźmie się z kolei pod uwagę odchyłki wartości obliczonych od pomierzonych (tab. 3) widać, że w przypadku R507 otrzymano niewielkie średnie obliczeniowe przecenienie możliwości parownika o 5,9 kW mocy i $0,21^{\circ}\text{C}$ chłodzenia powietrza ($N_{p,pom} = 328,7$ kW przy $N_{p,obl} = 334,6$ kW, i $\Delta t_{2,pom} = 10,47^{\circ}\text{C}$ przy $\Delta t_{2,obl} = 10,68^{\circ}\text{C}$), zaś w przypadku R404A jego niedocenylenie o 10,4 kW i $0,25^{\circ}\text{C}$ ($N_{p,pom} = 323,5$ kW przy $N_{p,obl} = 313,1$ kW i $\Delta t_{2,pom} = 10,20^{\circ}\text{C}$ przy $\Delta t_{2,obl} = 10,00^{\circ}\text{C}$).

LITERATURA

- [1] Badania eksperymentalne górniczej sprężarkowej chłodziarki powietrza o działaniu bezpośrednim z czynnikiem R404A i R407C. Żory, „Termospec” Sp. z o.o. (praca niepublikowana)
- [2] Badania eksperymentalne górniczej sprężarkowej chłodziarki powietrza o działaniu bezpośrednim z czynnikiem R507. Żory, „Termospec” Sp. z o.o. (praca niepublikowana)
- [3] *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
- [4] *Filek K., Nowak B.*: Mathematical description of the operation of mining electric air refrigerator. Archives of Mining Sciences, vol. 47, z. 3, 2002
- [5] *Filek K., Nowak B.*: Chłodzenie powietrza górniczą chłodziarką sprężarkową z czynnikiem R507. Kwartalnik AGH Górnictwo i Geoinżynieria, z. 4, 2004
- [6] *Filek K., Nowak B.*: Chłodzenie powietrza górniczą chłodziarką przeponową o działaniu bezpośrednim. Kraków, Wydawnictwa Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, seria Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej 2002