

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

ZMIANA PARAMETRÓW TERMODYNAMICZNYCH POWIETRZA W PAROWNIKU CHŁODZIARKI GÓRNICZEJ Z CZYNNIKIEM R407C***

1. Wstęp

Górnice chłodziarki sprężarkowe (urządzenia najczęściej stosowane do obniżania temperatury powietrza w polskich kopalniach) są w ciągu ostatnich kilku lat napełniane proekologicznymi czynnikami chłodniczymi. Substancje te nie zawierają w swoim składzie chloru, przez co są bezpieczne dla ochronnej warstwy ozonowej Ziemi. Można do nich zaliczyć między innymi czynniki chłodnicze:

- R404A,
- R507,
- R407C.

W pracy [5] przedstawiono wyniki badań chłodziarki sprężarkowej typu TS-300 z proekologicznymi czynnikami chłodniczymi R404A i R507. Tematem artykułu jest natomiast praca tej chłodziarki wypełnionej czynnikiem chłodniczym R407C; w pewnym sensie można go zatem uznać za kontynuację pracy [5]. Dlatego nie zamieszczono tu ani opisu samej chłodziarki TS-300, ani równań matematycznego opisu sprężarkowej chłodziarki bezpośredniego działania i przyjętych w równaniach założeń upraszczających.

W pracy zamieszczono wyniki pomiarów [1] zmian temperatury i wilgotności powietrza zachodzących w parowniku chłodziarki. Spośród poddanych badaniom 45 wariantów, różniących się temperaturą i wilgotnością względną powietrza przed schłodzeniem oraz natężeniem jego przepływu przez parownik, przedstawiono wyniki 24 wariantów najbardziej zbliżonych do rzeczywistych warunków kopalnianych.

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

** „Termospec” sp. z o.o., Żory

*** Artykuł powstał w ramach projektu badawczego nr 5T12A01425 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji

Wykorzystując równania matematycznego modelu pracy chłodziarki [3, 4], wykonano też numeryczne obliczenia parametrów powietrza schłodzonego i mocy cieplnej parownika dla wariantów pomiarowych, tj. przyjmując rezultaty pomiarów parametrów powietrza przed schłodzeniem jako dane wejściowe do obliczeń.

2. Czynnik chłodniczy R407C [2]

Czynnik chłodniczy R407C jest zeotropową mieszaniną czynników:

- R134a (o masowym udziale 52%),
- R125 (25%),
- R32 (23%).

Jego potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP) równy jest 1600, a potencjał niszczenia warstwy ozonowej (ODP), zarówno każdego ze składników, jak i całej mieszaniny wynosi 0.

Składniki czynnika R407C są związkami jednorodnymi; ich wzory chemiczne i wskaźniki GWP są następujące:

- R134a ($\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3$), GWP = 1300,
- R125 (CHF_2-CF_3), GWP = 3200,
- R134a (CH_2F_2), GWP = 580.

3. Wyniki obliczeń i pomiarów parametrów powietrza oraz mocy chłodziarki TS-300 z czynnikiem R407C

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

- 1) ciśnienie powietrza (b , Pa) — mierzono aneroidem elektronicznym typu PAE-03,
- 2) objętościowe natężenie przepływu powietrza (Q , m^3/s) — wynik mnożenia średniej prędkości przepływu na wlocie parownika (pomiar anemometrem skrzydełkowym typu μAs) i pola powierzchni wlotowej,
- 3) temperaturę powietrza na wlocie parownika (t_1 , °C) — pomiar termometrem suchym,
- 4) temperaturę powietrza na wlocie parownika (t_{1m} , °C) — pomiar termometrem wilgotnym,
- 5) temperaturę powietrza na wylocie parownika (t_2 , °C) — pomiar termometrem suchym,
- 6) temperaturę powietrza na wylocie parownika (t_{2m} , °C) — pomiar termometrem wilgotnym.

TABELA 1
Wyniki pomiarów i obliczeń parametrów powietrza oraz mocy parownika chłodziarki TS-300 z czynnikiem chłodniczym R407C

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			28,0	25,0	19,07	78,6	15,0	14,8	10,58	98,0	254,5	15,37	11,01	99,46	243,9			
2			27,8	26,0	20,88	86,8	16,2	16,2	11,69	100	256,5	16,02	11,56	100	260,2			
3	99,8	396	30,2	27,0	21,62	78,1	16,4	16,0	11,37	96,1	290,0	16,99	12,24	99,50	269,7			
4			30,0	28,2	23,98	87,3	18,0	18,0	13,13	100	286,2	17,82	13,00	100	290,0			
5			32,2	29,0	24,57	78,9	18,4	18,2	13,22	98,1	306,8	18,08	13,17	99,77	310,1			
6			32,0	29,8	26,30	85,2	19,0	18,8	13,74	98,2	321,9	18,98	13,99	100	317,4			
7			28,2	25,2	19,36	78,7	16,6	16,6	12,02	100	283,2	16,41	11,76	99,0	291,1			
8			28,0	26,0	20,84	85,4	17,4	17,4	12,66	100	292,0	17,20	12,48	99,82	298,2			
9	99,6	504	30,4	27,4	22,33	79,5	18,0	17,8	12,90	98,1	335,1	18,54	13,50	99,14	316,2			
10			30,0	27,8	23,26	84,6	19,0	18,8	13,76	98,2	323,0	18,79	13,80	99,77	324,2			
11			31,8	28,4	23,62	77,5	19,8	19,6	14,19	98,2	322,3	19,55	14,36	98,88	327,6			
12			31,6	29,6	26,12	86,4	21,0	20,8	15,64	98,3	338,8	20,42	15,35	100	350,9			
13			28,2	25,0	19,32	77,4	17,8	17,6	12,93	98,1	263,4	17,47	12,70	98,43	272,4			
14			28,0	26,4	21,88	88,3	18,8	18,8	14,05	100	285,1	18,38	13,66	99,91	299,0			
15	98,2	540	30,2	27,4	22,76	80,8	18,8	18,4	13,53	96,3	339,3	19,44	14,48	98,97	309,7			
16			30,0	28,0	24,00	86,0	19,4	19,2	14,33	98,2	341,2	20,08	15,18	99,59	313,7			
17			32,0	28,4	23,90	76,4	20,6	20,4	15,47	98,2	317,0	19,98	14,92	98,51	336,5			
18			31,8	30,0	27,27	87,8	22,0	22,0	17,21	100	339,1	21,64	16,81	99,90	352,2			
19			28,2	25,4	19,95	80,1	18,0	18,0	13,31	100	297,8	18,21	13,29	98,52	295,9			
20			28,0	26,0	21,09	85,5	19,0	18,8	13,92	98,2	297,9	18,60	13,73	99,34	307,7			
21	98,5	600	30,0	27,0	22,03	79,4	19,4	19,0	14,02	96,4	336,3	19,86	14,74	98,39	311,6			
22			29,8	28,0	24,01	87,3	20,8	20,6	15,62	98,3	327,6	20,54	15,57	99,57	331,9			
23			32,2	29,0	24,93	79,0	21,8	21,6	16,64	98,3	338,2	21,42	16,28	98,44	352,1			
24			31,8	29,8	26,76	86,4	22,8	22,6	17,72	98,3	341,0	22,41	17,49	99,41	351,6			

Pomiary temperatury powietrza (punkty 3–6) przeprowadzono przy użyciu psychrometrów aspiracyjnych Assmanna.

Oprócz wcześniej wymienionych podano w tabeli 1 wielkości wyliczone z danych pomiarowych:

- 7) wilgotność właściwą powietrza na wlocie parownika (x_1 , kg/kg),
- 8) wilgotność względną powietrza na wlocie parownika (φ_1 , –),
- 9) wilgotność właściwą powietrza na wylocie parownika (x_2 , kg/kg),
- 10) wilgotność względną powietrza na wylocie parownika (φ_2 , –),
- 11) moc chłodniczą parownika (N_p , kW).

Do wyliczenia wartości parametrów wymienionych w punktach od 7 do 11 użyto następujących wzorów [6]:

— do obliczenia wilgotności właściwej x_1

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

gdzie:

$$m_1 = \frac{7,5t_{1m}}{t_{1m} + 237,29};$$

— do obliczenia wilgotności względnej φ_1

$$\varphi_1 = \frac{x_1 (0,622 + x_{n1})}{x_{n1} (0,622 + x_1)} \quad (2)$$

gdzie:

$$x_{n1} = \frac{379,8 \cdot 10^{s_1}}{b - 610,6 \cdot 10^{s_1}},$$

$$s_1 = \frac{7,5t_1}{t_1 + 237,29};$$

— do obliczenia wilgotności właściwej x_2

$$x_2 = \frac{379,8 \cdot 10^{m_2} - 4,1161 \cdot 10^{-4} (t_2 - t_{2m}) b}{b - 610,6 \cdot 10^{m_2} + 6,6176 \cdot 10^{-4} (t_2 - t_{2m}) b} \quad (3)$$

gdzie:

$$m_2 = \frac{7,5t_{2m}}{t_{2m} + 237,29};$$

— do obliczenia wilgotności względnej φ_2

$$\varphi_2 = \frac{x_2(0,622 + x_{n2})}{x_{n2}(0,622 + x_2)} \quad (4)$$

gdzie:

$$x_{n2} = \frac{379,8 \cdot 10^{s_2}}{b - 610,6 \cdot 10^{s_2}},$$

$$s_2 = \frac{7,5t_2}{t_2 + 237,29};$$

— do obliczenia mocy cieplnej parownika N_p

$$N_p = Q_m [c_p(t_1 - t_2) + c_w(t_1x_1 - t_2x_2)] + Q_m(r_p - c_c t_2)(x_1 - x_2) \quad (5)$$

W tabeli 2 zestawiono 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:

$$\Delta t_2 = t_{2,obl} - t_{2,pom} \quad (6)$$

$$\Delta N_p = N_{p,obl} - N_{p,pom} \quad (7)$$

$$\delta t_2 = \frac{\Delta t_2}{t_{2,pom}} \quad (8)$$

$$\delta N_p = \frac{\Delta N_p}{N_{p,pom}} \quad (9)$$

gdzie:

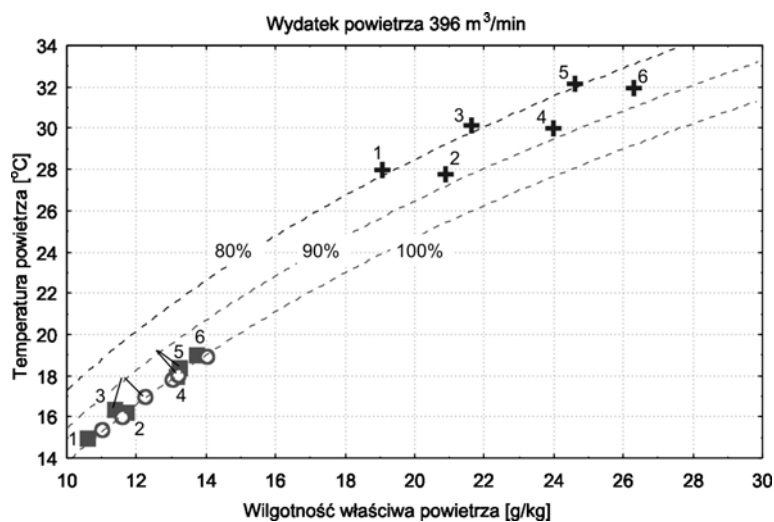
$t_{2,obl}, N_{p,obl}$ — wartości otrzymane z obliczeń,
 $t_{2,pom}, N_{p,pom}$ — wartości otrzymane z pomiarów.

TABELA 2

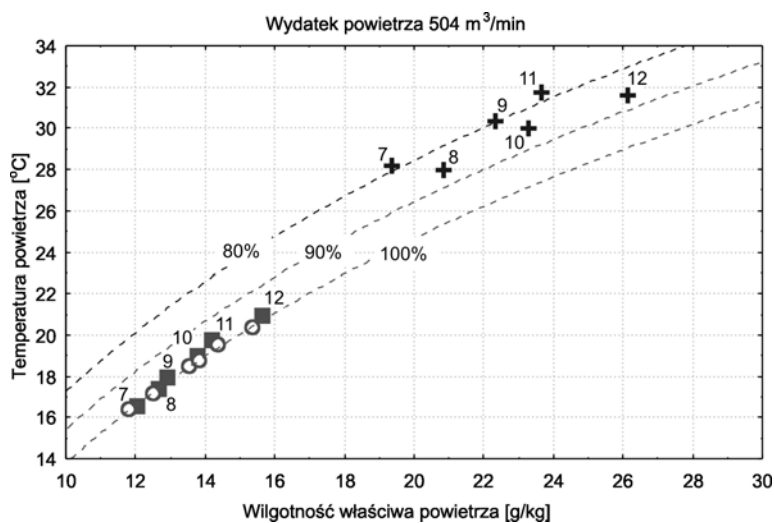
Odchyłki wyliczonych temperatur powietrza schłodzonego i mocy parownika chłodziarki TS-300 z czynnikiem chłodniczym R407C od wartości pomierzonych

Wariant	Odchyłka temperatury powietrza schłodzonego		Odchyłka mocy parownika	
	bezwzględna Δt_2 [°C]	względna δt_2 [%]	bezwzględna ΔN_p [kW]	względna δN_p [%]
1	0,37	2,467	-10,6	-4,165
2	-0,18	-1,111	3,7	1,442
3	0,59	3,598	-20,3	-7,000
4	-0,18	-1,000	3,8	1,328
5	-0,32	-1,739	3,3	1,076
6	-0,02	-0,105	-4,5	-1,398
7	-0,19	-1,145	7,9	2,790
8	-0,20	-1,149	6,2	2,123
9	0,54	3,000	-18,9	-5,640
10	-0,21	-1,105	1,2	0,372
11	-0,25	-1,263	5,3	1,644
12	-0,58	-2,762	12,1	3,571
13	-0,33	-1,854	9,0	3,417
14	-0,42	-2,234	13,9	4,875
15	0,64	3,404	-29,6	-8,724
16	0,68	3,505	-27,5	-8,060
17	-0,62	-3,010	19,5	6,151
18	-0,36	-1,636	13,1	3,863
19	0,21	1,167	-1,9	-0,638
20	-0,40	-2,105	9,8	3,290
21	0,46	2,371	-24,7	-7,345
22	-0,26	-1,250	4,3	1,313
23	-0,38	-1,743	13,9	4,110
24	-0,39	-1,711	10,6	3,109

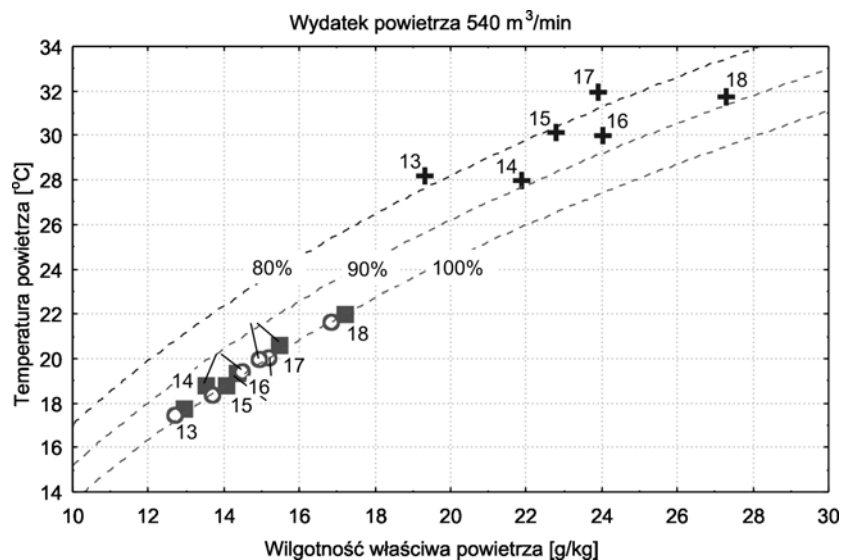
Otrzymane wyniki przedstawiono także na wykresach (rys. 1–5).



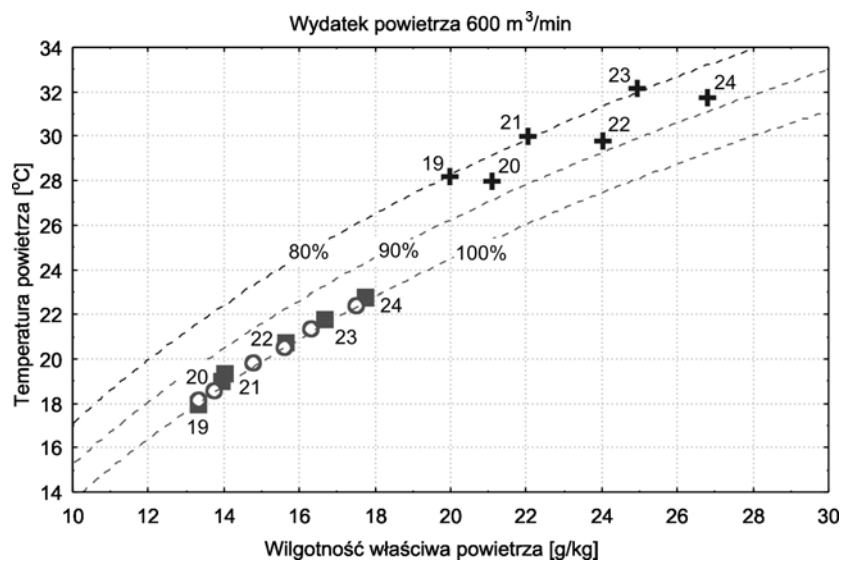
Rys. 1. Warianty od 1 do 6 chłodzenia powietrza chłodziarką TS-300 z czynnikiem chłodniczym R407C. Temperatura i wilgotność właściwa powietrza przed schłodzeniem (+) i po schłodzeniu (■ — pomiary, ○ — obliczenia). Naniesiono numery wariantów i krzywe stałej wilgotności względnej 80, 90 i 100%



Rys. 2. Warianty od 7 do 12 chłodzenia powietrza chłodziarką TS-300 z czynnikiem chłodniczym R407C. Temperatura i wilgotność właściwa powietrza przed schłodzeniem (+) i po schłodzeniu (■ — pomiary, ○ — obliczenia). Naniesiono numery wariantów i krzywe stałej wilgotności względnej 80, 90 i 100%



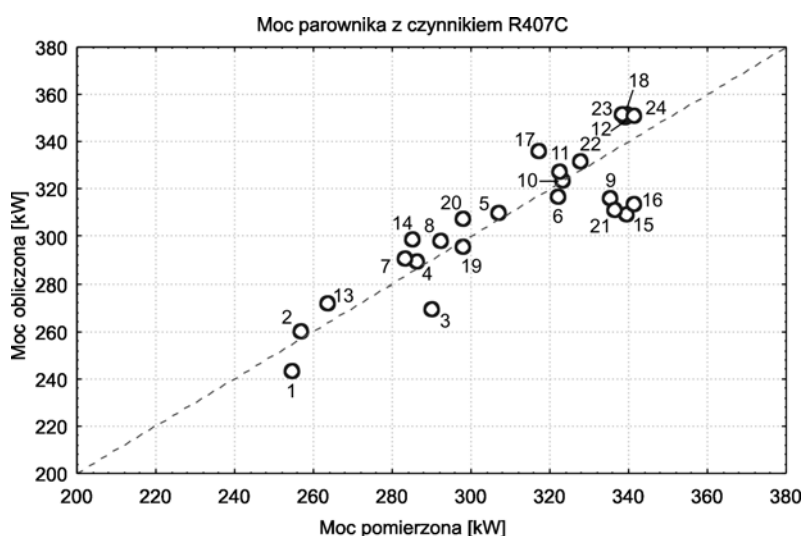
Rys. 3. Warianty od 13 do 18 chłodzenia powietrza chłodziarką TS-300 z czynnikiem chłodniczym R407C. Temperatura i wilgotność właściwa powietrza przed schłodzeniem (+) i po schłodzeniu (■ — pomiary, ○ — obliczenia). Naniesiono numery wariantów i krzywe stałej wilgotności względnej 80, 90 i 100%



Rys. 4. Warianty od 19 do 24 chłodzenia powietrza chłodziarką TS-300 z czynnikiem chłodniczym R407C. Temperatura i wilgotność właściwa powietrza przed schłodzeniem (+) i po schłodzeniu (■ — pomiary, ○ — obliczenia). Naniesiono numery wariantów i krzywe stałej wilgotności względnej 80, 90 i 100%

Na rysunkach od 1 do 4 — grupami po sześć wariantów o takim samym wydatku powietrza — podano jego temperaturę i wilgotność właściwą przed schłodzeniem (wartości wlotowe) i po schłodzeniu (wartości wylotowe), przy czym rozróżniono wartości wylotowe otrzymane drogą pomiarów i obliczeń.

Na rysunku 5 pokazano natomiast moc cieplną parownika w układzie moc pomierzona — moc obliczona.



Rys. 5. Porównanie pomierzonej i obliczonej mocy chłodniczej parownika chłodziarki TS-300 z czynnikiem R407C. Naniesiono numery wariantów

4. Podsumowanie, uwagi końcowe

Podane w tabeli 1 wartości pozwalają stwierdzić, że:

- otrzymana z pomiarów moc cieplna parownika chłodziarki TS-300 z czynnikiem chłodniczym R407C, zależnie od wydatku, temperatury i wilgotności powietrza, przyjmuje wartości z przedziału od 254,5 do 341,2 kW;
- moc cieplna parownika wyliczona z równań dla warunków pomiarowych waha się w nieco szerszych granicach — od 241,9 do 352,2 kW;
- spadek temperatury powietrza w parowniku mieści się w granicach od 9,0 do 13,8°C (pomiary) i od 9,26 do 14,12°C (obliczenia);
- chłodzenie powietrza doprowadza je prawie (w niektórych przypadkach dokładnie) do stanu nasycenia — jego wilgotność względna na wylocie parownika wynikająca z pomiarów wynosi nie mniej niż 96,1%, zaś z wyliczeń nie mniej niż 98,39%;

- największa odchyłka obliczonej temperatury powietrza schłodzonego od wartości pomierzonej (tab. 2) wynosi $0,68^{\circ}\text{C}$;
- największa bezwzględna wartość odchyłki obliczonej mocy cieplnej parownika od wartości pomierzonej (tab. 2) wynosi $29,6\text{ kW}$, co stanowi $8,724\%$ mocy otrzymanej z pomiarów.

Z dwóch ostatnich punktów można wnioskować, że zastosowany do obliczeń matematyczny opis wystarczająco dobrze dla potrzeb praktycznych opisuje rzeczywisty proces chłodzenia powietrza w parowniku sprężarkowej chłodziarki bezpośredniego działania.

LITERATURA

- [1] Badania eksperymentalne górniczej sprężarkowej chłodziarki powietrza o działaniu bezpośrednim z czynnikiem R404A i R407C. „Termospec” sp. z o.o., Żory (praca niepublikowana)
- [2] *Bonca Z., Butrymowicz D., Dambek D., Depta A., Targański W.*: Czynniki chłodnicze i nośniki ciepła. Właściwości cieplne, chemiczne i eksploatacyjne. Poradnik. Wyd. IPPU Masta Gdańsk, 1998
- [3] *Filek K., Nowak B.*: Mathematical description of the operation of mining electric air refrigerator. Archives of Mining Sciences, vol. 47, z. 3, 2002
- [4] *Filek K., Nowak B.*: Chłodzenie powietrza górniczą chłodziarką przeponową o działaniu bezpośrednim. Wydawnictwa Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, seria „Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej”, Kraków, 2002
- [5] *Filek K., Łuska P., Nowak B.*: Wykorzystanie czynników chłodniczych R507 i R404A w górniczej chłodziarce powietrza. Kwartalnik AGH Górnictwo i Geoinżynieria nr 2/2005