

*Krzysztof Filek\*, Bernard Nowak\**

## EKSPERYMENTALNE OKREŚLENIE WPŁYWU DOBORU CZYNNIKA CHŁODNICZEGO NA MOC CIEPLNĄ CHŁODZIARKI SPRĘŻARKOWEJ\*\*

---

### 1. Wstęp

Urządzenia stosowane do chłodzenia powietrza w głębokich kopalniach to najczęściej połączone z wyparnymi chłodnicami wody chłodziarki sprężarkowe. Obniżają one temperaturę powietrza bądź bezpośrednio (w parowniku), bądź pośrednio (w chłodnicy wodnej zasilanej zimną wodą schładzaną w parowniku). W artykule przedstawiono tylko pierwszy z tych sposobów.

Do transportu ciepła w chłodziarkach sprężarkowych są wykorzystywane czynniki chłodnicze — ciecze niskowrzące, tj. takie, których wrzenie zachodzi w stosunkowo niskiej temperaturze. Niszczące ziemską warstwę ozonową, zawierające chlor freony, stosowane powszechnie do niedawna jako czynniki chłodnicze, są ostatnio zastępowane przez czynniki niezawierające chloru. Do grupy tej należą między innymi czynniki R404A, R407C i R507 opisywane w tym artykule [1]. Są to mieszaniny dwóch lub trzech składników spośród jednorodnych chemicznie czynników R143a ( $\text{CF}_3\text{-CH}_3$ ), R134a ( $\text{CF}_3\text{-CH}_2\text{F}$ ), R125 ( $\text{CF}_3\text{-CHF}_2$ ) i R32 ( $\text{CH}_2\text{F}_2$ ).

W artykule przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań górniczej sprężarkowej chłodziarki powietrza bezpośredniego działania typu TS-300 [2, 3]. Jako kryterium jakości pracy chłodziarki przyjęto moc cieplną parownika. Wpływ doboru czynnika chłodniczego na tę moc zbadano, wykonując pomiary w 108 wariantach — po 36 dla każdego z wymienionych wyżej czynników chłodniczych.

---

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

\*\* Artykuł powstał w ramach projektu badawczego nr 5 T12 A01425 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

## 2. Pomiary mocy cieplnej parownika chłodziarki TS-300

Pomiary mocy parownika chłodziarki TS-300 przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na rysunku 1.

Chłodziarka TS-300 składa się z pięciu zasadniczych elementów:

- 1) parownika stanowiącego chłodnicę powietrza bezpośredniego działania,
- 2) sprężarki,
- 3) wewnętrznego wymiennika ciepła (tzw. dochładzacza),
- 4) skraplacza,
- 5) zaworu rozprężnego,

połączonych przewodami, którymi w układzie zamkniętym przepływa czynnik chłodniczy. Stanowiący właściwą chłodnicę powietrza parownik (rys. 2 i 3) chłodziarki TS-300 jest wykonany w postaci wężownicowego 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 tworzących zespół maszynowy, stanowi oddzielny element połączony z resztą układu elastycznymi przewodami.

Pomiarami objęto temperaturę i wilgotność powietrza przed i po schłodzeniu oraz natężenie jego przepływu przez parownik.

Moc parownika ( $N_p$ ) wyznaczono ze wzoru

$$N_p = Q_m \left[ c_p (t_1 - t_2) + c_w (t_1 x_1 - t_2 x_2) \right] + Q_m (r_p - c_c t_2) (x_1 - x_2) \quad (1)$$

gdzie:

$Q_m$  — masowe natężenie przepływu powietrza przez parownik (odniesione do powietrza suchego) [kg/s],

$t_1$  — temperatura powietrza na wejściu parownika [°C],

$t_2$  — temperatura powietrza na wyjściu parownika [°C],

$x_1$  — wilgotność właściwa powietrza na wejściu parownika [kg/kg],

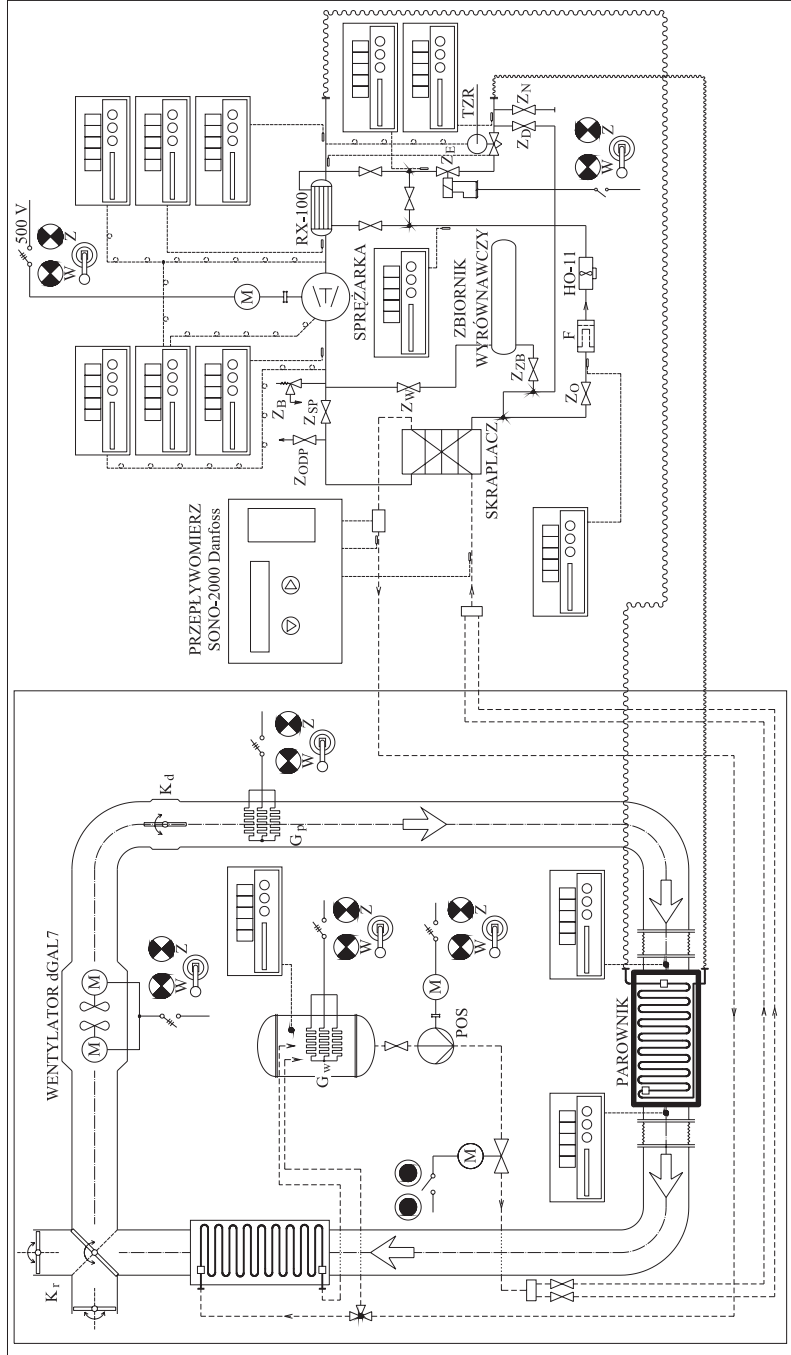
$x_2$  — wilgotność właściwa powietrza na wyjściu parownika [kg/kg],

$c_p$  — ciepło właściwe powietrza suchego przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],

$c_w$  — ciepło właściwe pary wodnej przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],

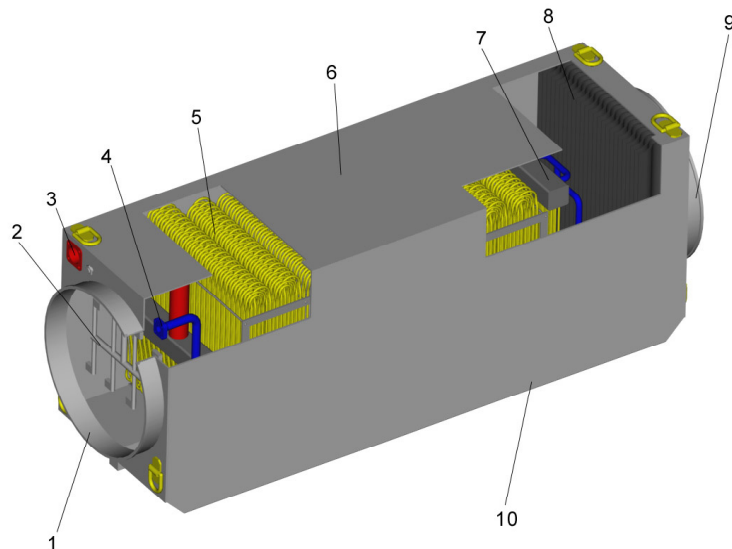
$r_p$  — utajone ciepło parowania wody [J/kg].

Wyniki pomiarów parametrów wejściowych powietrza (natężenia przepływu, temperatury i wilgotności względnej) oraz wyznaczonej mocy parownika dla wszystkich zbadanych wariantów zestawiono w tabeli 1 — przez  $Q$  oznaczono w niej strumień objętości chłodzonego powietrza w parowniku, a przez  $\varphi_1$  wejściową wilgotność względną powietrza.

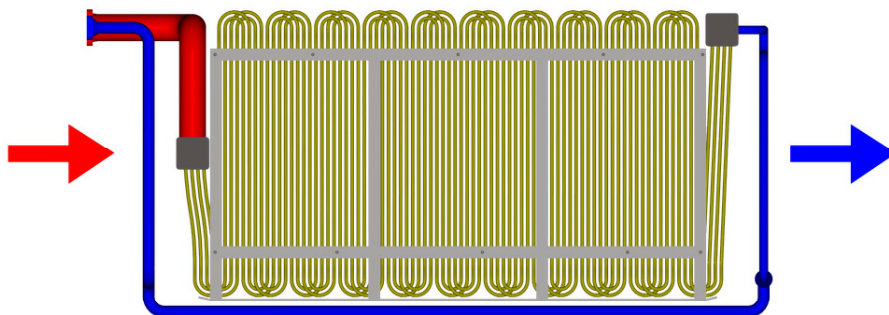


**Rys. 1.** Schemat ideowy stanowiska badawczego chłodziarek bezpośredniego działania:

$F$  – filtr czynnika chłodniczego,  $G_p$  – grzałka powietrza,  $G_w$  – grzałka wody,  $HO-11$  – przepływomierz ciekłego czynnika chłodniczego,  $K_d$  – kłapa dławiąca,  $K_r$  – zespół kłap regulujących,  $POS$  – pompa obiegu chłodzenia skraplacza,  $TZR$  – termostacyjny zawór rozprężny,  $Z_B$  – zawór bezpieczeństwa,  $Z_D$  – zawór dodawczy,  $Z_E$  – zawór elektromagnetyczny,  $Z_N$  – zawór do napełniania,  $Z_O$  – zawór odsysania,  $Z_{ODP}$  – zawór odpowietrzający,  $Z_{SP}$  – zawór sprężarki,  $Z_{W}$  – zawór wyrównawczy,  $Z_{ZB}$  – zawór zbiornika



**Rys. 2.** Parownik chłodziarki powietrza w obudowie: 1 – wlot powietrza, 2 – zraszacze, 3 – króciec ssący, 4 – króciec tłoczący, 5 – węzownica, 6 – obudowa, 7 – kolektor, 8 – wykraplacz, 9 – wylot powietrza, 10 – płyty transportowe



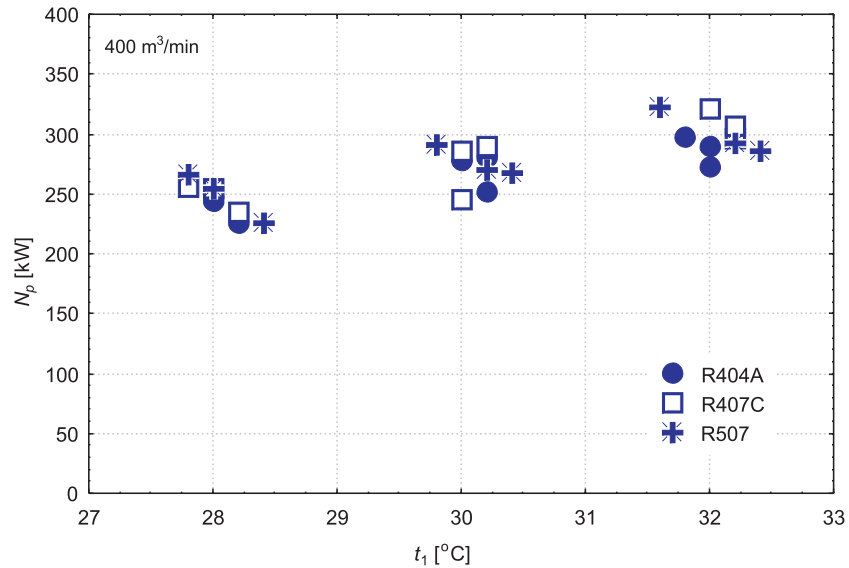
**Rys. 3.** Typowy układ węzownic w parowniku

Natomiast na rysunkach 4–11, oddzielnie dla różnych wartości natężenia przepływu powietrza, podano moc parownika chłodziarki w funkcji wejściowej temperatury powietrza przy różnych wartościach jego wilgotności (rysunki o numerach parzystych) lub w funkcji wejściowej wilgotności względnej powietrza przy różnych wartościach jego temperatury (rysunki o numerach nieparzystych). Każdy z badanych czynników chłodniczych jest reprezentowany na wykresach przez inny kształt punktów, dzięki czemu można ocenić wpływ zamiany danego czynnika na inny.

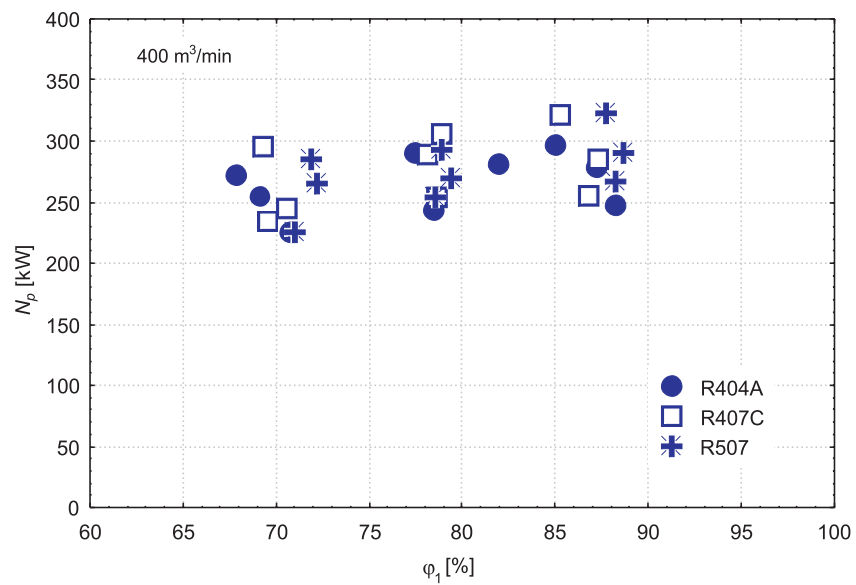
TABELA 1

**Wyniki pomiarów mocy cieplnej parownika chłodziarki TS-300 z różnymi czynnikami chłodniczymi**

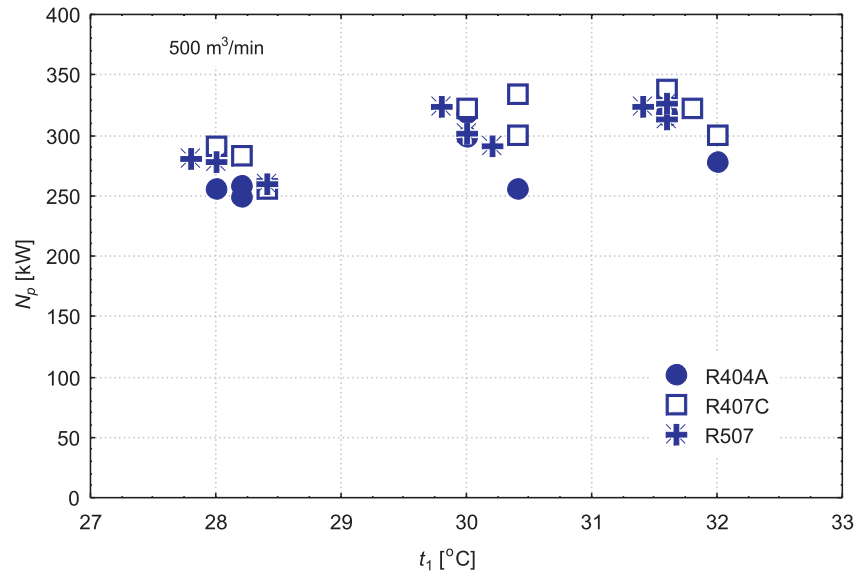
	R404A				R407C				R507			
	$Q$	$t_1$	$\varphi_1$	$N_p$	$Q$	$t_1$	$\varphi_1$	$N_p$	$Q$	$t_1$	$\varphi_1$	$N_p$
	m <sup>3</sup> /min	°C	%	kW	m <sup>3</sup> /min	°C	%	kW	m <sup>3</sup> /min	°C	%	kW
1	402	28,2	70,5	226,4	396	28,2	69,5	235,3	402	28,4	70,8	225,6
2		28,0	78,4	244,4		28,0	78,6	254,5		28,0	78,5	254,6
3		28,0	88,2	248,7		27,8	86,8	256,5		27,8	88,2	267,1
4		30,2	69,1	251,8		30,0	70,5	245,9		30,4	71,9	268,5
5		30,2	81,9	281,7		30,2	78,1	290,0		30,2	79,4	270,4
6		30,0	87,2	278,9		30,0	87,3	286,2		29,8	88,6	291,0
7		32,0	67,8	273,4		32,2	69,3	296,7		32,4	71,7	285,8
8		32,0	77,4	290,7		32,2	78,9	306,7		32,2	78,9	293,0
9		31,8	85,0	297,7		32,0	85,2	321,9		31,6	87,7	322,8
10	504	28,2	68,2	249,8	504	28,4	68,4	256,7	498	28,4	73,1	260,4
11		28,2	77,3	258,3		28,2	78,7	283,2		28,0	79,6	278,1
12		28,0	85,4	256,7		28,0	85,4	292,0		27,8	86,6	281,4
13		30,4	68,3	256,1		30,4	70,7	300,3		30,2	72,7	292,1
14		30,0	82,0	318,4		30,4	79,5	335,1		30,0	79,1	301,9
15		30,0	88,7	299,8		30,0	84,6	323,0		29,8	86,7	323,9
16		32,0	66,9	279,1		32,0	69,2	301,3		31,6	71,0	314,1
17		31,6	78,7	316,7		31,8	77,5	322,3		31,6	77,2	326,8
18		31,6	86,4	319,3		31,6	86,4	338,8		31,4	86,2	323,6
19	546	28,4	69,7	256,6	540	28,4	69,7	252,8	552	28,2	70,6	267,8
20		28,2	77,4	279,0		28,2	77,4	263,4		28,0	78,4	291,0
21		28,0	88,3	302,0		28,0	88,3	285,1		27,8	86,7	303,0
22		30,0	69,3	275,7		30,4	68,4	279,4		30,2	71,7	300,0
23		29,8	81,9	322,4		30,2	80,8	339,3		30,0	80,5	321,1
24		29,6	87,3	317,3		30,0	86,0	341,2		29,8	85,8	322,3
25		32,0	69,3	300,3		32,2	70,6	326,8		31,8	71,3	314,8
26		31,6	78,7	315,0		32,0	76,4	317,0		31,6	79,8	337,2
27		31,8	86,4	325,6		31,8	87,8	339,1		31,4	87,6	344,4
28	600	28,2	68,2	251,9	600	28,6	68,6	254,4	606	27,8	72,7	291,4
29		28,0	78,5	273,1		28,2	80,1	297,8		27,8	78,1	314,4
30		27,6	88,2	307,0		28,0	85,5	297,9		27,6	86,5	327,0
31		30,0	69,3	289,0		30,4	68,4	304,0		30,2	71,4	325,9
32		29,8	80,6	338,3		30,0	79,4	336,3		29,8	78,9	336,4
33		29,6	84,5	336,4		29,8	87,3	327,6		29,6	85,6	324,2
34		32,2	69,3	333,0		32,4	66,1	311,8		31,8	72,2	321,2
35		32,0	80,1	331,8		32,2	79,0	338,2		31,6	78,4	340,3
36		31,6	86,4	340,5		31,8	86,4	341,0		31,6	84,8	345,1



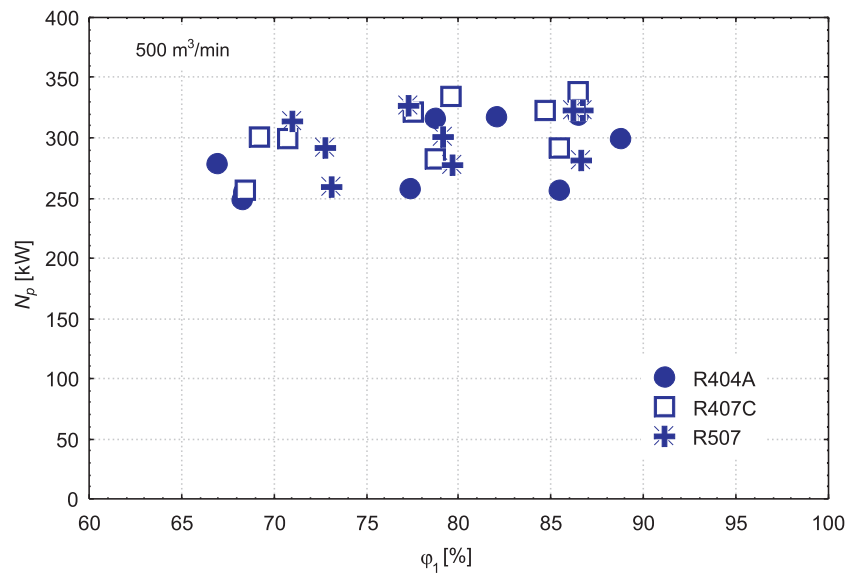
**Rys. 4.** Moc cieplna parownika chłodziarki TS-300 z różnymi czynnikami chłodniczymi w funkcji temperatury powietrza przed schłodzeniem, przy natężeniu przepływu powietrza przez parownik równym w przybliżeniu 400 m<sup>3</sup>/min



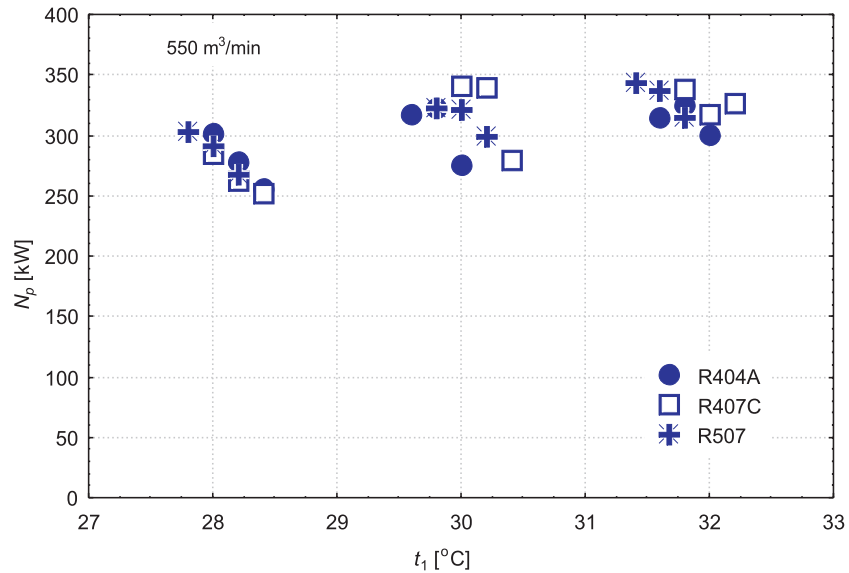
**Rys. 5.** Moc cieplna parownika chłodziarki TS-300 z różnymi czynnikami chłodniczymi w funkcji temperatury powietrza przed schłodzeniem, przy natężeniu przepływu powietrza przez parownik równym w przybliżeniu 500 m<sup>3</sup>/min



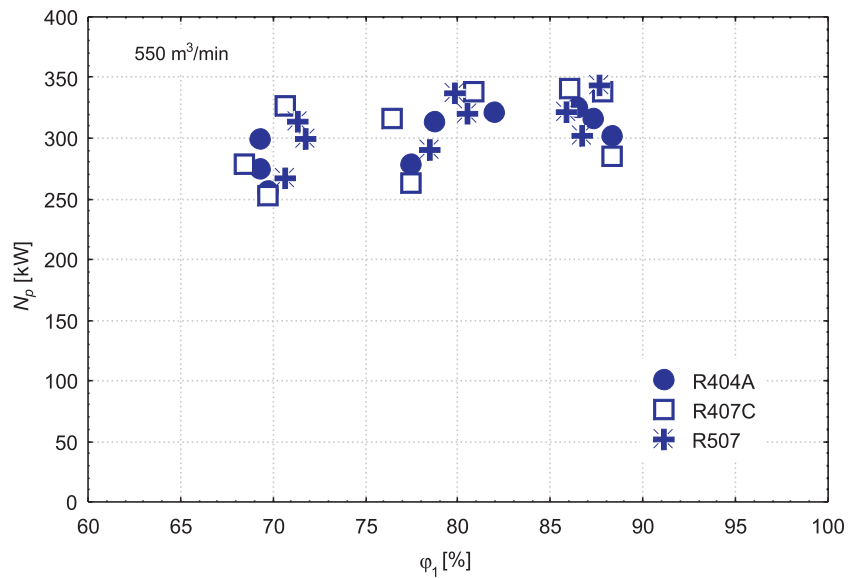
**Rys. 6.** Moc cieplna parownika chłodziarki TS-300 z różnymi czynnikami chłodniczymi w funkcji temperatury powietrza przed schłodzeniem, przy natężeniu przepływu powietrza przez parownik równym w przybliżeniu 550 m<sup>3</sup>/min



**Rys. 7.** Moc cieplna parownika chłodziarki TS-300 z różnymi czynnikami chłodniczymi w funkcji temperatury powietrza przed schłodzeniem, przy natężeniu przepływu powietrza przez parownik równym w przybliżeniu 600 m<sup>3</sup>/min

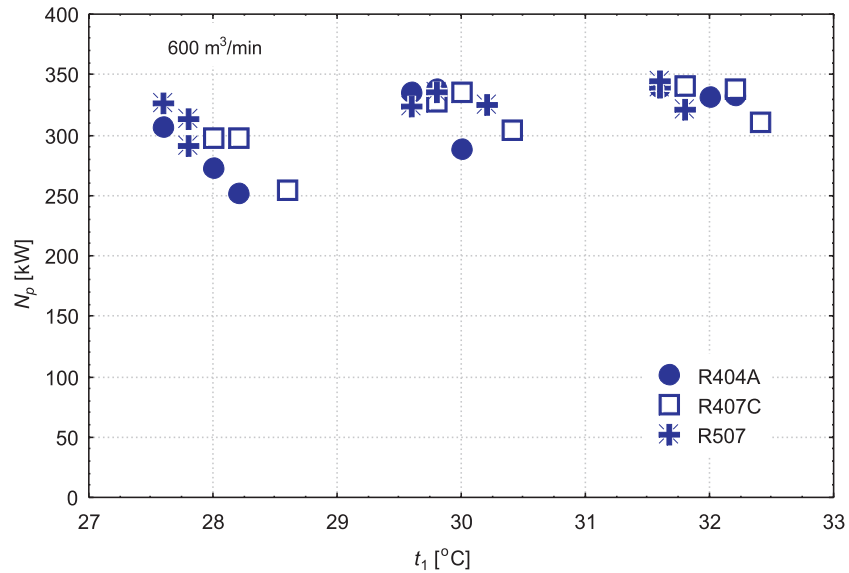


**Rys. 8.** Moc cieplna parownika chłodziarki TS-300 z różnymi czynnikami chłodniczymi w funkcji wilgotności względnej powietrza przed schłodzeniem, przy natężeniu przepływu powietrza przez parownik równym w przybliżeniu 400 m<sup>3</sup>/min

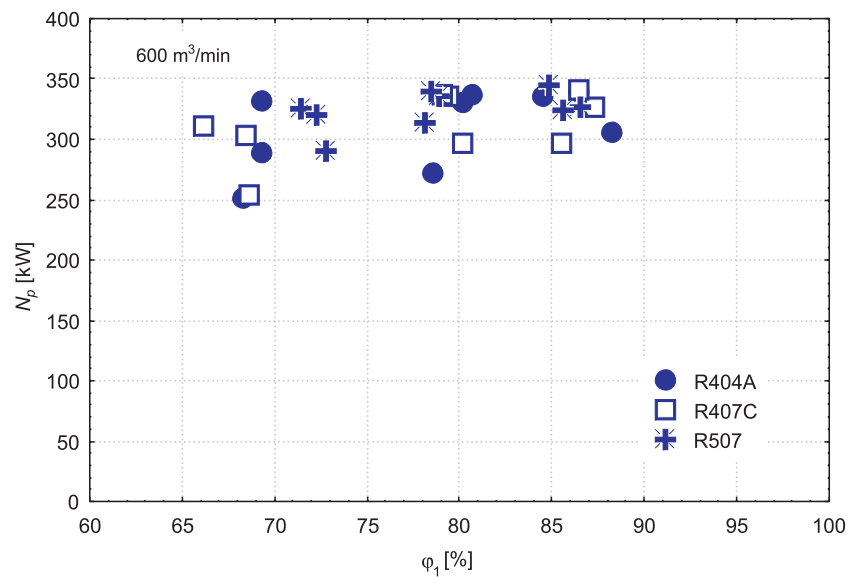


**Rys. 9.** Moc cieplna parownika chłodziarki TS-300 z różnymi czynnikami chłodniczymi w funkcji wilgotności względnej powietrza przed schłodzeniem, przy natężeniu przepływu powietrza przez parownik równym w przybliżeniu 500 m<sup>3</sup>/min





**Rys. 10.** Moc cieplna parownika chłodziarki TS-300 z różnymi czynnikami chłodniczymi w funkcji wilgotności względnej powietrza przed schłodzeniem, przy natężeniu przepływu powietrza przez parownik równym w przybliżeniu 550 m<sup>3</sup>/min



**Rys. 11.** Moc cieplna parownika chłodziarki TS-300 z różnymi czynnikami chłodniczymi w funkcji wilgotności względnej powietrza przed schłodzeniem, przy natężeniu przepływu powietrza przez parownik równym w przybliżeniu 600 m<sup>3</sup>/min

### 3. Podsumowanie i uwagi końcowe

Analiza uzyskanych z pomiarów, a przedstawionych w tabeli 1 i na wykresach (rys. 4–11) wartości mocy cieplnej parownika górniczej chłodziarki powietrza TS-300 pozwala stwierdzić, że:

- dla chłodziarki z czynnikiem R404A w badanym zakresie natężenia przepływu powietrza (od 402 do 600 m<sup>3</sup>/min) oraz jego temperatury i wilgotności względnej przed schłodzeniem (od 27,6 do 32,2°C oraz od 66,9 do 88,7%) moc parownika wynosi od 226,4 do 340,5 kW;
- dla chłodziarki z czynnikiem R407C w badanym zakresie natężenia przepływu powietrza (od 396 do 600 m<sup>3</sup>/min) oraz jego temperatury i wilgotności względnej przed schłodzeniem (od 27,8 do 32,4°C oraz od 66,1 do 88,3%) moc parownika wynosi od 235,3 do 341,2 kW;
- dla chłodziarki z czynnikiem R507 w badanym zakresie natężenia przepływu powietrza (od 402 do 606 m<sup>3</sup>/min) oraz jego temperatury i wilgotności względnej przed schłodzeniem (od 27,6 do 32,4°C oraz od 70,6 do 88,6%) moc parownika wynosi od 225,6 do 345,1 kW;
- zwiększenie natężenia przepływu powietrza powoduje wzrost mocy parownika, co jest wyraźniej widoczne przy niższej temperaturze i wilgotności powietrza na wlocie;
- zwiększenie temperatury i/lub wilgotności względnej powietrza na wlocie pociąga za sobą wzrost mocy parownika;
- na podstawie przeprowadzonych eksperymentów nie można stwierdzić przewagi (w sensie większej mocy chłodzenia powietrza) któregośkolwiek z badanych trzech czynników chłodniczych nad pozostałymi.

#### LITERATURA

- Bonca Z., Butrymowicz D., Dambek D., Depta A., Targański W.:* Czynniki chłodnicze i nośniki ciepła. Własności cieplne, chemiczne i eksploatacyjne. Poradnik. Gdańsk, Wyd. IPPU 1998
- Badania eksperymentalne górniczej sprężarkowej chłodziarki powietrza o działaniu bezpośrednim z czynnikiem R507. Żory, „TERMOSPEC” sp. z o.o., 2004 (praca niepublikowana)
- Badania eksperymentalne górniczej sprężarkowej chłodziarki powietrza o działaniu bezpośrednim z czynnikiem R404A i 407C. Żory, „TERMOSPEC” sp. z o.o., 2004 (praca niepublikowana)