

# Prognoza temperatury i wilgotności powietrza na wylocie parownika chłodziarki bezpośredniego działania

## An air-temperature and air-humidity prognosis at an evaporator inlet of a direct-action refrigerator



Prof. dr hab. inż. Bernard Nowak<sup>\*)</sup>



Dr inż. Rafał Łuczak<sup>\*)</sup>



Dr inż. Piotr Życzkowski<sup>\*)</sup>

**Treść:** W artykule podano sposób określenia temperatury i wilgotności właściwej powietrza opuszczającego parownik chłodziarki bezpośredniego działania typu TS-300, pracującej w konkretnych warunkach ciepno-wilgotnościowych. W tym celu wykorzystano dane techniczne współpracującego z taką chłodziarką wentylatora lutniowego oraz równania modeli matematycznych opisujących pracę rozważanego systemu (Łuczak 2012, Nowak, Łuczak 2015, Nowak i in. 2016) i proces chłodzenia powietrza w parowniku (Filek, Nowak 1994). Uzyskane z rozwiązań przyjętych opisów matematycznych wyniki obliczeń numerycznych porównano z rezultatami pomiarów i określono istotność statystyczną uzyskanych odchylek, oceniając tym samym praktyczną przydatność przyjętego modelu do oceny skuteczności pracy chłodziarki powietrza TS-300

**Abstract:** This paper presents methods of determination of temperature and specific humidity of air, leaving the direct-action refrigerator's evaporator (TS-300) working in the particular hot-humidity conditions. For this, technical data of fan co-working with that cooler, mathematical equations describing operation of this system (Łuczak 2012, Nowak, Łuczak 2015, Nowak et al. 2016) as well as air-cooled process in the evaporator were used (Filek, Nowak 1994). The results obtained from mathematical equations were compared with the measured results and statistical significance of deviations were defined. For this reason, practical usability of the model for evaluation of the work effectiveness of the air refrigerator was examined.

### Słowa kluczowe:

prognoza temperatury i wilgotności powietrza, chłodzenie powietrza, moc cieplna chłodziarki

### Key words:

air-temperature and air-humidity prognosis, air cooling, thermal power of cooler

## 1. Wstęp

Na poziom zagrożenia klimatycznego w kopalniach węgla kamiennego i rud miedzi wpływa wiele czynników a zapewnienie właściwych parametrów powietrza na stanowiskach pracy wymaga kompleksowego stosowania metod obniżających temperaturę powietrza. Poprawę warunków cieplnych uzyskać można poprzez m.in. zwiększenie intensywności wentylacji, obniżenie wilgotności powietrza, obniżenie średniej temperatury promieniowania cieplnego otoczenia, zmniejszenie strumienia emitowanego ciepła od maszyn, obniżenie wydatku energetycznego pracowników na stanowiskach pracy. Zabiegi takie w wielu przypadkach są niemożliwe do osiągnięcia lub niewystarczające i wówczas jedynym sposobem na utrzymanie temperatury powietrza

poniżej 28°C lub 33°C jest stosowanie sztucznego chłodzenia powietrza za pomocą lokalnych chłodziarek lub systemów grupowej i centralnej klimatyzacji. W warunkach polskiego górnictwa do obniżania temperatury powietrza na stanowiskach pracy, mimo intensywnego rozwoju systemów scentralizowanego chłodzenia powietrza, często wykorzystywane są chłodziarki bezpośredniego działania. Odpowiednio dobrana pod względem konstrukcyjnym i mocy cieplnej chłodziarka powietrza takiej chłodziarki ma za zadanie właściwe schłodzenie strumienia powietrza wentylacyjnego. Efektywność chłodzenia powietrza ocenia się na podstawie uzyskiwanej przez chłodziarkę mocy cieplnej parownika oraz na podstawie temperatury powietrza na jego wylocie. Niniejszy artykuł dotyczy prognozy temperatury i wilgotności powietrza na wylocie z parownika chłodziarki bezpośredniego działania typu TS-300, współpracującego z wentylatorem lutniowym WLE-804B/SK.

<sup>\*)</sup> Akademia Górniczo Hutnicza, Kraków

## 2. Wpływ parametrów powietrza i wody na moc cieplną chłodnicy

Wykorzystanie metod statystycznych do opisu pracy lokalnych systemów schładzania powietrza w wyrobiskach górniczych rozważano m.in. w pracach (Nowak i in. 2010, Nowak, Łuczak 2015). Podano w nich metody oceny efektywności pracy chłodziarek typu DV-290 i TS-300 współpracujących z wyparnymi chłodnicami wody. Ocenę efektywności pracy chłodziarki TS-300 z otwartym obiegiem wody chłodzącej skraplacz przedstawiono w pracach (Łuczak 2012, Nowak i in. 2016). Moc cieplną parownika takiej chłodziarki powietrza, wykorzystując uzyskane z pomiarów *in situ* wartości parametrów powietrza na wlocie do parownika oraz parametry wody chłodzącej skraplacz, opisano równaniami otrzymanymi metodami statystycznymi z wykorzystaniem liniowej regresji wielorakiej (równanie 1) oraz estymacji nieliniowej metodą Hooke'a-Jeevesa przemieszczania układu (równanie 2).

$$N_{LZ} = 2 \cdot t_{s2} + 0,5 \cdot \varphi_2 + 0,15 \cdot Q_p - 0,6 \cdot t_{w1} + 1,6 \cdot Q_w + 57 \quad (1)$$

$$N_{KZ} = 0,05 \cdot t_{s2}^{1,8} + 0,4 \cdot \varphi_2 + 1,3 \cdot Q_p^{0,72} - 0,01 \cdot t_{w1}^{2,2} + 20,1 \cdot Q_w^{0,5}$$

gdzie:

- $N_{LZ}$  – moc cieplna parownika wyznaczona na podstawie liniowej regresji wielorakiej, kW,
- $N_{KZ}$  – moc cieplna parownika wyznaczona na podstawie nieliniowej regresji wielorakiej, kW,
- $Q_p$  – strumień objętości powietrza na wlocie do parownika, m<sup>3</sup>/min,
- $Q_w$  – strumień objętości wody w skraplaczu, m<sup>3</sup>/h,
- $t_{s2}$  – temperatura powietrza mierzona termometrem suchym na wlocie do parownika równa temperaturze powietrza na wylocie z wentylatora, °C,
- $t_{w1}$  – temperatura wody na wlocie do skraplacza, °C,
- $\varphi_2$  – wilgotność względna powietrza na wlocie do parownika, %.

Powyższe wzory obowiązują przy założeniu wystarczającego odbioru ciepła przez skraplacz z chłodnicy powietrza.

Należy w tym miejscu zaznaczyć, że ze względu na utrudnienia przy pomiarach temperatury i wilgotności względnej powietrza na wlocie do parownika wynikające z jego trwałego połączenie z wentylatorem, praktyczne wykorzystanie powyższych zależności jest ograniczone. Służby kopalniane lub serwisowe oceniając jakość pracy chłodnicy dokonują pomiarów parametrów powietrza na wlocie do wentylatora oraz na wylocie z parownika. Dlatego bardziej praktycznymi formami przedstawionych wyżej zależności NLZ i NKZ są równania (3) i (4), w których wartość temperatury powietrza na wlocie do parownika zastąpiono sumą wartości temperatury powietrza na wlocie do wentylatora i przyrostem temperatury pracującego wentylatora.

$$N_{LZ} = 2 \cdot (t_{s1} + \Delta t) + 0,5 \cdot \varphi_2 + 0,15 \cdot Q_p - 0,6 \cdot t_{w1} + 1,6 \cdot Q_w + 57 \quad (3)$$

$$N_{KZ} = 0,05 \cdot (t_{s1} + \Delta t)^{1,8} + 0,4 \cdot \varphi_2 + 1,3 \cdot Q_p^{0,72} - 0,01 \cdot t_{w1}^{2,2} + 20,1 \cdot Q_w^{0,5} \quad (4)$$

gdzie:

- $t_{s1}$  – temperatura powietrza mierzona termometrem suchym na wlocie do wentylatora, °C,

$\Delta t$  – przyrost temperatury powietrza w wyniku pracy wentylatora, °C. Można go wyznaczyć z zależności (5) (Markefka, Stefanowicz 1986):

$$\Delta t = \frac{\Delta p}{\rho_p \cdot C_p \cdot 10\eta} \quad (5)$$

przy czym:

- $C_p$  – ciepło właściwe powietrza suchego przy stałym ciśnieniu, kJ/(kgK),
- $\Delta p$  – spiętrzenie całkowite wentylatora, Pa,
- $\eta$  – sprawność wentylatora, %,
- $\rho_p$  – gęstość powietrza suchego na wlocie do wentylatora, kg/m<sup>3</sup>.

Rozważany w niniejszej pracy, pracujący w wyrobisku j82 w pokładzie 407/1 układ chłodniczy tworzył wspomniany wentylator lutniowy WLE-804B/SK o wydajności nominalnej 5,9 m<sup>3</sup>/s, połączony lutnią z parownikiem chłodziarki TS-300. Na podstawie (Wentylatory ... 2007) spiętrzenie całkowite i sprawność tego wentylatora w funkcji przepływającego strumienia objętości powietrza, w zakresie pracy od 4,5 do 8 m<sup>3</sup>/s, przedstawić można za pomocą równań drugiego stopnia (6) i (7), dla których moc korelacji (R<sup>2</sup>) wynosi odpowiednio R<sup>2</sup>=0,999 dla spiętrzenia wentylatora oraz R<sup>2</sup>=0,998 dla dopasowania krzywej sprawności wentylatora.

$$\Delta p = -456,43 \cdot Q_p^2 + 4883,2 \cdot Q_p - 8875,4 \quad (6)$$

$$\eta = -6,4676 \cdot Q_p^2 + 75,427 \cdot Q_p - 162,32 \quad (7)$$

Do określania parametrów powietrza w wyrobiskach górniczych zazwyczaj wykorzystuje się psychrometr Assmana, wykonując pomiary temperatury powietrza termometrem suchym  $t_s$  i wilgotnym  $t_m$ . Wobec faktu, że przepływające przez wentylator powietrze nie zmieniając swojej wilgotności właściwej zmienia wilgotność względną, wymagane do jej określenia ciśnienie cząstkowe pary wodnej w stanie nasycenia można wyznaczyć ze wzoru (8).

$$p_{wn}(t) = 5,5471 \cdot t^2 - 83,201 \cdot t + 1761,7 \quad (8)$$

gdzie:

- $p_{wn}(t)$  – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w stanie nasycenia w temperaturze  $t$ , Pa.

Wzór ten obowiązuje dla temperatury powietrza  $t$  w zakresie od 15 °C do 40 °C, co odpowiada typowej zmienności temperatury powietrza na wylocie oraz na wlocie do parownika chłodziarki z uwzględnieniem przyrostu temperatury w wentylatorze. Moc dopasowania regresyjnego krzywej równania (8) wynosi R<sup>2</sup>=0,9998.

Łącząc równanie (8) ze znanymi zależnościami służącymi do określania ciśnienia cząstkowego pary wodnej w stanie nasycenia  $p_{wn}$  oraz ciśnienia cząstkowego pary wodnej w powietrzu nienasyconym  $p_w$ , wilgotność względną powietrza za wentylatorem  $\varphi_2$ , przy uwzględnieniu stałości ciśnienia cząstkowego pary wodnej  $p_w$  na jego wlocie i wylocie, daje się zapisać jako funkcję temperatury powietrza na jego wlocie (równanie 9):

$$\varphi_2 = \frac{p_{w1}}{p_{wn2}} = \frac{5,5471 \cdot t_{m1}^2 - 83,201 \cdot t_{m1} + 1761,7 - 6,77 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{s1} - t_{m1}) \cdot b}{5,5471 \cdot t_{s2}^2 - 83,201 \cdot t_{s2} + 1761,7} \quad (9)$$

gdzie:

- $b$  – bezwzględne ciśnienie powietrza, Pa,
- $p_{w1}$  – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu na wlocie do wentylatora, Pa,
- $p_{wn2}$  – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w stanie nasycenia powietrza na wylocie z wentylatora, Pa,
- $t_{m1}$  – temperatura powietrza mierzona termometrem wilgotnym na wlocie do wentylatora, °C,
- $\varphi_2$  – wilgotność względna powietrza na wylocie z wentylatora.

Uwzględniając przyrost temperatury powietrza w wyniku pracy wentylatora, równanie (9) można przedstawić w postaci:

(10)

$$\varphi_2 = \frac{5,5471 \cdot t_{m1}^2 - 83,201 \cdot t_{m1} + 1761,7 - 6,77 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{s1} - t_{m1}) \cdot b}{5,5471 \cdot (t_{s1} + \Delta t)^2 - 83,201 \cdot (t_{s1} + \Delta t) + 1761,7}$$

Znajomość temperatury i wilgotności względnej powietrza na wlocie do wentylatora pozwala zapisać zależność (10) w postaci jak niżej:

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_1 \cdot (5,5471 \cdot t_{s1}^2 - 83,201 \cdot t_{s1} + 1761,7)}{5,5471 \cdot (t_{s1} + \Delta t)^2 - 83,201 \cdot (t_{s1} + \Delta t) + 1761,7} \quad (11)$$

Korzystając z zależności (3 - 11), dla różnych parametrów powietrza w wyrobisku, w którym zainstalowano lub projektuje się instalację chłodnicy powietrza, można wyznaczyć jej moce cieplne. Określono je dla podanych w tab. 1 rezultatów pomiarów pracującej w ww. wyrobisku chłodziarki TS-300. Indeks „3” oznaczono w tej tabeli zmierzone termometrem suchym oraz termometrem wilgotnym temperatury powietrza na wylocie z chłodnicy. Obliczenia mocy cieplnych parownika wymagały wcześniejszej znajomości parametrów pracy współpracującego z nim wentylatora. Te zaś pozwoliły wyznaczyć przyrosty temperatury powietrza w wyniku jego sprężania w wentylatorze. Oprócz wspomnianych mocy cieplnych parownika chłodziarki TS-300, przyrostów temperatury w wentylatorze wykonano także obliczenia temperatur i wilgotności względnych powietrza na wlocie do parownika oraz odchyłek bezwzględnych wymienionych wielkości obliczonych od pomierzonych. Zestawiono je w tab. 2. Wielkości obliczone, dla odróżnienia od wielkości pomierzonych oznaczono „'”.

Analizując otrzymane rezultaty, można stwierdzić, że przepływający przez wentylator strumień objętości powie-

trza równy 419 m<sup>3</sup>/min zwiększa swoją temperaturę o 4,9°C. Parametry pracy tego wentylatora wynoszą odpowiednio: spiętrzenie całkowite  $\Delta p = 2966,9$  Pa, a sprawność  $\eta = 49\%$ . Maksymalna odchyłka obliczonej od pomierzonej temperatury powietrza na wylocie z wentylatora wynosi -0,5 °C, zaś średnia odchyłka jest równa 0,3 °C, co stanowi 0,9% zmienności temperatury powietrza. Analiza statystyczna rozkładu t-Studenta o istotności różnic między wynikami pomiarów i obliczeń temperatury powietrza za wentylatorem wykazała, z prawdopodobieństwem  $p = 0,08$ , nieistotności uzyskanych odchyłek. Natomiast dla wilgotności względnej powietrza  $\varphi_2$ , stwierdzono, z prawdopodobieństwem  $p = 0,004$ , istotność otrzymanych odchyłek, mimo że średnia odchyłka bezwzględna wynosi 1,3%, a maksymalna 2,2%. Średnia odchyłka obliczonych wzorem (3) mocy cieplnych parownika chłodziarki TS-300 od średniej mocy pomierzonej wynosi 4,2kW, co stanowi 1,6%. Przy obliczeniach wzorem (4) odchyłki te wynoszą odpowiednio 3,7kW oraz 1,4%. Można więc napisać, że zasadne jest wykorzystanie, do prognozy mocy cieplnej chłodziarki TS-300, wyżej podanych równań matematycznych (prosto i krzywoliniowych). Potwierdza to również analiza statystyczna, na podstawie której, z prawdopodobieństwem odpowiednio  $p = 0,061$  i  $p = 0,447$  wykazano nieistotność uzyskanych odchyłek mocy cieplnej badanej chłodnicy powietrza.

### 3. Określenie temperatury i wilgotności powietrza po jego chłodzeniu chłodziarką TS-300

Podstawowym kryterium efektywności chłodzenia powietrza przy użyciu kopalnianych chłodnic powietrza jest odpowiedni zakres zmian parametrów powietrza w miejscu ich pracy. Parametry te, a więc temperatura i wilgotność powietrza na wylocie z parownika chłodziarki TS-300 wyznaczone zostaną nie na podstawie znamionowej jej mocy cieplnej, lecz w oparciu o podane wyżej zależności (3) i (4) prognozujące moc cieplną rozważanej chłodnicy powietrza w miejscu jej zabudowy, czyli dla określonych warunków klimatycznych w wyrobisku oraz dla określonych parametrów wody chłodzącej skraplacz. Dla tak wyznaczonych mocy cieplnych parownika chłodziarki, (tab. 2), poszukiwane wartości temperatury  $t_3'$  i wilgotności właściwej  $x_3'$  powietrza na jego wylocie wylicza się rozwiązując układ równań (12). Za (Filek, Nowak 1994) układ ten, dla nienasyconego powietrza na wylocie parownika, co potwierdzają podane w tab. 1 wyniki pomiarów *in situ*, przyjmuje postać

$$\begin{cases} x_3' = (1 - b_f) \cdot x_c + b_f \cdot x_2 \\ t_3' = \frac{1}{C_p + C_{pw} \cdot x_3'} \cdot \left\{ (1 - b_f) \cdot [C_p \cdot t_c + C_{pw} \cdot t_c \cdot x_c + r_p \cdot x_c] + \right. \\ \left. + b_f \cdot [C_p \cdot t_2 + C_{pw} \cdot t_2 \cdot x_2 + r_p \cdot x_2] - r_p \cdot x_3' \right\} \end{cases} \quad (12)$$

gdzie:

- $b_f$  – współczynnik bocznikowania chłodnicy powietrza, – W chłodziarce TS-300 można go opisać prostą regresji (Łuska 2006):

$$b_f = 2,27333 \cdot 10^{-4} \cdot Q_p - 0,03507 \quad (13)$$

- $C_{pw}$  – ciepło właściwe pary wodnej przy stałym ciśnieniu, kJ/(kg×K),
- $r_p$  – utajone ciepło parowania wody, kJ/kg,
- $t_3'$  – temperatura powietrza po zmieszaniu na wylocie z parownika, °C,
- $t_c$  – temperatura umownej schłodzonej części strumienia powietrza w parowniku, °C. Określa się ją z układu równań (15),

Tabela 1. Chłodziarka TS-300 – wyniki pomiarów  
Table 1. Refrigerator TS-300 – measurement results

Wariant pomiarowy	Parametry powietrza na wlocie do wentylatora					Parametry powietrza na wylocie z parownika			Parametry wody na wlocie do skraplacza	
	Temperatura zmierzona termometrem suchym		Strumień objętości powietrza na wlocie do parownika $Q_p, m^3/min$	Bezwzględne ciśnienie		Temperatura zmierzona termometrem wilgotnym		Temperatura $t_w, °C$	Strumień objętości	
	$t_{s1}, °C$	$t_{m1}, °C$		$b, Pa$	$t_{s2}, °C$	$t_{m2}, °C$	$t_w, °C$		$Q_w, m^3/h$	
1	28,4	25,6	419,0	109878,0	18,4	18,0	23,8	36,72		
2	28,6	25,6	419,0	109877,0	18,4	18,0	23,8	36,20		
3	28,6	25,6	419,0	109846,0	18,4	18,2	23,7	34,37		
4	28,8	25,6	419,0	109809,0	18,4	18,0	23,8	34,90		
5	28,8	26,4	419,0	109853,0	19,4	19,2	23,9	36,92		
6	28,8	26,4	419,0	109849,0	19,2	19,0	23,8	37,21		
7	29,0	26,6	419,0	109807,0	19,4	19,2	23,7	34,32		
8	29,2	25,6	419,0	109813,0	18,4	18,2	23,7	34,18		
9	29,2	25,6	419,0	109890,0	18,4	18,0	24,0	33,22		
10	29,4	26,8	419,0	109831,0	19,6	19,4	23,7	34,46		

Tabela 2. Porównanie wyznaczonych z pomiarów i obliczeń parametrów powietrza na wlocie do parownika chłodziarki TS-300 oraz jego mocy cieplnej. Odchyłki bezwzględne  
Table 2. Comparison of measured and calculated parameters of air at the inlet of the evaporator of TS-300 refrigerator and its thermal power. Absolute deviations

Wariant pomiarowy	Temperatura zmierzona termometrem suchym na wlocie do parownika $t_{s1}, °C$	Wilgotność względna powietrza na wlocie do parownika $\phi_{p1}, \%$	Przyrost temperatury powietrza w wyniku pracy wentylatora $\Delta t_1, °C$	Obliczona temperatura powietrza na wlocie do parownika $t_{s2}, °C$	Obliczona wilgotność względna powietrza na wlocie do parownika $\phi_{p2}, \%$	Odchyłka bezwzględna temperatury powietrza na wlocie do parownika $\Delta t_{s2}, °C$	Odchyłka bezwzględna wilgotności powietrza na wlocie do parownika $\Delta \phi_{p2}, \%$	Moc cieplna parownika $N_p, kW$	Obliczona moc cieplna parownika $N_{LZ}, kW$	$N_{KZ}, kW$	Odchyłka bezwzględna mocy cieplnej parownika $\Delta N_{KZ}, kW$
	1	33,7	58,8	4,9	33,3	59,5	0,4	-0,7	268,3	260,7	262,9
2	33,7	58,5	4,9	33,5	58,6	0,2	-0,1	266,3	259,8	261,9	6,5
3	33,3	59,8	4,9	33,5	58,6	-0,2	1,2	257,6	256,9	258,9	0,7
4	33,5	58,9	4,9	33,7	57,6	-0,2	1,3	262,4	257,6	259,7	4,8
5	33,4	63,4	4,9	33,7	61,9	-0,3	1,5	258,0	262,9	264,6	-4,9
6	33,4	63,4	4,9	33,7	61,9	-0,3	1,5	263,2	263,4	265,2	-0,2
7	33,6	63,5	4,9	33,9	62,0	-0,3	1,5	264,7	259,3	260,8	5,4
8	33,7	57,6	4,9	34,1	55,8	-0,4	1,8	255,2	256,4	258,4	-1,2
9	33,8	57,3	4,9	34,1	55,8	-0,3	1,5	261,2	254,7	256,4	6,5
10	33,8	63,3	4,9	34,3	61,1	-0,5	2,2	264,2	259,9	261,3	4,3



$x_2$  – wilgotność właściwa powietrza na wlocie do parownika równa wilgotności właściwej powietrza  $x_1$  na wlocie do wentylatora, kg/kg p.s. (kg pary wodnej/kg powietrza suchego). Wyznaczyć ją można z poniższej zależności

$$x_2 = \frac{0,622 \cdot \varphi_2 \cdot p_{wn2}}{b - (\varphi_2 \cdot p_{wn2})} \quad (14)$$

$x_3$  – wilgotność właściwa powietrza po zmieszaniu na wylocie z parownika, kg/kg p.s.

$x_c$  – wilgotność właściwa umownej chłodzonej części powietrza w parowniku, kg/kg p.s. Określa się ją z układu równań (15).

gdzie:

$$\begin{cases} x_c = \frac{0,622 \cdot p_{wn}(t_c)}{b - p_{wn}(t_c)} = \frac{3,4503 \cdot t_c^2 - 51,751 \cdot t_c + 1095,7774}{b - 5,5471 \cdot t_c^2 + 83,201 \cdot t_c - 1761,7} \\ t_c = \frac{t_2 \cdot (C_p + C_{pw} \cdot x_2) + r_p \cdot (x_2 - x_c) - \frac{N}{(1 - b_f) \cdot Q_m}}{C_p + C_{pw} \cdot x_c + C_{ww}(x_2 - x_c)} \end{cases} \quad (15)$$

Niewyjaśnione dotychczas symbole oznaczają:

$C_{ww}$  – ciepło właściwe wody, kJ/(kg×K),

$N$  – moc cieplna parownika, kW,

$p_{wn}(t_c)$  – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w stanie nasycenia w temperaturze  $t_c$ , Pa,

$Q_m$  – strumień masy powietrza suchego na wlocie do parownika, kg/s.

Korzystając z podanych wyżej równań (3)-(15), wykonano obliczenia temperatury i wilgotności właściwej powietrza opuszczającego parownik chłodziarki TS-300. Obliczenia te przeprowadzono zarówno dla mocy parownika  $N=N_{LZ}$ , jak i dla  $N=N_{KZ}$ . Otrzymane rezultaty porównano z wynikami pomiarów obliczając, analogicznie jak w rozdziale 2, bezwzględne odchyłki. Wyniki obliczeń wymienionych wielkości podano w tab. 3. Indeksami  $L$  i  $K$  oznaczono w niej parametry obliczone odpowiednio na podstawie liniowego oraz krzywoliniowego równania mocy chłodniczej parownika.

Analizując podane w tab. 3 rezultaty obliczeń, można stwierdzić, że średnia wartość temperatury powietrza opuszczającego chłodnicę wyliczona dla 10 pomiarów wynosi 18,8 °C, przy średnich prognozowanych na podstawie liniowych i krzywoliniowych funkcji mocy cieplnej chłodnicy, wynoszących odpowiednio 18,92 °C i 18,85 °C. Średnie odchyłki bezwzględne dla obu metod prognozowania temperatury powietrza wynoszą odpowiednio 0,16 °C i 0,14 °C. Maksymalna różnica między wartością zmierzoną a obliczoną jest równa -0,5 °C w analizie liniowej oraz -0,4 °C w analizie krzywoliniowej.

Obliczona z pomiarów średnia wartość wilgotności właściwej powietrza na wylocie z parownika rozważanej chłodziarki jest równa średnim wartościom prognozowanych wilgotności wynoszących 12,2 g/kg p.s., przy czym średnia bezwzględna odchyłka prognozowanej wilgotności właściwej powietrza wynosi 0,12 g/kg p.s. dla modelu liniowego oraz 0,11 g/kg p.s. dla modelu krzywoliniowego.

Średnie odchyłki względne zarówno temperatury, jak i wilgotności właściwej na wylocie parownika nie przekraczają 1,0%.

Analogicznie jak w poprzednim rozdziale, dokonano oceny statystycznej istotności obliczonych odchyłek prognozowanych temperatur i wilgotności właściwych powietrza opuszczającego chłodnicę. Stwierdzono nieistotność odchyłek

z prawdopodobieństwem  $p=0,067$  dla prognozowanych temperatur oraz  $p=0,129$  dla prognozowanych wilgotności właściwych, obliczanych przy wykorzystaniu liniowego równania regresji mocy cieplnej parownika. Ta nieistotność odchyłek, ale z prawdopodobieństwem odpowiednio równym  $p=0,45$  dla prognozowanych temperatur powietrza i  $p=0,744$  dla wilgotności właściwych dotyczy także obliczeń wykorzystujących nieliniowe równanie regresji mocy cieplnej parownika.

Można zatem stwierdzić, że przedstawiona w artykule procedura pozwala prognozować, z wystarczającą dla praktyki górniczej dokładnością, temperaturę i wilgotność schłodzonego chłodziarką TS-300 powietrza.

#### 4. Podsumowanie

Moc cieplna parownika chłodziarki bezpośredniego działania jest ściśle zależna od parametrów termodynamicznych chłodzonego powietrza, a w głównej mierze od jego entalpii. Dlatego, mimo wystarczającego odbioru ciepła przez jej skraplacz, moc cieplna chłodnicy może się różnić od wartości nominalnej podanej przez producenta. W artykule podano modele matematyczne pozwalające nie tylko określać moc cieplną chłodnicy chłodziarki TS-300, lecz także prognozować temperaturę i wilgotność powietrza na wylocie jej parownika, pracującej w konkretnych warunkach cieplno-wilgotnościowych. W podanych w niniejszej pracy obliczeniach prognostycznych, ich odchyłki od wartości zmierzonych są stosunkowo małe. Pozwala to wnioskować o poprawności wykorzystywanych modeli matematycznych. Najbardziej dogodną, pod względem praktycznym, formą opisu pracy parownika chłodziarki TS-300 jest model liniowy (3). Równanie (4), mimo bardziej skomplikowanej postaci, pozwala także poprawnie prognozować temperaturę i wilgotność schłodzonego powietrza rozważaną chłodziarką. Przedstawiona metoda prognozy parametrów schłodzonego powietrza może być wykorzystana przez służby wentylacyjne kopalń oraz firmy serwisujące chłodziarki TS-300 do diagnozowania poprawności ich działania. Jest ona także dobrym narzędziem oceniającym efektywność chłodzenia nimi powietrza.

#### Literatura

- FILEK K., NOWAK B. 1994 – Przepływ powietrza kopalnianego przez chłodnicę z uwzględnieniem możliwości wykrapalania się wody. Archives of Minig Scieees vol. 39, iss. 4, Kraków, s.529-542
- LUCZAK R. 2012. – Metoda oceny efektywności pracy górniczych chłodzarek bezpośredniego działania na przykładzie typoszeregu TS. Rozprawa doktorska. Praca niepublikowana.
- LUSKA P. 2003 – Prognoza parametrów powietrza schładzanego górniczą chłodziarką powietrza z ekologicznym czynnikiem chłodniczym. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków. Praca niepublikowana.

Tabela 3. Porównanie wyznaczonej z pomiarów i obliczeń prognozowanej temperatury i wilgotności właściwej powietrza na wylocie z parownika chłodziarki TS-300. Odchyłki bezwzględne  
 Table 3. Comparison of measured and calculated forecasting temperature and specific humidity of air at the outlet of the evaporator of TS-300 refrigerator. Absolute deviations

Lp.	Zmierzona temperatura powietrza na wylocie z parownika		Obliczona temperatura powietrza na wylocie z parownika		Odchyłka bezwzględna temperatury powietrza na wylocie z parownika		Zmierzona wilgotność właściwa powietrza na wylocie z parownika	Obliczona wilgotność właściwa powietrza na wylocie z parownika		Odchyłka bezwzględna wilgotności właściwej powietrza na wylocie z parownika	
	$t_p, ^\circ\text{C}$	$t_{st}, ^\circ\text{C}$	$t_{sk}, ^\circ\text{C}$	$t_{sl}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{sk}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{sl}, ^\circ\text{C}$		$x^3, \text{kg/kg p.s.}$	$x_{st}, \text{kg/kg p.s.}$	$x_{sk}, \text{kg/kg p.s.}$	$\Delta x_{sk}, \text{kg/kg p.s.}$
1	18,4	18,3	18,2	18,3	0,1	0,1	0,0117	0,0118	0,0118	-0,0001	-0,0001
2	18,4	18,4	18,3	18,4	0,0	0,0	0,0117	0,0119	0,0118	-0,0002	-0,0001
3	18,4	18,5	18,4	18,5	-0,1	-0,1	0,0120	0,0119	0,0119	0,0001	0,0001
4	18,4	18,5	18,4	18,5	-0,1	-0,1	0,0117	0,0119	0,0119	-0,0002	-0,0002
5	19,4	19,4	19,3	19,4	0,0	0,0	0,0128	0,0126	0,0126	0,0002	0,0002
6	19,2	19,3	19,3	19,3	-0,1	-0,1	0,0126	0,0126	0,0125	0,0000	0,0001
7	19,4	19,8	19,7	19,7	-0,4	-0,4	0,0128	0,0129	0,0129	-0,0001	-0,0001
8	18,4	18,5	18,4	18,4	-0,1	-0,1	0,0120	0,0119	0,0119	0,0001	0,0001
9	18,4	18,6	18,5	18,5	-0,2	-0,2	0,0117	0,0120	0,0119	-0,0003	-0,0002
10	19,6	20,1	20,0	20,0	-0,5	-0,4	0,0129	0,0131	0,0131	-0,0002	-0,0002

MARKEFKA P., STEFANOWICZ T. 1986 – Wentylacyjne sposoby i środki zapobiegania nadmiernym przyrostom temperatury powietrza w drażonych wyrobiskach korytarzowych. „Budownictwo Węglowe Projekty-Problemy” nr 6, s. 20-27.  
 NOWAK B., FILEK K., KUCZERA Z., ŁUCZAK R., PTASZYŃSKI B., ŻYCZKOWSKI P. 2010 – Use of statistical methods to the work of local air cooling systems in excavations. Archives of Mining Science, vol.55, iss. 4, Kraków, 907-922.  
 NOWAK B., ŁUCZAK R. 2015 – Thermal power of the TS-300B refrigerator in the aspects of statistical research. Archives of Mining Sciences, Archives of Mining Science, vol. 60, iss. 3, Kraków, s.715–728.  
 NOWAK B., ŁUCZAK R., ŻYCZKOWSKI P. 2016 – Temperatura i wilgotność powietrza ochłodzonego za pomocą chłodziarki sprężarkowej TS-300. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja. Wydawnictwo SIGMA-NOT. Warszawa, s.330-334.  
 Wentylatory. Materiały firmy Stalkowent. 2007.

Artykuł wpłynął do redakcji – grudzień 2016  
 Artykuł akceptowano do druku 5.03.2017