

*Bernard Nowak, Krzysztof Filek, Marian Branny**

WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKÓW WYMIANY CIEPŁA I MASY W WENTYLATOROWEJ WYPARNEJ CHŁODNICY WODY**

1. Wprowadzenie

Wyparne wentylatorowe chłodnice wody są często wykorzystywane w kopalniach podziemnych stosujących lokalne systemy chłodnicze do zwalczania zagrożenia ciepłego, szczególnie w wyrobiskach eksploatacyjnych i przygotowawczych. Ochładzanie powietrza odbywa się w przepływowych wymiennikach ciepła – w parownikach chłodziarek sprężarkowych przy chłodzeniu bezpośrednim lub w chłodnicach wodnych przy chłodzeniu pośrednim. Ciepło odebrane powietrzu jest przenoszone do skraplacza chłodziarki za pomocą czynnika chłodniczego bez pośrednictwa wody w pierwszym przypadku lub z jej pośrednictwem w drugim. Ze skraplacza ciepło odbierane jest przez krążącą w obwodzie zamkniętym wodę chłodzącą, która z kolei schładzana jest w wyparnej chłodnicy wody, zlokalizowanej w prądzie powietrza zużytego. Powietrze to stanowi czynnik ostatecznie wynoszący ciepło poza kopalnię do atmosfery.

Przedmiotem zainteresowania artykułu są chłodnice współpracujące ze sprężarkowymi górnymi chłodziarkami powietrza dwóch typów:

- 1) chłodnica wyparna typu RK-450 w układzie chłodziarki DV-290 z czynnikiem chłodniczym R22,
- 2) chłodnica wyparna typu CWW-420 w układzie chłodziarki TS-300B z czynnikiem chłodniczym R407c.

Zasada pracy tych chłodziarek jest identyczna, a konstrukcja podobna. Są to chłodziarki bezpośredniego działania; klimatyzowanie wyrobisk eksploatacyjnych odbywa się wg następującego schematu:

- powietrze schładzane jest w parowniku chłodziarki podczas parowania czynnika chłodniczego,

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, AGH, Kraków.

** Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt badawczy nr N N524 2169 33.

- przegrzana para czynnika chłodniczego sprężana jest w sprężarce do ciśnienia wyższego niż w parowniku, w wyniku czego wzrasta też jej temperatura,
- czynnik ochładzany jest w skraplaczu przez wodę chłodzącą, na skutek czego skrapla się i obniża temperaturę,
- w zaworze rozprężnym następuje obniżenie ciśnienia ciekłego czynnika i dalsze obniżenie jego temperatury, po czym kierowany jest on ponownie do parownika,
- ogrzana w skraplaczu woda doprowadzana jest do chłodnicy wyparnej, w której jest schładzana i kierowana ponownie do skraplacza; powierzchnia przepływu tej chłodnicy od strony powietrza zraszana jest wodą dla zwiększenia intensywności chłodzenia,
- powietrze płynące przez chłodnicę wyparną zwiększa swą temperaturę i wilgotność, po czym odprowadzane jest na zewnątrz.

Jak widać, chłodnica wyparna jest ostatnim z ciągu urządzeń systemu klimatyzacji, umożliwiającym oddanie powietrzu zużytemu ciepła odebranego powietrzu w miejscu jego schładzania.

2. Chłodnica wyparna

Chłodnica wyparna zapewnia wymianę ciepła i masy między wodą a powietrzem głównie dzięki parowaniu wody zraszającej zewnętrzną powierzchnię jej przepływu. Należy wyjaśnić, że w chłodnicy takiej oprócz powietrza odbywa się przepływ dwóch oddzielnych od siebie strumieni wody – wody chłodzonej, przepływającej wewnątrz rurek chłodnicy oraz wody zraszającej, ściekającej po zewnętrznych ściankach tych rurek. Powietrze opływające z zewnątrz mokre rurki wymiennika, przejmuje ciepło (głównie w postaci utajonej, związane z parowaniem wody zraszającej, ale także dopływające do niego na sposób jawny) i masę (parę wodną). Obydwa strumienie wody krążą dzięki pracy pomp w obwodach zamkniętych, przy czym ubytek wody zraszającej (parowanie) jest uzupełniany, natomiast powietrze tłoczy do chłodnicy połączony z nią wentylator.

W pracy [1] przedstawiono, wraz z ich wyprowadzeniem, równania opisujące działanie takiej chłodnicy:

$$Q_w c_c (t_{w1} - t_{w2}) = kF_o (t_w - t_z) \quad (1)$$

$$Q_{z1} - Q_{z2} = Q_p (x_2 - x_1) \quad (2)$$

$$Q_p (x_2 - x_1) = \beta F_x (x_{nz} - x) \quad (3)$$

$$Q_p \left[c_p (t_{p2} - t_{p1}) + c_w (t_{p2} x_2 - t_{p1} x_1) \right] = \\ = \alpha F_t (t_z - t_p) + \beta F_x (x_{nz} - x) c_w t_z \quad (4)$$

$$c_c (Q_{z1} t_{z1} - Q_{z2} t_{z2}) = \\ = \beta F_x (x_{nz} - x) (c_w t_z + r_p) + \alpha F_t (t_z - t_p) - kF_o (t_w - t_z) \quad (5)$$

gdzie:

- c_c — ciepło właściwe wody [J/(kg·K)],
- c_p — ciepło właściwe powietrza suchego przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],
- c_w — ciepło właściwe pary wodnej przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],
- F_o — pole powierzchni przenikania ciepła przez przeponę chłodnicy [m²],
- F_x — pole powierzchni wnikania pary wodnej do powietrza [m²],
- F_t — pole powierzchni wnikania ciepła od wody zraszającej do powietrza [m²],
- k — współczynnik przenikania ciepła przez przeponę chłodnicy [W/(m²·K)],
- Q_p — masowy strumień powietrza suchego w chłodnicy [kg/s],
- Q_w — masowy strumień wody chłodzonej [kg/s],
- Q_{z1} — masowy strumień dopływającej wody zraszającej [kg/s],
- Q_{z2} — masowy strumień odpływającej wody zraszającej [kg/s],
- r_p — utajone ciepło parowania wody [J/kg],
- t_{p1} — temperatura powietrza na wlocie chłodnicy [°C],
- t_{p2} — temperatura powietrza na wylocie chłodnicy [°C],
- t_p — średnia temperatura powietrza w chłodnicy [°C],
- t_{w1} — temperatura wody chłodzonej na wlocie chłodnicy [°C],
- t_{w2} — temperatura wody chłodzonej na wylocie chłodnicy [°C],
- t_w — średnia temperatura wody chłodzonej w chłodnicy [°C],
- t_{z1} — temperatura wody zraszającej na wlocie chłodnicy [°C],
- t_{z2} — temperatura wody zraszającej na wylocie chłodnicy [°C],
- t_z — średnia temperatura wody zraszającej w chłodnicy [°C],
- x_1 — wilgotność właściwa powietrza na wlocie chłodnicy [kg/kg],
- x_2 — wilgotność właściwa powietrza na wylocie chłodnicy [kg/kg],
- x — średnia wilgotność właściwa powietrza w chłodnicy [kg/kg],
- x_{nz} — wilgotność właściwa powietrza nasyconego w temperaturze wody zraszającej [kg/kg],
- α — współczynnik wnikania ciepła od wody zraszającej do powietrza [W/(m²·K)],
- β — współczynnik przejmowania masy pary wodnej przez powietrze [kg/(m²·s)].

W modelu matematycznym chłodnicy wyparnej (1)÷(5) występują 3 współczynniki wymiany ciepła i masy – k , α i β . Są one przedmiotem zainteresowania niniejszego artykułu.

3. Pomiary

Dla wyznaczenia wymienionych współczynników wykonano serię badań eksperymentalnych na stanowisku prób w laboratorium (rys. 1). Pomiarami objęto obie wymienione wcześniej chłodnice wyparne.

Mierzono następujące wielkości:

- bezwzględne ciśnienie powietrza b ,
- strumień objętości powietrza w chłodnicy Q_p ,
- temperaturę powietrza na wlocie chłodnicy t_{p1} ,
- wilgotność względną powietrza na wlocie chłodnicy ϕ_1 ,

- temperaturę powietrza na wylocie chłodnicy t_{p2} ,
- wilgotność względną powietrza na wylocie chłodnicy φ_2 , analogicznie jak powyżej, wyliczono odpowiadającą temperaturze t_{p2} wilgotność nasylenia x_{n2} i wilgotność właściwą powietrza na wylocie chłodnicy x_2
- strumień masy wody chłodzonej w chłodnicy Q_w ,
- temperaturę wody chłodzonej na wlocie chłodnicy t_{w1} ,
- temperaturę wody chłodzonej na wylocie chłodnicy t_{w2} ,
- strumień masy wody zraszającej na wlocie chłodnicy Q_{z1} ,
- temperaturę wody zraszającej na wlocie chłodnicy t_{z1} ,
- temperaturę wody zraszającej na wylocie chłodnicy t_{z2} .

Z powyższych wielkości wyliczono odpowiadającą temperaturze t_{p1} wilgotność nasylenia x_{n1} i wilgotność właściwą powietrza na wlocie chłodnicy x_1 [4]:

$$x_{n1} = \frac{379,8 \cdot 10^{u_1}}{b - 610,6 \cdot 10^{u_1}}, \quad \text{gdzie} \quad u_1 = \frac{7,5t_{p1}}{237,29 + t_{p1}} \quad (6)$$

$$x_1 = \frac{0,622\varphi_1 x_{n1}}{0,622 + x_{n1}(1 - \varphi_1)} \quad (7)$$

Współczynniki wymiany ciepła i masy wyznaczono z powyższych równań na podstawie pomiarów, przyjmując ponadto następujące założenia:

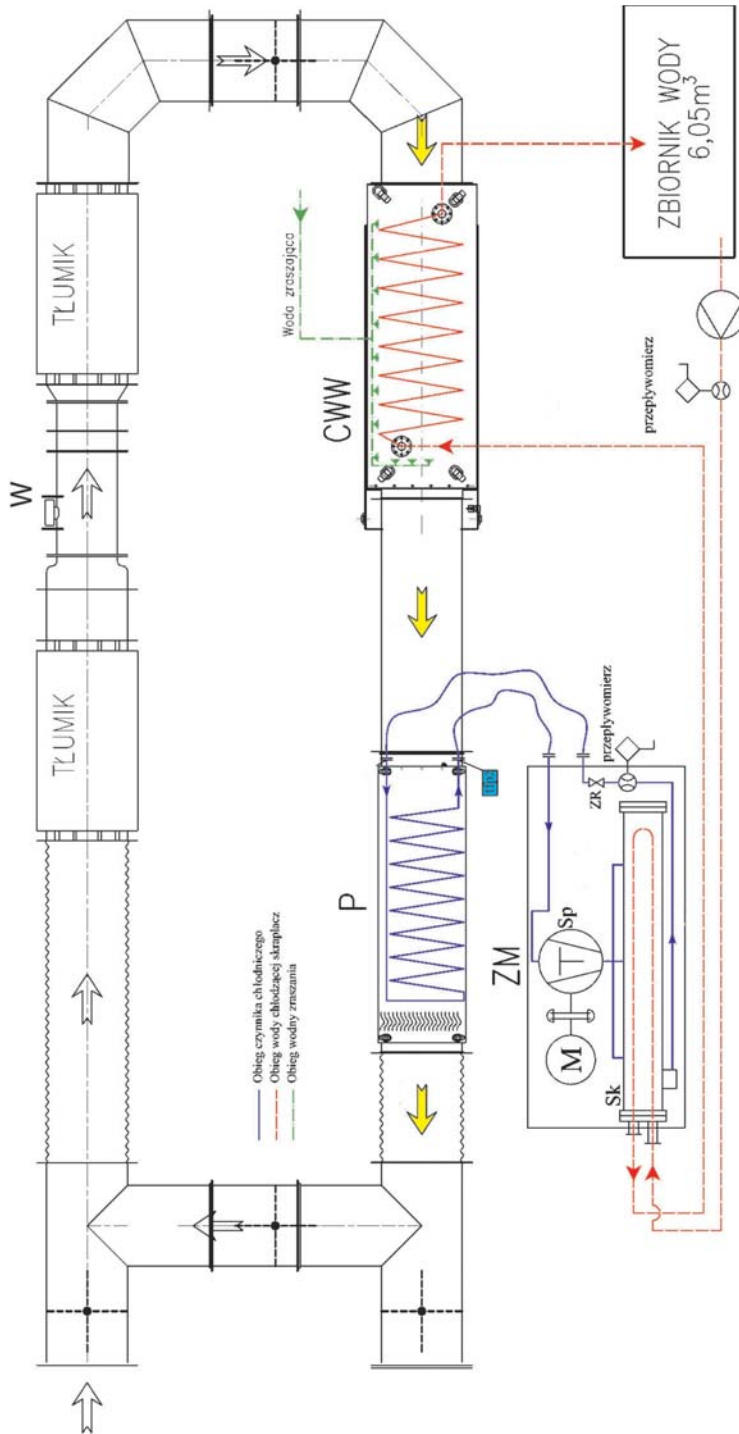
- parametry średnie (t_p , t_w , x , x_{nz}) równe są średnim arytmetycznym ich wartości na wlocie i wylocie chłodnicy,
- dla temperatury wody zraszającej przyjęto, że jej wartość wylotowa jest równa wartości średniej ($t_{z2} = t_z$),
- pola powierzchni przenikania ciepła (F_o), wnikania ciepła (F_t) i wnikania masy pary wodnej (F_x) są równe polu powierzchni przepływu chłodnicy, tj. 157 m² dla chłodnicy RK-450 i 132,6 m² dla chłodnicy CWW-420.

Takie wielkości, jak b , Q_p , t_{p1} , φ_1 , Q_w , t_{w1} , Q_{z1} i t_{z1} pełniły rolę danych wielkości wejściowych. Współczynniki α i β określono w oparciu o wyniki pomiarów temperatury i wilgotności powietrza na wylocie chłodnicy t_{p2} i φ_2 , natomiast współczynnik k wyznaczono ze wzoru:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_{wz}} + \frac{\delta}{\lambda_z} + \frac{1}{\alpha_{ww}} \right)^{-1} \quad (8)$$

gdzie:

- α_{ww} — współczynnik wnikania ciepła od wody chłodzonej do przepływu [W/(m²·K)],
- α_{wz} — współczynnik wnikania ciepła od przepływu do wody zraszającej [W/(m²·K)],
- λ_p — współczynnik przewodnictwa cieplnego materiału przepływu [W/(m·K)],
- δ — grubość ścianki przepływu [m].



Rys. 1. Schemat laboratoryjnego stanowiska do badania chłodnic (udostępniony przez „Termospec” Sp. z o.o.): W – wentylator, P – parownik, ZM – zespół maszynowy (M silnik, Sp – sprężarka, Sk – skraplacz, ZR – zawór rozprężny, urządzenia sterujące i zabezpieczające), CW – chłodnica wyparna wody.

Współczynniki α_{ww} i α_{wz} wyznaczono z kolei z zależności [2, 3]:

$$\alpha_{ww} = B \frac{\nu^{0,8}}{d_w^{0,2}} \quad (9)$$

$$\alpha_{wz} = 0,01 \frac{\lambda_w}{\vartheta_z} \text{Re}^{0,333} \text{Pr}^{0,333} \quad (10)$$

gdzie:

B — stała równa dla wody dla rozpatrywanego zakresu temperatur około 2200 $[\text{Ws}^{0,8}/(\text{m}^{2,6} \cdot \text{K})]$,

ν — średnia prędkość przepływu wody chłodzonej w rurkach chłodnicy $[\text{m/s}]$,

d_w — wewnętrzna średnica rurek chłodnicy $[\text{m}]$,

λ_w — współczynnik przewodnictwa cieplnego wody $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$,

ϑ_z — obliczeniowa grubość warstwy wody zraszającej, wyznaczona metodą aproksymacji liniowej na podstawie danych zawartych w [2] $[\text{m}]$,

Re — liczba Reynoldsa:

$$\text{Re} = \frac{4\Gamma}{\mu_w} \quad (11)$$

Pr — liczba Prandtla:

$$\text{Pr} = \frac{c_c \mu_w}{\lambda_w} \quad (12)$$

gdzie:

Γ — jednostkowe natężenie zraszania $[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})]$, wyliczone ze wzoru:

$$\Gamma = \frac{Q_{z1}}{\pi d_z} \quad (13)$$

d_z — zewnętrzna średnica rurek chłodnicy $[\text{m}]$,

μ_w — dynamiczny współczynnik lepkości wody $[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})]$.

Ponadto z pomiarów wyznaczono dwie wartości mocy chłodnicy – moc liczoną od strony powietrza (N_{wp}) i liczoną od strony wody chłodzonej (N_{ww}). Oczywiście rzeczywiste ich wartości (przy założeniu, że całą moc wody przejmuje powietrze) są sobie równe, jednak otrzymane wyniki się różnią z powodu występowania błędów pomiarowych.

Badania eksperymentalne wykonano dla 12 wariantów – po 6 dla każdej z chłodnic. Ich wyniki zestawiono w tabelach 1 i 2, w których pokazano też wyliczone wartości omawianych współczynników i mocy chłodnicy. Z otrzymanych wyników wyznaczono (tab. 3) proste regresji $k(\text{tw}1)$, $a(\text{tw}1)$ i $b(\text{tw}1)$ pokazane na rysunkach 2, 3 i 4, a także współczynniki korelacji liniowej.

TABELA 1

Chłodnica wyparna RK-450. Wyniki pomiarów i obliczeń

Wariant		1	2	3	4	5	6
Bezwzględne ciśnienie powietrza	b	hPa	1005	1005	1005	1005	1005
Strumień objętości powietrza	Q_{pv}	m ³ /min	500	500	500	500	500
Temperatura powietrza na wlocie	t_{p1}	°C	23,0	24,0	24,0	24,2	24,2
Wilgotność względna powietrza na wlocie	j_1	%	60,2	65,2	65,2	78,2	78,2
Temperatura powietrza na wylocie	t_{p2}	°C	28,8	29,0	31,0	31,2	32,8
Wilgotność względna powietrza na wylocie	j_2	%	80,2	91,3	79,7	88,9	82,8
Strumień masy wody chłodzonej	Q_w	kg/s	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
Temperatura wody chłodzonej na wlocie	t_{w1}	°C	30,6	31,8	32,6	33,3	34,4
Temperatura wody chłodzonej na wylocie	t_{w2}	°C	26,0	27,0	27,5	28,0	29,0
Strumień masy wody zraszającej na wlocie	Q_{z1}	kg/s	0,18	0,19	0,16	0,18	0,24
Temperatura wody zraszającej na wlocie	t_{z1}	°C	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
Temperatura wody zraszającej na wylocie	t_{z2}	°C	28,0	29,0	30,0	30,5	31,0
Moc chłodnicza liczona od strony powietrza	N_{vp}	kW	285,1	312,2	319,6	327,2	355,0
Moc chłodnicza liczona od strony wody	N_{wvp}	kW	298,7	311,7	331,2	344,2	350,7
Współczynnik przenikania ciepła	k	W/(m ² ·K)	3536	3615	3555	3651	3694
Współczynnik przyjmowania ciepła	α	W/(m ² ·K)	185,2	134,6	215,2	176,8	258,2
Współczynnik przyjmowania masy	β	kg/(m ² ·s)	0,0686	0,0893	0,0723	0,0933	0,0714

TABELA 2

Chłodnica wyparna CWW-420. Wyniki pomiarów i obliczeń

Wariant		1	2	3	4	5	6
Bezwzględne ciśnienie powietrza	b	hPa	1001	1001	1001	1001	1001
Strumień objętości powietrza	Q_{pv}	m ³ /min	510	510	510	510	510
Temperatura powietrza na wlocie	t_{p1}	°C	23,0	24,0	24,0	24,0	25,8
Wilgotność względna powietrza na wlocie	j_1	%	57,5	63,9	63,9	71,3	69,5
Temperatura powietrza na wylocie	t_{p2}	°C	26,0	29,0	31,0	31,0	32,8
Wilgotność względna powietrza na wylocie	j_2	%	80,3	92,7	79,7	90,2	86,6
Strumień masy wody chłodzonej	Q_w	kg/s	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Temperatura wody chłodzonej na wlocie	t_{w1}	°C	31,5	32,2	33,0	33,6	34,5
Temperatura wody chłodzonej na wylocie	t_{w2}	°C	26,5	27,0	27,5	28,0	28,5
Strumień masy wody zraszającej na wlocie	Q_{z1}	kg/s	0,20	0,20	0,18	0,24	0,24
Temperatura wody zraszającej na wlocie	t_{z1}	°C	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
Temperatura wody zraszającej na wylocie	t_{z2}	°C	28,5	29,0	30,0	30,5	31,0
Moc chłodnicza liczona od strony powietrza	N_{vp}	kW	311,2	333,4	332,4	354,0	370,8
Moc chłodnicza liczona od strony wody	N_{wvp}	kW	314,3	326,8	345,7	352,0	377,1
Współczynnik przenikania ciepła	k	W/(m ² ·K)	3577	3608	3586	3767	3709
Współczynnik przyjmowania ciepła	α	W/(m ² ·K)	193,2	161,5	247,4	213,9	262,8
Współczynnik przyjmowania masy	β	kg/(m ² ·s)	0,0814	0,1143	0,0864	0,1193	0,0905

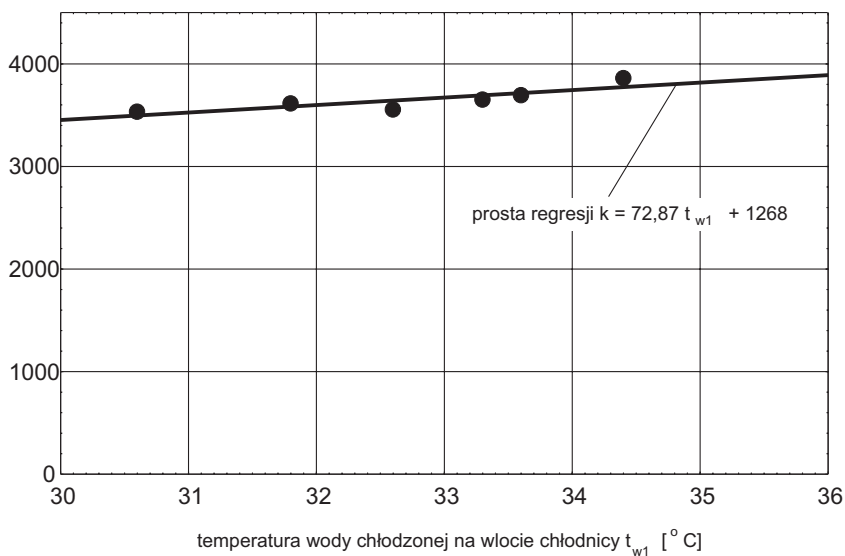
TABELA 3

Wyznaczona z danych pomiarowych regresja i korelacja liniowa zależności $k(t_{wp})$, $\alpha(t_{wp})$ i $\beta(t_{wp})$ dla chłodnic wyparnych

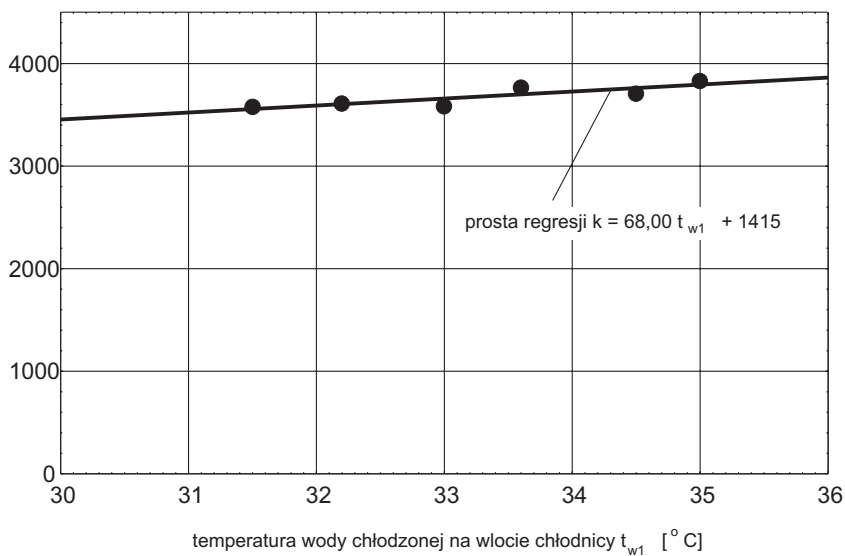
Chłodnica RK-450			
	Współczynnik k	Współczynnik α	Współczynnik β
wartość średnia	$k_{gr} = 3652 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$	$\alpha_{gr} = 197,0 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$	$\beta_{gr} = 0,0798 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$
równanie prostej regresji	$k(t_{wp}) = 72,87 \cdot t_{wp} + 1268$	$\alpha(t_{wp}) = 15,84 \cdot t_{wp} - 321,4$	$\beta = (2,47 \cdot t_{wp} - 0,87) \cdot 10^{-3}$
współczynnik korelacji liniowej	$r = 0,844$	$r = 0,517$	$r = 0,323$

Chłodnica CWW-420			
	Współczynnik k	Współczynnik α	Współczynnik β
wartość średnia	$k_{gr} = 3680 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$	$a_{gr} = 220,5 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$	$b_{gr} = 0,1001 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$
równanie prostej regresji	$k(t_{wp}) = 68,00 \cdot t_{wp} + 1415$	$a(t_{wp}) = 21,77 \cdot t_{wp} - 504,3$	$b = (3,40 \cdot t_{wp} - 13,30) \cdot 10^{-3}$
współczynnik korelacji liniowej	$r = 0,863$	$r = 0,761$	$r = 0,286$

Współczynnik przenikania ciepła przez przeponę
chłodziwy RK-450

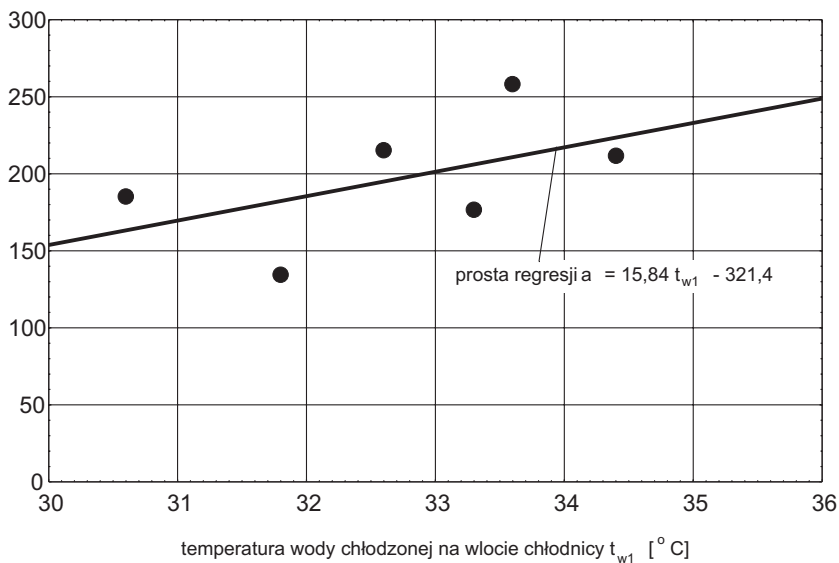


Współczynnik przenikania ciepła przez przeponę
chłodziwy CWW-420

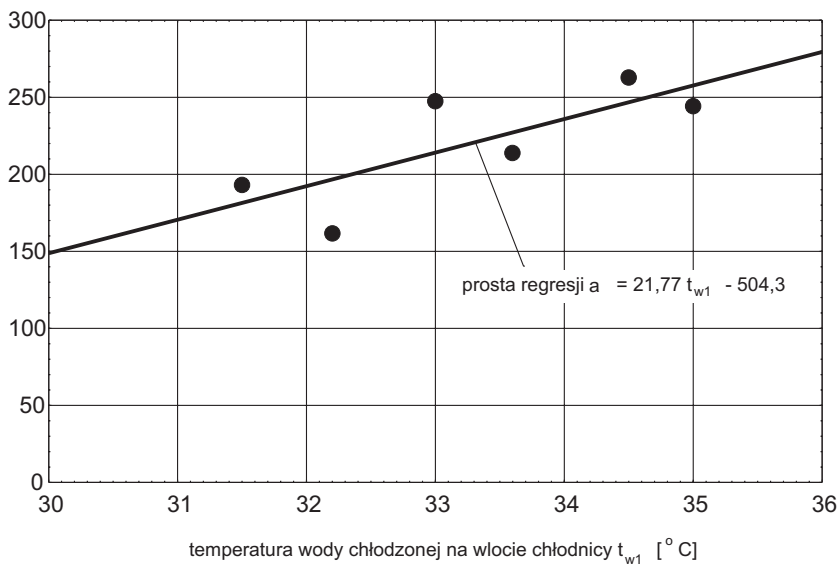


Rys. 2. Wyznaczone współczynniki k w funkcji wlotowej temperatury wody chłodzonej t_{w1}

Współczynnik przejmowania ciepła przez powietrze
w chłodnicy RK-450

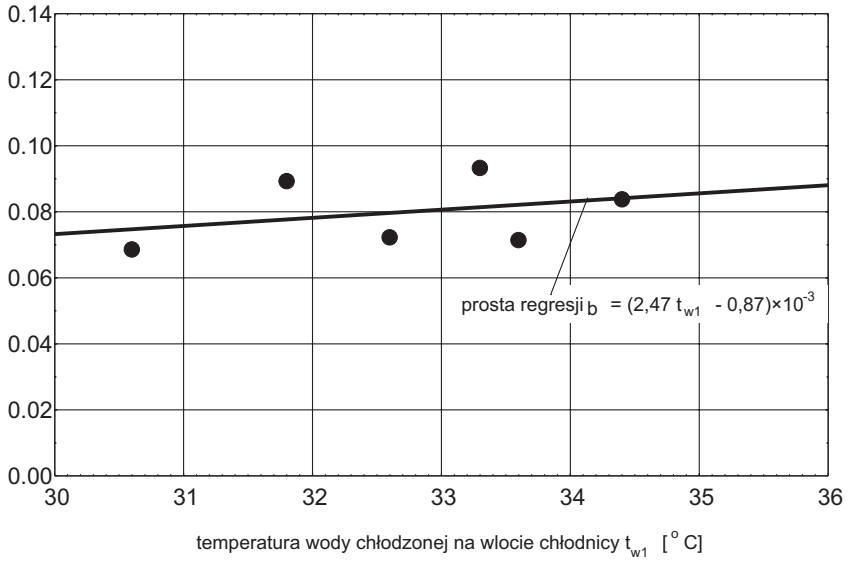


Współczynnik przejmowania ciepła przez powietrze
w chłodnicy CWW-420

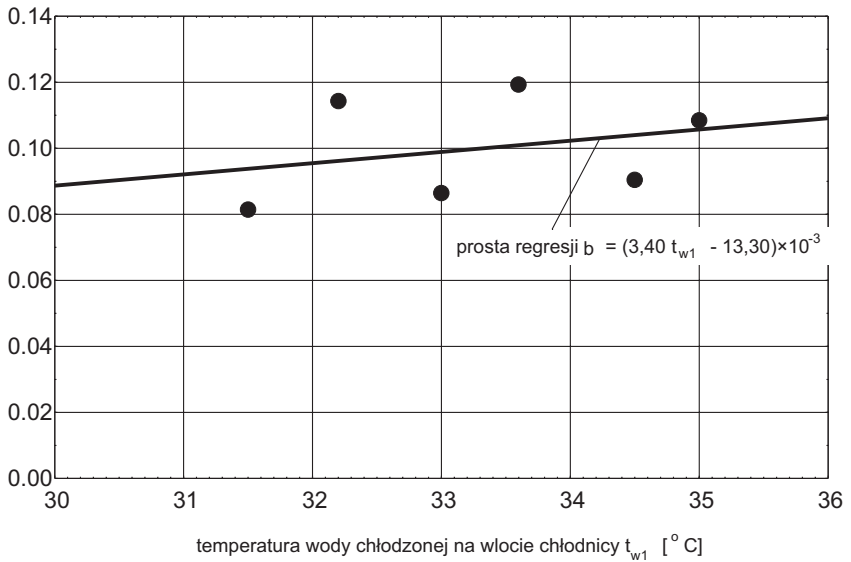


Rys. 3. Wyznaczone współczynniki w funkcji wlotowej temperatury wody chłodzonej t_{w1}

Współczynnik przejmowania pary wodnej przez powietrze
w chłodnicy RK-450



Współczynnik przejmowania pary wodnej przez powietrze
w chłodnicy CWW-420



Rys. 4. Wyznaczone współczynniki w funkcji wlotowej temperatury wody chłodzonej t_{w1}

4. Podsumowanie

Obserwacja wartości współczynników przenikania ciepła przez przeponeę chłodnicy wyparnej (k) oraz przejmowania przez powietrze ciepła (α) i masy pary wodnej (β), wyliczonych w oparciu o badania eksperymentalne pozwala sformułować następujące wnioski:

- wyznaczony z wzoru (8) współczynnik k przyjmuje wartości z wąskiego przedziału od 3536 do 3860 W/(m²·K), podobne dla obu chłodnic,
- współczynnik α przyjmuje wartości: dla chłodnicy RK-450 od 134,6 do 258,2 W/(m²K) – średnio 197,0 W/(m²K), dla chłodnicy CWW-420 od 161,5 do 262,8 W/(m²K) – średnio 220,5 W/(m²K); wartość średnia współczynnika α chłodnicy CWW-420 jest większa od odpowiadającej jej wartości określonej dla chłodnicy RK-450 o około 12%,
- współczynnik β przyjmuje wartości: dla chłodnicy RK-450 od 0,0686 do 0,0933 kg/(m²s) – średnio 0,0798 kg/(m²s), dla chłodnicy CWW-420 od 0,0814 do 0,1193 kg/(m²s) – średnio 0,1001 kg/(m²s); wartość średnia współczynnika β chłodnicy CWW-420 jest większa od odpowiadającej jej wartości określonej dla chłodnicy RK-450 o około 25%,
- wartości współczynników k , α i β rosną ze wzrostem wlotowej temperatury wody chłodzonej t_{w1} .

Należy tu dodać jeszcze pewien komentarz. Jak widać w tabelach, badania obejmowały przypadki, w których pewne wielkości wejściowe (jak ciśnienie powietrza na wlocie, strumień masy wody chłodzonej czy temperatura wlotowa wody zraszającej) nie ulegały zmianom. Były to bowiem stany pracy tych chłodnic, w których wymienione parametry przyjmują wartości zbliżone do nominalnych. Każdy z powyższych wniosków, zwłaszcza dotyczący wartości liczbowych, odnosi się zatem do takich właśnie warunków.

Pewne niejasności mogą tu też budzić wartości liczbowe współczynnika β . Jego wymiar może sugerować, że z 1 m² w ciągu 1 sekundy paruje np. 0,1 kg wody zraszającej, co nie jest prawdą (przekraczałoby to wielokrotnie będący do dyspozycji strumień przepływu wody). Wyjaśnieniem może tu być równanie (3), z którego wynika, że masa wody parującej z powierzchni o takim polu i w takim czasie jest iloczynem współczynnika β i (bezwymiarowej, znacznie mniejszej od 1) różnicy wilgotności właściwych x_{wz} oraz x .

LITERATURA

- [1] *Filek K., Nowak B.*: Zmiana temperatury wody chłodzącej skraplacz górnicy chłodziarki powietrza w wentylatorowej chłodnicy wyparnej. Zeszyty Naukowe AGH „Górnictwo i Geoinżynieria”, z. 3, Kraków 2009
- [2] *Hobler T.*: Ruch ciepła i wymienniki. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, wydanie IV, Warszawa 1971
- [3] *Kołodziejczyk L., Rubik M.*: Technika chłodnicza w klimatyzacji. Arkady, Warszawa, 1976
- [4] *Roszczyński W., Trutwin W., Waclawik J.*: Kopalniane pomiary wentylacyjne. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1992