

*Bernard Nowak, Krzysztof Filek**

ZMIANA TEMPERATURY WODY CHŁODZĄCEJ SKRAPLACZ GÓRNICZEJ CHŁODZIARKI POWIETRZA W WENTYLATOROWEJ CHŁODNICY WYPARNEJ**

1. Wstęp

W układach klimatyzacji kopalń podziemnych stosuje się często sprężarkowe chłodziarki powietrza, z których ciepło odbierane jest przez wodę chłodzącą ich skraplacze. Ogrzana w skraplaczu woda krąży zwykle w obiegu zamkniętym zawierającym urządzenie służące do obniżania jej temperatury; schłodzona w nim woda wraca następnie do skraplacza chłodziarki. Urządzeniem tym jest najczęściej wentylatorowa chłodnica wyparna wody.

W niniejszej pracy, która dotyczy takiej chłodnicy wyparnej, używane jest pojęcie wody chłodzonej. Dla uniknięcia nieporozumień należy tu podkreślić, że występująca w tytule artykułu woda chłodząca skraplacz jest właśnie tą wodą chłodzoną w chłodnicy wyparnej.

Chłodnica taka stanowi ostatnie ogniwo w ciągu urządzeń uczestniczących w transporcie ciepła z wyrobisk eksploatacyjnych na powierzchnię. Zlokalizowana w prądzie powietrza zużytego chłodnica wyparna oddaje ciepło powietrzu głównie dzięki parowaniu wody zraszającej zewnętrzną powierzchnię jej przepony. Ciepło to jest następnie wraz z powietrzem usuwane przez szyb wentylacyjny do atmosfery.

2. Wyparna chłodnica wody

W wentylatorowej chłodnicy wyparnej odbywa się przepływ trzech różnych mediów:

- 1) wody chłodzonej,
- 2) wody zraszającej,
- 3) powietrza.

* 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.

Woda chłodzona krąży w obwodzie zamkniętym między skraplaczem agregatu chłodniczego, a omawianą chłodnicą. Ogrzana w skraplaczu woda po schłodzeniu w chłodnicy powraca do skraplacza, gdzie może być ponownie wykorzystana. Woda chłodzona przepływa przez chłodnicę wewnątrz rurek (zwykle miedzianych); ścianki rurek, oddzielające wodę chłodzoną od wody zraszającej i powietrza, noszą nazwę przepony.

Woda zraszająca także krąży w obwodzie zamkniętym, konieczne jest jednak jej uzupełnianie. Za pomocą dysz zraszających woda ta zwilża zewnętrzną powierzchnię przepony, a następnie ścieka do zbiornika, skąd ponownie jest tłoczona do dysz. Część wody paruje i w postaci pary wraz z powietrzem opuszcza chłodnicę; ubytek wody jest samoczynnie uzupełniany.

Powietrze przepływa przez chłodnicę pod wpływem pracy zainstalowanego na jej wlocie wentylatora. Przejmuje ono od wody zraszającej ciepło (jawne i utajone) oraz masę (para wodna) i wynosi je na zewnątrz kopalni.

W wentylatorowej chłodnicy wyparnej, dzięki zraszaniu wodą zewnętrznej powierzchni przepony (od strony powietrza), uzyskuje się znacznie większy niż bez zraszania współczynnik wnikania ciepła, przez co osiągnąć można większą moc cieplną wymiennika bez powiększania jego powierzchni [1, 2].

3. Model matematyczny chłodnicy wyparnej

Poniżej przedstawiono, wraz z wyprowadzeniem, równania matematycznego modelu chłodnicy wyparnej w stanie ustalonym. Przystępując do wyprowadzenia równań chłodnicy przyjęto, że jest ona elementem przestrzennie skupionym, z czym wiąże się skokowy charakter zmian parametrów przepływających przez chłodnicę powietrza i wody.

Dla wyprowadzenia równań ułożono bilanse:

- entalpii wody chłodzonej,
- masy wody zraszającej,
- masy pary wodnej w powietrzu,
- entalpii powietrza,
- entalpii wody zraszającej.

Bilans entalpii wody chłodzonej

Entalpia wnoszona z ciepłą wodą w czasie $\Delta\tau$:

$$H_1 = Q_w c_c t_{w1} \Delta\tau \quad (1)$$

Entalpia wynoszona z ochłodzoną wodą w czasie $\Delta\tau$:

$$H_2 = Q_w c_c t_{w2} \Delta\tau \quad (2)$$

Entalpia przekazana (poprzez przeponę) wodzie zraszającej w czasie $\Delta\tau$:

$$H_3 = kF_o (t_w - t_z) \Delta\tau \quad (3)$$

Bilans entalpii ma postać:

$$H_1 = H_2 + H_3 \quad (4)$$

co po podstawieniu daje się zapisać:

$$Q_w c_c (t_{w1} - t_{w2}) = k F_o (t_w - t_z) \quad (5)$$

gdzie:

- Q_w — masowy strumień wody chłodzonej [kg/s],
- c_c — ciepło właściwe wody [J/(kg·K)],
- 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_z — średnia temperatura wody zraszającej w chłodnicy [°C],
- k — współczynnik przenikania ciepła przez przeponę chłodnicy [W/(m²·K)],
- F_o — pole powierzchni przenikania ciepła przez przeponę chłodnicy [m²].

Bilans masy wody zraszającej

Masa wody wnoszona w czasie $\Delta\tau$:

$$m_1 = Q_{z1} \Delta\tau \quad (6)$$

Masa wody wynoszona w czasie $\Delta\tau$:

$$m_2 = Q_{z2} \Delta\tau \quad (7)$$

Masa wody przejęta przez powietrze w czasie $\Delta\tau$:

$$m_3 = Q_p (x_2 - x_1) \Delta\tau \quad (8)$$

Bilans masy jest tu następujący:

$$m_1 - m_2 = m_3 \quad (9)$$

czyli:

$$Q_{z1} - Q_{z2} = Q_p (x_2 - x_1) \quad (10)$$

gdzie:

- Q_{z1} — masowy strumień dopływającej wody zraszającej [kg/s],
- Q_{z2} — masowy strumień odpływającej wody zraszającej [kg/s],
- Q_p — masowy strumień powietrza suchego w chłodnicy [kg/s],
- x_1 — wilgotność właściwa powietrza na wlocie chłodnicy [kg/kg],
- x_2 — wilgotność właściwa powietrza na wylocie chłodnicy [kg/kg].

Bilans masy pary wodnej w powietrzu

Masa pary wodnej wnoszona do chłodnicy z powietrzem w czasie $\Delta\tau$:

$$m_4 = Q_p x_1 \Delta\tau \quad (11)$$

Masa pary wodnej wynoszona z powietrzem w czasie $\Delta\tau$:

$$m_5 = Q_p x_2 \Delta\tau \quad (12)$$

Masa pary wodnej przejmowana przez powietrze od parującej wody zraszającej w czasie $\Delta\tau$:

$$m_6 = \beta F_x (x_n - x) \Delta\tau \quad (13)$$

Bilans masy pary wodnej przyjmuje postać:

$$m_5 - m_4 = m_6 \quad (14)$$

a po dokonaniu podstawień:

$$Q_p (x_2 - x_1) = \beta F_x (x_{nz} - x) \quad (15)$$

gdzie:

- x — średnia wilgotność właściwa powietrza w chłodnicy [kg/kg],
- x_{nz} — średnia wilgotność właściwa powietrza nasyconego w temperaturze wody zraszającej [kg/kg],
- β — współczynnik przejmowania masy pary wodnej przez powietrze [kg/(m²·s)],
- F_x — pole powierzchni wnikania pary wodnej do powietrza [m²].

Bilans entalpii powietrza

Entalpia wnoszona z powietrzem w czasie $\Delta\tau$:

$$H_4 = Q_p (c_p t_{p1} + c_w t_{p1} x_1 + r_p x_1) \Delta\tau \quad (16)$$

Entalpia wynoszona z powietrzem w czasie $\Delta\tau$:

$$H_5 = Q_p (c_p t_{p2} + c_w t_{p2} x_2 + r_p x_2) \Delta\tau \quad (17)$$

Entalpia dopływająca od wody zraszającej w czasie $\Delta\tau$:

$$H_6 = \alpha F_t (t_z - t_p) \Delta\tau + (Q_{z1} - Q_{z2}) (c_w t_z + r_p) \Delta\tau \quad (18)$$

Można utworzyć bilans entalpii powietrza w postaci:

$$H_5 - H_4 = H_6 \quad (19)$$

który po podstawieniach daje:

$$\begin{aligned} Q_p \left[c_p (t_{p2} - t_{p1}) + c_w (t_{p2} x_2 - t_{p1} x_1) + r_p (x_2 - x_1) \right] = \\ = \alpha F_t (t_z - t_p) + (Q_{z1} - Q_{z2}) (c_w t_z + r_p) \end{aligned} \quad (20)$$

a po uwzględnieniu zależności (10) i (15):

$$\begin{aligned} Q_p \left[c_p (t_{p2} - t_{p1}) + c_w (t_{p2} x_2 - t_{p1} x_1) \right] = \\ = \alpha F_t (t_z - t_p) + \beta F_x (x_{nz} - x) c_w t_z \end{aligned} \quad (21)$$

gdzie:

- c_p — ciepło właściwe powietrza suchego przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],
- c_w — ciepło właściwe pary wodnej przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],
- t_{p1} — temperatura powietrza na wlocie chłodnicy [°C],
- t_{p2} — temperatura powietrza na wylocie chłodnicy [°C],
- t_p — średnia temperatura powietrza w chłodnicy [°C],
- r_p — utajone ciepło parowania wody [J/kg],
- α — współczynnik wnikania ciepła od wody zraszającej do powietrza [W/(m²·K)],
- F_t — pole powierzchni wnikania ciepła od wody zraszającej do powietrza [m²].

Bilans entalpii wody zraszającej

Entalpia wnoszona z wodą w czasie $\Delta\tau$:

$$H_7 = Q_{z1} c_c t_{z1} \Delta\tau \quad (22)$$

Entalpia wynoszona z wodą w czasie $\Delta\tau$:

$$H_8 = Q_{z2} c_c t_{z2} \Delta\tau \quad (23)$$

Entalpię H_3 dopływającą od wody chłodzonej określa wzór (3) zaś entalpię H_6 przekazywaną powietrzu wzór (18).

Bilans:

$$H_7 - H_8 = H_6 - H_3 \quad (24)$$

czyli:

$$\begin{aligned} c_c (Q_{z1} t_{z1} - Q_{z2} t_{z2}) = \\ = (Q_{z1} - Q_{z2}) (c_w t_z + r_p) + \alpha F_t (t_z - t_p) - k F_o (t_w - t_z) \end{aligned} \quad (25)$$

co po uwzględnieniu (10) i (15) daje:

$$\begin{aligned} c_c (Q_{z1} t_{z1} - Q_{z2} t_{z2}) = \\ = \beta F_x (x_{nz} - x) (c_w t_z + r_p) + \alpha F_t (t_z - t_p) - k F_o (t_w - t_z) \end{aligned} \quad (26)$$

gdzie:

- t_{z1} — temperatura wody zraszającej na wlocie chłodnicy [°C],
 t_{z2} — temperatura wody zraszającej na wylocie chłodnicy [°C].

Równania (5), (10), (15), (21) i (26) tworzą układ równań opisujący pracę wyparnej chłodnicy wody w stanie ustalonym. W układzie tym niewiadome stanowią: t_w , t_{w2} , t_z , t_{z2} , t_p , t_{p2} , x , x_2 , x_{nz} i Q_{z2} – pozostałe wielkości uznawane są za znane. Dla zrównania liczby niewiadomych z liczbą równań układ należy uzupełnić pięcioma równaniami określającymi wielkości średnie (t_w , t_z , t_p , x , x_{nz}).

4. Przykładowe obliczenia

W oparciu o przedstawiony wyżej matematyczny opis chłodnicy wyparnej wykonano przykładowe obliczenia. Dla ich przeprowadzenia przyjęto, że średnie temperatury powietrza, wody zraszającej i wody chłodzonej, a także wilgotności właściwej powietrza (aktualnej i określonej dla temperatury wody zraszającej), równe są średnim arytmetycznym ich wartości wlotowych i wylotowych – zależności (27)÷(31):

$$t_w = \frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} \quad (27)$$

$$t_z = \frac{t_{z1} + t_{z2}}{2} \quad (28)$$

$$t_p = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{2} \quad (29)$$

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (30)$$

$$x_{nz} = \frac{x_{nz1} + x_{nz2}}{2} \quad (31)$$

gdzie wilgotność właściwą powietrza nasyconego parą wodną określono z temperatury wody zraszającej wg poniższego wzoru [3], z którego po podstawieniu $t_z = t_{z1}$ otrzymano x_{nz1} , a po podstawieniu $t_z = t_{z2}$ otrzymano x_{nz2} :

$$x_{nz} = \frac{379,8 \cdot 10^u}{p - 610,6 \cdot 10^u} \quad \text{przy czym} \quad u = \frac{7,5t_z}{t_z + 237,29} \quad (32)$$

gdzie p – ciśnienie powietrza [Pa].

Przyjęto też, że między temperaturą powietrza (t_p), jego wilgotnością względną (φ), wilgotnością właściwą (x) i wilgotnością właściwą w stanie nasycenia (x_{np}) zachodzą związki (32) i (33); we wzorze (32) należy podstawić: t_p za t_z i x_{np} za x_{nz} :

$$\varphi = \frac{x(0,622 + x_{np})}{x_{np}(0,622 + x)} \cdot 100\% \quad (33)$$

Jako wyniki obliczeń podano wielkości wylotowe:

- temperaturę wody chłodzonej t_{w2} ,
- masowy strumień wody zraszającej Q_{z2} ,
- temperaturę wody zraszającej t_{z2} ,
- temperaturę powietrza t_{p2} ,
- wilgotność względną powietrza φ_2 ,
- wilgotność właściwą powietrza x_2 ,
- moc chłodnicy wyznaczoną ze wzoru:

$$N = Q_w c_c (t_{w1} - t_{w2}) \quad (34)$$

Obliczenia wykonano przy użyciu utworzonego w tym celu programu komputerowego, przy czym objęto nimi 27 wariantów, różniących się między sobą temperaturą i wilgotnością względną powietrza na wlocie, wlotową temperaturą wody chłodzonej i natężeniem przepływu wody zraszającej.

Wartości liczbowe pozostałych wielkości, jednakowe dla wszystkich wariantów przyjęto następujące:

- | | |
|--|---|
| — ciśnienie powietrza | $p = 100,5 \text{ kPa}$, |
| — temperatura dopływającej wody zraszającej | $t_{z1} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, |
| — strumień masowy wody chłodzonej | $Q_w = 15 \text{ kg/s}$, |
| — strumień masowy powietrza suchego | $Q_p = 12,7 \text{ kg/s}$, |
| — współczynnik wnikania ciepła | $\alpha = 2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, |
| — współczynnik wnikania masy | $\beta = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, |
| — współczynnik przenikania ciepła | $k = 1200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, |
| — pole powierzchni przenikania ciepła od wody chłodzonej do warstwy wody zraszającej na zewnętrznej powierzchni przepony | $F_o = 100 \text{ m}^2$, |
| — pole powierzchni wnikania ciepła od warstwy wody zraszającej na zewnętrznej powierzchni przepony do powietrza | $F_t = 100 \text{ m}^2$, |
| — pole powierzchni wnikania pary wodnej od warstwy wody zraszającej na zewnętrznej powierzchni przepony do powietrza | $F_x = 100 \text{ m}^2$. |

Zarówno niewymienione wyżej dane wejściowe, jak i wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Przykłady – wyniki obliczeń

Nr wa- riantu	Tempera- tura wody na wlocie	Strumień ma- sowy wody zraszającej na wlocie	Tempe- ratura powie- trza na wlocie	Wilgotność względna powietrza na wlocie	Wilgotność właściwa g/kg na wlocie	Temperatu- ra wody chłodzonej na wlocie	Strumień ma- sowy wody zraszającej na wlocie	Tempera- tura wody zraszającej na wlocie	Tempera- tura po- wietrza na wlocie	Wilgotność względna powietrza na wlocie	Wilgotność właściwa powietrza na wlocie	Moc chłodzi- cza
	t_{w1} °C	Q_{z1} kg/s	t_{p1} °C	ϕ_1 %	x_1 g/kg	t_{w2} °C	Q_{z2} kg/s	t_{z2} °C	t_{p2} °C	ϕ_2 %	x_2 g/kg	N kW
1			25	70	13,42	28,91	0,962	31,47	31,60	81,18	24,26	446
2			25	80	15,29	29,25	0,976	32,18	32,23	80,81	25,05	424
3			27	90	17,15	29,59	0,990	32,88	32,84	80,47	25,85	403
4			27	70	15,07	29,53	0,968	32,75	31,19	87,14	25,49	407
5	36	1,1	27	80	17,16	29,91	0,983	33,52	31,87	86,71	26,40	383
6			27	90	19,24	30,27	0,997	34,28	32,54	86,32	27,33	360
7			29	70	16,88	30,16	0,973	34,05	30,81	93,57	26,84	367
8			29	80	19,22	30,58	0,990	34,89	31,55	93,08	27,90	341
9			29	90	21,53	30,98	1,006	35,71	32,27	92,63	28,96	316
10			25	70	13,42	29,75	1,145	33,10	33,04	78,82	25,59	519
11			25	80	15,29	30,08	1,159	33,78	33,64	78,56	26,41	498
12			27	90	17,15	30,40	1,172	34,44	34,22	78,31	27,23	478
13			27	70	15,07	30,34	1,150	34,32	32,58	84,73	26,87	481
14	38	1,3	27	80	17,16	30,70	1,165	35,06	33,23	84,43	27,81	459
15			29	90	19,24	31,06	1,179	35,79	33,87	84,14	28,76	436
16			29	70	16,88	30,95	1,155	35,57	32,15	91,13	28,27	443
17			29	80	19,22	31,35	1,171	36,38	32,86	90,78	29,36	418
18			25	90	21,53	31,73	1,187	37,16	33,55	90,45	30,45	394
19			25	70	13,42	30,55	1,328	34,65	34,40	76,82	26,98	594
20			25	80	15,29	30,87	1,341	35,30	34,97	76,65	27,81	574
21			27	90	17,15	31,18	1,354	35,93	35,53	76,49	28,66	555
22			27	70	15,07	31,12	1,332	35,82	33,90	82,70	28,30	558
23	40	1,5	27	80	17,16	31,47	1,346	36,53	34,52	82,49	29,27	536
24			29	90	19,24	31,80	1,360	37,22	35,13	82,29	30,24	515
25			29	70	16,88	31,71	1,337	37,02	33,43	89,06	29,75	521
26			29	80	19,22	32,08	1,352	37,79	34,11	88,81	30,86	498
27			25	90	21,53	32,45	1,367	38,54	34,77	88,58	31,98	475

5. Podsumowanie

Obliczenia przeprowadzone przy wykorzystaniu wyprowadzonych równań modelu chłodnicy wyparnej umożliwiają wstępną orientację w zachowaniu się tego urządzenia podczas zmian parametrów przepływających mediów. Zakres badań można oczywiście rozszerzyć, co jednak lawinowo zwiększyłoby obszerność otrzymanego materiału wynikowego. W ramach przykładowych obliczeń nie badano zatem wpływu na działanie chłodnicy takich wielkości, jak natężenie przepływu powietrza i wody chłodzonej, temperatura wlotowa wody zraszającej, czy pole powierzchni wymiany ciepła i masy. Oddzielną grupę wielkości występujących w równaniach, a niezmiennych w przeprowadzonych obliczeniach, stanowią współczynniki wymiany ciepła i masy, tj. α , k i β . Wyznaczenie wartości tych współczynników w oparciu jedynie o rozważania teoretyczne napotyka na tak duże trudności, że zajmujący się tymi zagadnieniami badacze, m.in. [1, 2] zalecają metody eksperymentalne. Utworzony model matematyczny chłodnicy wyparnej może tu być bardzo pomocny w tym sensie, że wymienione współczynniki wymiany można wyliczyć z równań modelu, po wstawieniu do nich rezultatów przeprowadzonych wcześniej pomiarów parametrów wlotowych i wylotowych powietrza, wody chłodzonej i wody zraszającej.

Z uwagi na to, że chłodnica wyparna omawiana jest tu jako chłodnica wody przejmującej ciepło od kondensującego się w skraplaczu czynnika chłodniczego, najważniejszą jej cechą jest zdolność do takiego schłodzenia tej wody, by parownik sprężarkowej chłodziarki powietrza osiągał wymaganą moc chłodniczą. Ważne jest zatem osiągnięcie odpowiednio niskiej temperatury wody kierowanej do skraplacza (t_{w2}), a co za tym idzie, odpowiednio dużej mocy chłodniczej chłodnicy wyparnej.

Z obserwacji otrzymanych wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

1. W chłodnicy wyparnej temperatura powietrza wzrasta na skutek przejmowania ciepła od chłodzonej wody.
2. Wilgotność właściwa powietrza w chłodnicy wzrasta, natomiast wilgotność względna wzrasta lub maleje, co zależy głównie od wilgotności powietrza na wlocie i od przyrostu jego temperatury w chłodnicy.
3. Moc chłodnicy wyparnej wyraźnie zależy od wartości parametrów termodynamicznych powietrza, tj. jego temperatury i wilgotności. W zbadanych przypadkach wzrost temperatury powietrza na wlocie chłodnicy od 25°C do 29°C, przy niezmiennej jego wilgotności względnej, zmniejsza moc chłodnicy o kilkanaście % (od 12,3% dla wariantów 19 i 25 do 21,6% dla wariantów 3 i 9). Wzrost wilgotności względnej powietrza wlotowego, bez zmiany jego temperatury, zmniejsza natomiast moc chłodnicy w zakresie od 6,6% dla wariantów 19 i 21 do 13,9% dla wariantów 7 i 9.
4. Moc chłodnicy silnie zależy też od temperatury wody chłodzonej na jej wlocie i rośnie wraz z tą temperaturą; zwiększenie tej temperatury z 36°C do 40°C podnosi moc chłodnicy o kilkadziesiąt procent (od 33,2% dla wariantów 1 i 19 do 50,3% dla wariantów 9 i 27).

Podsumowując, można w oparciu o zbadane warianty obliczeń stwierdzić, że moc chłodnicy wyparnej wzrasta przy:

- spadku temperatury powietrza na wlocie chłodnicy,
- spadku wilgotności względnej powietrza na wlocie chłodnicy,
- wzroście temperatury wody chłodzonej na wlocie chłodnicy.

LLITERATURA

- [1] *Hobler T.*: Ruch ciepła i wymienniki. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1971
- [2] *Kołodziejczyk L., Rubik M.*: Technika chłodnicza w klimatyzacji. Arkady, Warszawa 1976
- [3] *Roszczyński W., Trutwin W., Waclawik J.*: Kopalniane pomiary wentylacyjne. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1992