

*Krzysztof Filek\*, Władysław Mikołajczyk\**

## WYMIANA CIEPŁA MIĘDZY POWIETRZEM A ZIMNĄ WODĄ W RUROCIĄGU ZABUDOWANYM W ŚLEPYM WYROBISKU\*\*

---

### 1. Wprowadzenie

W przodkach ślepych wyrobisk zlokalizowanych na dużych głębokościach bardzo często, prócz innych (np. metanowego), występuje zagrożenie cieplne. Neutralizowanie tego zagrożenia przeprowadza się zwykle metodami wentylacyjnymi, polegającymi na zwiększeniu ilości doprowadzanego do przodka świeżego powietrza. Przy braku zadowalających efektów takiego postępowania pojawia się konieczność stosowania metod klimatyzacyjnych, wykorzystujących najczęściej chłodnice przeponowe, w których powietrze ziębione jest drogą przekazywania ciepła oddzielonemu od niego przeponą ośrodkowi o niższej temperaturze.

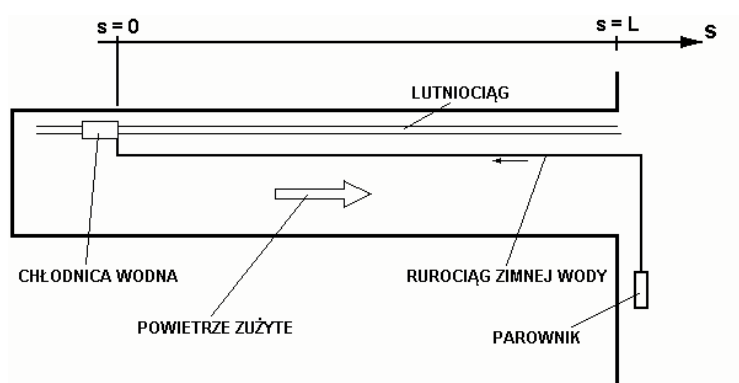
Używane w górnictwie urządzenia tego typu podzielić można na chłodnice o działaniu bezpośrednim i o działaniu pośrednim. Wykorzystywanymi w górnictwie chłodnicami o działaniu bezpośrednim są parowniki chłodziarek sprężarkowych, w których zimnym ośrodkiem odbierającym ciepło od powietrza jest parujący czynnik chłodniczy, natomiast chłodnicami o działaniu pośrednim są przeponowe wymienniki wykorzystujące schłodzoną w parowniku wodę. Wskutek występowania w kopalni różnych źródeł ciepła (górotwór, maszyny i urządzenia itp.) ochłodzone powietrze ponownie się ogrzewa, przy czym efekt ten jest tym większy, im niższa jest temperatura powietrza i im dłuższy jest pokonywany przez nie odcinek ze źródłami ciepła. Dlatego ważne jest, by powietrze od miejsca schłodzenia do miejsca przeznaczenia (przodek) miało do pokonania jak najkrótszą drogę, to jest, by chłodnica (parownik lub chłodnica wodna) usytuowana była jak najbliżej przodka.

---

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

\*\* Publikacja wykonana w ramach prac statutowych nr 11.11.100.850

Dalej rozważono przypadek lokalizacji w prądzie powietrza świeżego w lutniociągu tłoczącej wentylacji odrębnej chłodnicy wodnej zasilanej zimną wodą z parownika chłodziarki ustawionej poza ślepym wyrobiskiem (rys. 1). Konieczność usytuowania chłodnicy w pobliżu przodka powoduje, że przez całą niemal długość rozpatrywanego ślepego wyrobiska należy przeprowadzić rurociąg dostarczający do chłodnicy zimną wodę. W niniejszej pracy rozważono wiążące się z wymianą ciepła między powietrzem a wodą zagadnienie niepożądanego przyrostu temperatury wody chłodzącej w rurociągu na odcinku od wlotu wyrobiska do chłodnicy. Zmiany te wywołane są konwekcyjnym przejmowaniem ciepła na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni rurociągu wodnego oraz przewodzeniem ciepła przez ściankę rurociągu.



Rys. 1. Schemat ślepego wyrobiska z wodną chłodnicą powietrza i rurociągiem zimnej wody

## 2. Wymiana ciepła między powietrzem w wyrobisku a zimną wodą płynącą do chłodnicy wodnej

Przewietrzanie rozważanego wyrobiska realizowane jest za pomocą tłoczącej wentylacji lutniowej, w związku z czym powietrze płynie wyrobiskiem od przodka w kierunku prądu obiegowego. Przyjęty dla potrzeb modelu matematycznego układ współrzędnych pokazano na rysunku 1: oś współrzędnej  $s$  jest równoległa do osi ślepego wyrobiska i rurociągu wodnego, jej zwrot wyznacza kierunek przepływu powietrza, a początek ( $s = 0$ ) leży w miejscu lokalizacji chłodnicy powietrza.

Podane równania stanowią matematyczny model wymiany ciepła między wodą w rurociągu a powietrzem w wyrobisku. Przyjęto, że wyrobisko stanowi prostoosiowy chodnik o polu czynnej powierzchni poprzecznego przekroju równej  $F_p$ , a długość rozważanej jego części wynosi  $L$ . Ponadto założono stałość wydatku powietrza w wyrobisku i pominięto istnienie w nim dodatkowych źródeł ciepła.

Dla wyprowadzenia równań wyodrębniono w ślepym wyrobisku objętościowe elementarne obszary ograniczone prostopadłymi do osi  $s$  płaszczyznami odległymi od siebie o  $ds$  oraz powierzchniami bocznymi (ścianami wyrobiska i rurociągu) i dla obszarów tych utworzono równania bilansu entalpii powietrza i wody.

W przestrzeni powietrza wybrany obszar ma objętość  $dV_p$ , a w przestrzeni wody  $dV_w$ , przy czym:

$$dV_p = F_p ds \quad (1)$$

$$dV_w = F_w ds = 0,25\pi d_w^2 ds \quad (2)$$

gdzie przez  $F_w$  oznaczono pole powierzchni poprzecznego przekroju rurociągu wodnego, a przez  $d_w$  jego wewnętrzną średnicę.

Zakładając, że na zewnętrznej powierzchni rurociągu wodnego nie zachodzi kondensacja pary wodnej (rurociąg izolowany, niezbyt wysoka wilgotność powietrza), **bilans entalpii powietrza** w stanie ustalonym można zapisać w postaci

$$dh_1 - dh_2 - dh_3 = 0 \quad (3)$$

W powyższym równaniu uwzględniono:

- entalpię  $dh_1$  dopływającą w czasie  $\Delta\tau$  wraz z powietrzem do objętości  $dV_p$ ,
- entalpię  $dh_2$  wypływającą w czasie  $\Delta\tau$  wraz z powietrzem z objętości  $dV_p$ ,
- entalpię  $dh_3$  przejmowaną z powietrza w czasie  $\Delta\tau$  przez odcinek rurociągu o długości  $ds$ .

Występujące w (3) elementarne entalpie wyrażają wzory [3]:

$$dh_1 = Q_m ((c_p + c_w x_p) t_p + r_p x_p) \Delta\tau \quad (4)$$

$$dh_2 = Q_m \left[ (c_p + c_w x_p) \left( t_p + \frac{dt_p}{ds} ds \right) + r_p x_p \right] \Delta\tau \quad (5)$$

$$dh_3 = \alpha_z \pi d_0 (t_p - t_0) \Delta\tau ds \quad (6)$$

gdzie:

- $c_p$  — ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],
- $c_w$  — ciepło właściwe pary wodnej przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)],
- $d_0$  — zewnętrzna średnica izolacji rurociągu wodnego [m],
- $Q_m$  — masowy strumień powietrza w wyrobisku (odniesiony do powietrza suchego) [kg/s],
- $r_p$  — ciepło parowania wody [J/kg],
- $t_0$  — temperatura zewnętrznej powierzchni izolacji rurociągu wodnego [°C],
- $t_p$  — temperatura powietrza w wyrobisku [°C],
- $x_p$  — wilgotność właściwa powietrza w wyrobisku [kg pary wodnej/kg suchego powietrza],
- $\alpha_z$  — współczynnik przejmowania ciepła z powietrza przez zewnętrzną powierzchnię izolacji rurociągu wodnego [W/(m<sup>2</sup>·K)].

Po podstawieniu zależności (4)–(6) do równania bilansu (3) otrzymuje się

$$Q_m (c_p + c_w x_p) \frac{dt_p}{ds} + \alpha_z \pi d_0 (t_p - t_0) = 0 \quad (7)$$

**Bilans entalpii wody** w rurociągu można dla stanu ustalonego zapisać w postaci

$$dh_4 - dh_5 + dh_6 = 0 \quad (8)$$

Równanie powyższe uwzględnia:

- entalpię  $dh_4$  dopływającą w czasie  $\Delta\tau$  do elementarnej objętości  $dV_w$  (w przekroju o współrzędnej  $s+ds$ ) wraz z wodą,
- entalpię  $dh_5$  wypływającą w czasie  $\Delta\tau$  z objętości  $dV_w$  (w przekroju o współrzędnej  $s$ ) wraz z wodą,
- entalpię  $dh_6$  przejmowaną przez wodę ze ścianki rurociągu na odcinku  $ds$  w czasie  $\Delta\tau$ .

Poszczególne składniki bilansu entalpii wody wyrażają zależności:

$$dh_4 = Q_w c_c \left( t_w + \frac{dt_w}{ds} ds \right) \Delta\tau \quad (9)$$

$$dh_5 = Q_w c_c t_w \Delta\tau \quad (10)$$

$$dh_6 = \pi d_w \alpha_w (t_d - t_w) ds \Delta\tau \quad (11)$$

gdzie:

- $c_c$  — ciepło właściwe wody [J/(kg·K)],
- $Q_w$  — masowy strumień wody w rurociągu [kg/s],
- $t_d$  — temperatura wewnętrznej powierzchni ścianki rurociągu wodnego [°C],
- $t_w$  — temperatura wody w rurociągu [°C],
- $\alpha_w$  — współczynnik przejmowania ciepła przez wodę z wewnętrznej ścianki rurociągu wodnego [W/(m<sup>2</sup>·K)].

Po podstawieniu (9)–(11) do (8) otrzymuje się

$$\frac{dt_w}{ds} = - \frac{\pi \alpha_w d_w}{Q_w c_c} (t_d - t_w) \quad (12)$$

Równania (7) i (12) stanowią układ równań różniczkowych, który może być zapisany następująco

$$\begin{cases} \frac{dt_p}{ds} + \alpha t_p = \beta t_w + \gamma \\ \frac{dt_w}{ds} + \delta t_w = \varepsilon \end{cases} \quad (13)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{\pi \alpha_z d_0}{Q_m (c_p + c_w x_p)} \quad (14)$$

$$\beta = -\frac{\pi \alpha_w d_w}{Q_m (c_p + c_w x_p)} \quad (15)$$

$$\gamma = \frac{\pi (\alpha_z d_0 t_0 - \alpha_w d_w t_d)}{Q_m (c_p + c_w x_p)} \quad (16)$$

$$\delta = -\frac{\pi \alpha_w d_w}{Q_w c_c} \quad (17)$$

$$\varepsilon = -\frac{\pi \alpha_w d_w t_d}{Q_w c_c} \quad (18)$$

Temperatura zewnętrznej powierzchni izolacji rurociągu wodnego  $t_0$  i temperatura wewnętrznej powierzchni jego ścianki  $t_d$  są funkcjami poszukiwanych temperatur powietrza  $t_p$  i wody  $t_w$ . Przyjmuje się, że pozostałe wielkości występujące we wzorach (14)–(18), w tym także współczynniki przejmowania ciepła  $\alpha_w$  i  $\alpha_z$ , są stałe.

Warunki brzegowe do równań układu (13) mają postać:

$$t_p(s=0) = t_{p0} \quad (19)$$

$$t_w(s=L) = t_{w0} \quad (20)$$

Symbolem  $t_{p0}$  oznaczono temperaturę powietrza w przekroju wyrobiska, w którym usytuowana jest chłodnica, a symbolem  $t_{w0}$  temperaturę zimnej wody w przekroju rurociągu odpowiadającym wlotowi wyrobiska.

Z teorii przenikania ciepła przez jednowarstwową ściankę rurociągu wodnego o średnicy wewnętrznej  $d_w$  i zewnętrznej  $d_z$  znany jest wzór [2, 5]

$$t_p - t_w = \frac{q_0}{\pi} \left( \frac{1}{\alpha_w d_w} + \frac{1}{2\lambda_r} \ln \frac{d_z}{d_w} + \frac{1}{\alpha_z d_z} \right) \quad (21)$$

gdzie:

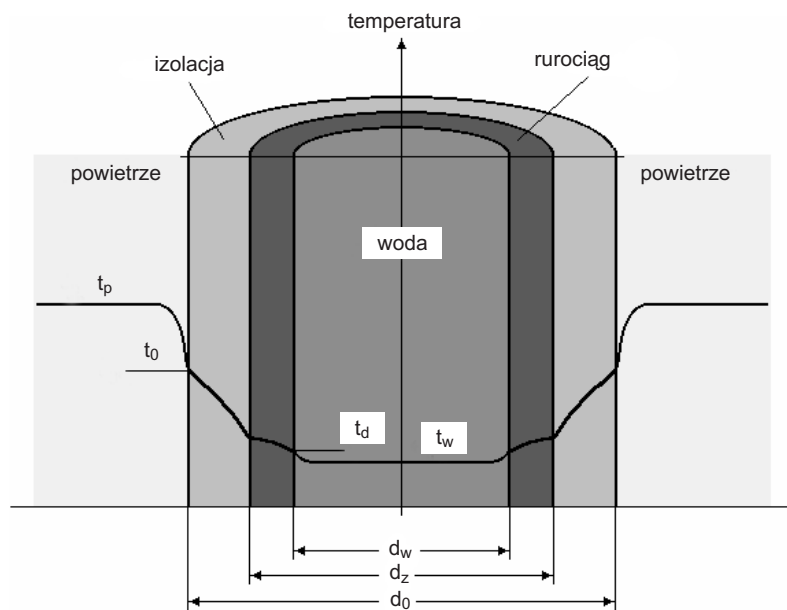
- $q_0$  — przypadający na jednostkę czasu i jednostkę długości rury strumień ciepła [W/m],
- $\lambda_r$  — współczynnik przewodnictwa cieplnego ścianki rurociągu [W/(m·K)],
- $\alpha_w, \alpha_z$  — współczynniki przejmowania ciepła odpowiednio na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni ścianki rurociągu [W/(m<sup>2</sup>·K)].

Dla rurociągu izolowanego wyróżnić można dwie warstwy ścianki – obowiązuje wtedy wzór

$$t_p - t_w = \frac{q_0}{\pi} \left( \frac{1}{\alpha_w d_w} + \frac{1}{2\lambda_r} \ln \frac{d_z}{d_w} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_0}{d_z} + \frac{1}{\alpha_z d_0} \right) \quad (22)$$

gdzie  $\lambda_{iz}$  – współczynnik przewodnictwa cieplnego warstwy izolującej [W/(m·K)].

Jakościowy rozkład temperatury w wodzie, w poprzecznym przekroju izolowanego rurociągu i w powietrzu pokazano na rysunku 2.



**Rys. 2.** Rozkład temperatury w poprzecznym przekroju rurociągu zimnej wody i w otaczającym powietrzu (objaśnienia w tekście)

Między temperaturą powietrza  $t_p$  a temperaturą zewnętrznej powierzchni izolacji  $t_0$  zachodzi związek

$$t_p - t_0 = \frac{q_0}{\pi \alpha_z d_0} \quad (23)$$

a między temperaturą wody  $t_w$  a temperaturą wewnętrznej powierzchni ścianki rurociągu  $t_d$  związek

$$t_d - t_w = \frac{q_0}{\pi \alpha_w d_w} \quad (24)$$

Wyznaczając  $q_0$  z (22)

$$q_0 = \frac{\pi(t_p - t_w)}{\frac{1}{\alpha_w d_w} + \frac{1}{2\lambda_r} \ln \frac{d_z}{d_w} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_0}{d_z} + \frac{1}{\alpha_z d_0}} \quad (25)$$

i podstawiając do (23) i (24), otrzymuje się wyrażenia na  $t_0$  i  $t_d$ :

$$t_0 = t_p - (t_p - t_w) \frac{k}{\alpha_z d_0} \quad (26)$$

$$t_d = t_w + (t_p - t_w) \frac{k}{\alpha_w d_w} \quad (27)$$

gdzie

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w d_w} + \frac{1}{2\lambda_r} \ln \frac{d_z}{d_w} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_0}{d_z} + \frac{1}{\alpha_z d_0}} \quad (28)$$

Wstawienie (26) i (27) do (13) daje

$$\begin{cases} \frac{dt_p}{ds} = -C_1(t_p - t_w) \\ \frac{dt_w}{ds} = -C_2(t_p - t_w) \end{cases} \quad (29)$$

gdzie:

$$C_1 = \frac{\pi k}{Q_m(c_p + c_w x_p)} \quad (30)$$

$$C_2 = \frac{\pi k}{Q_w c_c} \quad (31)$$

Przy wspomnianych wcześniej założeniach oraz przy stałych wydatkach  $Q_m$  i  $Q_w$  współczynniki równań układu (29) są stałe.

Rozwiązaniem układu (29) przy warunkach (19) i (20) są funkcje:

$$t_p(s) = \frac{C_2 t_{p0} \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1 t_{w0}}{C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1} - \frac{C_1(t_{p0} - t_{w0})}{C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1} \exp[(C_2 - C_1)s] \quad (32)$$

$$t_w(s) = \frac{C_2 t_{p0} \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1 t_{w0}}{C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1} - \frac{C_2(t_{p0} - t_{w0})}{C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1} \exp[(C_2 - C_1)s] \quad (33)$$

Z (33) wynika, że temperatura wody na wlocie chłodnicy ( $s = 0$ ) wynosi

$$t_w(s=0) = \frac{C_2 t_{p0} \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1 t_{w0} - C_2(t_{p0} - t_{w0})}{C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1} \quad (34)$$

a zatem przyrost temperatury wody na odcinku rurociągu o długości  $L$  wynosi

$$\Delta t_w = t_w(s=0) - t_{w0} = \frac{C_2(t_{p0} - t_{w0})[\exp[(C_2 - C_1)L] - 1]}{C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1} \quad (35)$$

Ze wzorów (26) i (27) wyznaczyć można zmienne wzdłuż ślepego wyrobiska temperatury zewnętrznej powierzchni warstwy izolującej  $t_0(s)$  i wewnętrznej powierzchni rurociągu  $t_d(s)$ , a z przekształconego wzoru (22) – rozkład przypadającego na jednostkę czasu i jednostkę długości rury strumienia ciepła wymienianego między powietrzem, a wodą  $q_0(s)$ :

$$t_0 = \frac{C_2 t_{p0} \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1 t_{w0}}{C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1} - \frac{C_1(t_{p0} - t_{w0})}{C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1} \exp[(C_2 - C_1)s] - \left( \frac{(C_2 - C_1)(t_{p0} - t_{w0})}{C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1} \exp[(C_2 - C_1)s] \right) \frac{k}{\alpha_z d_0} \quad (36)$$

$$t_d = \frac{C_2 t_{p0} \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1 t_{w0}}{C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1} - \frac{C_1(t_{p0} - t_{w0})}{C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1} \exp[(C_2 - C_1)s] + \left( \frac{(C_2 - C_1)(t_{p0} - t_{w0})}{C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1} \exp[(C_2 - C_1)s] \right) \frac{k}{\alpha_w d_w} \quad (37)$$

$$q_0(s) = \frac{\pi(C_2 - C_1)(t_{p0} - t_{w0})}{\left( \frac{1}{\alpha_w d_w} + \frac{1}{2\lambda_r} \ln \frac{d_z}{d_w} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_0}{d_z} + \frac{1}{\alpha_z d_0} \right) (C_2 \exp[(C_2 - C_1)L] - C_1)} \exp[(C_2 - C_1)s] \quad (38)$$

### Przykład

Obliczyć przyrost temperatury wody transportowanej stalowym izolowanym rurociągiem do zlokalizowanej w ślepym wyrobisku chłodnicy wodnej oraz znaleźć rozkłady wzdłuż wyrobiska: temperatury powietrza, temperatury zewnętrznej ścianki izolacji, temperatury wewnętrznej ścianki rurociągu i temperatury wody oraz jednostkowego strumienia ciepłego wymienianego między powietrzem a wodą.



Dane liczbowe są następujące:

- długość rurociągu wodnego w ślepym wyrobisku

$$L = 400 \text{ m};$$

- wewnętrzna średnica rurociągu wodnego

$$d_w = 40 \text{ mm};$$

- zewnętrzna średnica rurociągu wodnego (bez izolacji)

$$d_z = 50 \text{ mm};$$

- zewnętrzna średnica rurociągu wraz z izolacją

$$d_0 = 70 \text{ mm};$$

- strumień masy powietrza (odniesiony do powietrza suchego) w wyrobisku obok rurociągu wodnego

$$Q_m = 10 \text{ kg/s};$$

- ciśnienie powietrza w wyrobisku

$$b = 110 \text{ kPa};$$

- temperatura zużytego powietrza w wyrobisku w przekroju chłodnicy

$$t_{p0} = 30^\circ\text{C};$$

- wilgotność względna powietrza w wyrobisku w przekroju chłodnicy

$$\varphi_{p0} = 60\%;$$

- wilgotność właściwa powietrza w wyrobisku (obliczona na podstawie powyższych danych) [4]

$$x_p = 14,73 \text{ g/kg};$$

- strumień masy wody w rurociągu

$$Q_w = 1,5 \text{ kg/s};$$

- temperatura wody w rurociągu w przekroju wlotowym wyrobiska ślepego

$$t_{w0} = 12^\circ\text{C};$$

- współczynnik przejmowania ciepła przez wodę ze ścianki rurociągu

$$\alpha_w = 4,14 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K});$$

wartość taka wynika ze wzoru [1, 6]

$$\alpha_w = B \frac{v_w^{0,8}}{d_w^{0,2}},$$

gdzie dla wody można przyjąć

$$B = 1500 \text{ W s}^{0,8}/(\text{m}^{2,6} \cdot \text{K}),$$

a średnią prędkość przepływu wody wyliczyć można z zależności

$$v_w = \frac{4Q_w}{\pi \rho_w d_w^2} \quad (\rho_w - \text{gęstość wody});$$

— współczynnik przejmowania ciepła od powietrza

$$\alpha_z = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K});$$

— współczynnik przewodnictwa cieplnego ścianki rurociągu (stali)

$$\lambda_r = 20 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K});$$

— współczynnik przewodnictwa cieplnego warstwy izolacji

$$\lambda_{iz} = 0,1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}).$$

#### ROZWIĄZANIE

Wyliczony ze wzoru (28) współczynnik przenikania ciepła wynosi

$$k = \frac{1}{6,04 \cdot 10^{-3} + 5,58 \cdot 10^{-3} + 1,6824 + 1,4286} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) = 0,32 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}).$$

Poszczególne składniki sumy w mianowniku powyższego ułamka są oporami cieplnymi kolejno: przejmowania ciepła przez wodę od wewnętrznej ścianki rurociągu, przewodzenia ciepła przez ściankę rurociągu, przewodzenia ciepła przez warstwę izolacji i przejmowania ciepła przez zewnętrzną ściankę warstwy izolacji od powietrza. Widać, że dwa pierwsze składniki są pomijalnie małe w porównaniu z dwoma pozostałymi.

Stałe  $C_1$  i  $C_2$  są równe:

$$C_1 = 9,736 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1},$$

$$C_2 = 16,008 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1},$$

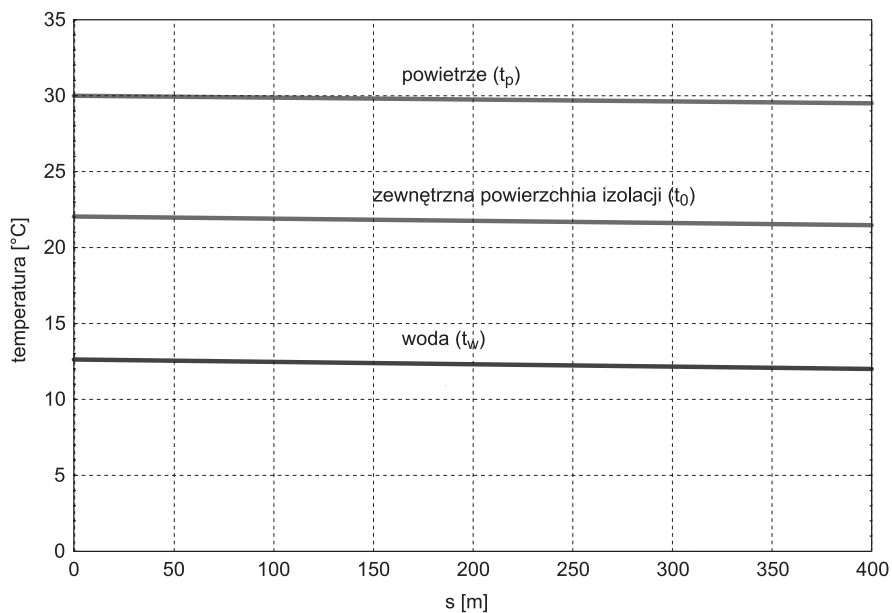
a ich różnica

$$C_2 - C_1 = 6,272 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}.$$

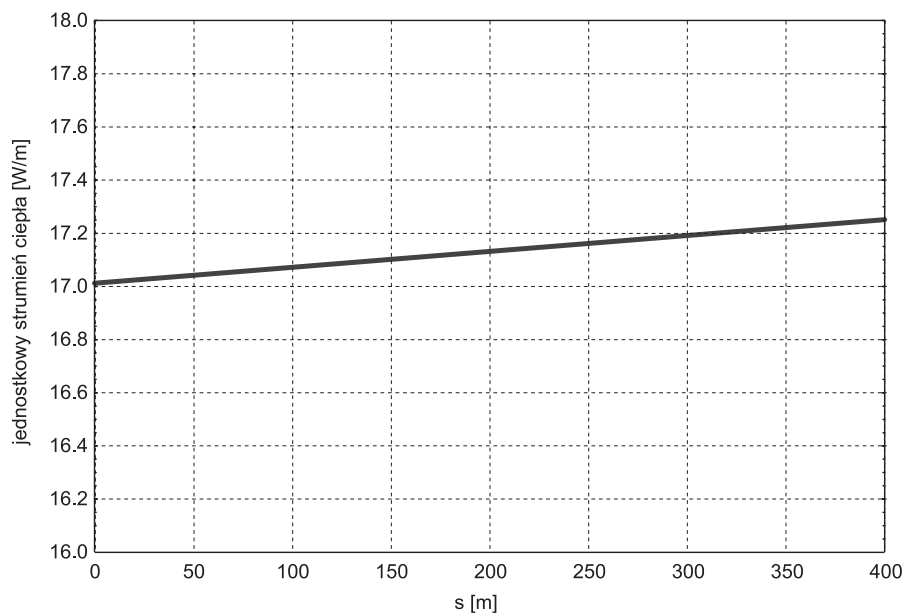
Wyznaczony z (35) przyrost temperatury wody na 400-metrowym odcinku rurociągu wynosi

$$\Delta t_w = 1,1^\circ \text{C}.$$

Odpowiadające warunkom powyższego przykładu rozkłady wzdłuż wyrobiska temperatur  $t_p(s)$ ,  $t_0(s)$  i  $t_w(s)$  oraz jednostkowego strumienia ciepła  $q_0(s)$  przedstawiono w formie wykresów (rys. 3 i 4) (różnice między krzywymi  $t_w(s)$  i  $t_d(s)$  są niewidoczne na wykresie, dlatego zrezygnowano z pokazania tej ostatniej).



Rys. 3. Rozkłady temperatur: powietrza, zewnętrznej powierzchni izolacji rurociągu i zimnej wody wzdłuż ślepego wyrobiska



Rys. 4. Rozkład jednostkowego strumienia ciepła wymianianego między powietrzem a wodą wzdłuż ślepego wyrobiska

#### LITERATURA

- [1] *Kołodziejczyk L., Rubik M.*: Technika chłodnicza w klimatyzacji. Warszawa, Arkady 1976
- [2] *Ochęduszo S.*: Termodynamika stosowana. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1970
- [3] *Pawiński J., Roszkowski J., Strzeński J.*: Przewietrzanie kopalń. Katowice, Śląskie Wydawnictwo Techniczne 1995
- [4] *Roszczyński W., Trutwin W., Waclawik J.*: Kopalniane pomiary wentylacyjne. Katowice, Wydawnictwo „Śląsk” 1992
- [5] *Staniszewski B.*: Termodynamika. Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1982
- [6] *Waclawik J., Cygankiewicz J., Knechtel J.*: Warunki klimatyczne w kopalniach głębokich. Poradnik. Kraków, Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej 1995