

Krzysztof Filek, Władysław Mikołajczyk**

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

1. Wprowadzenie

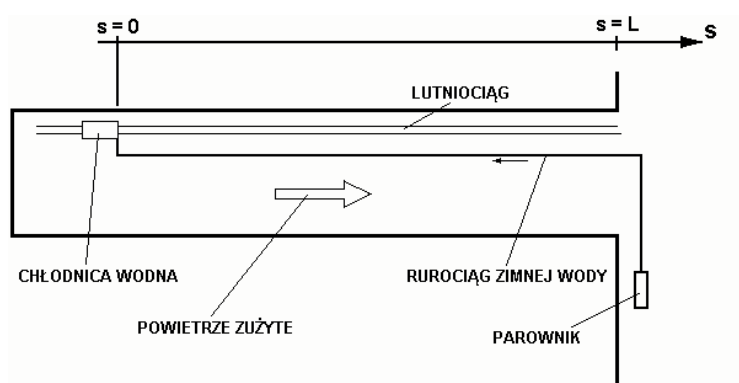
W przodkach ślepych wyrobisk zlokalizowanych na dużych głębokościach bardzo często, prócz innych (np. metanowego), występuje zagrożenie cieplne. Neutralizowanie tego zagrożenia przeprowadza się zwykle metodami wentylacyjnymi, polegającymi na zwiększeniu ilości doprowadzanego do przodka świeżego powietrza. 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],
- α_z — współczynnik przejmowania ciepła z powietrza przez zewnętrzną powierzchnię izolacji rurociągu wodnego [W/(m²·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],
- α_w — współczynnik przejmowania ciepła przez wodę z wewnętrznej ścianki rurociągu wodnego [W/(m²·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 α_w i α_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:

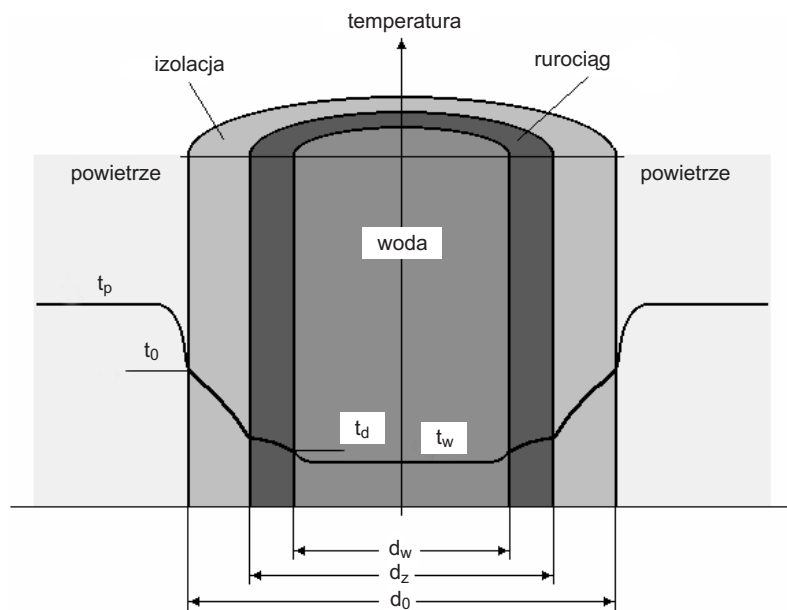
- q_0 — przypadający na jednostkę czasu i jednostkę długości rury strumień ciepła [W/m],
- λ_r — współczynnik przewodnictwa cieplnego ścianki rurociągu [W/(m·K)],
- α_w, α_z — współczynniki przejmowania ciepła odpowiednio na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni ścianki rurociągu [W/(m²·K)].

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 λ_{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

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

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

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

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:

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

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

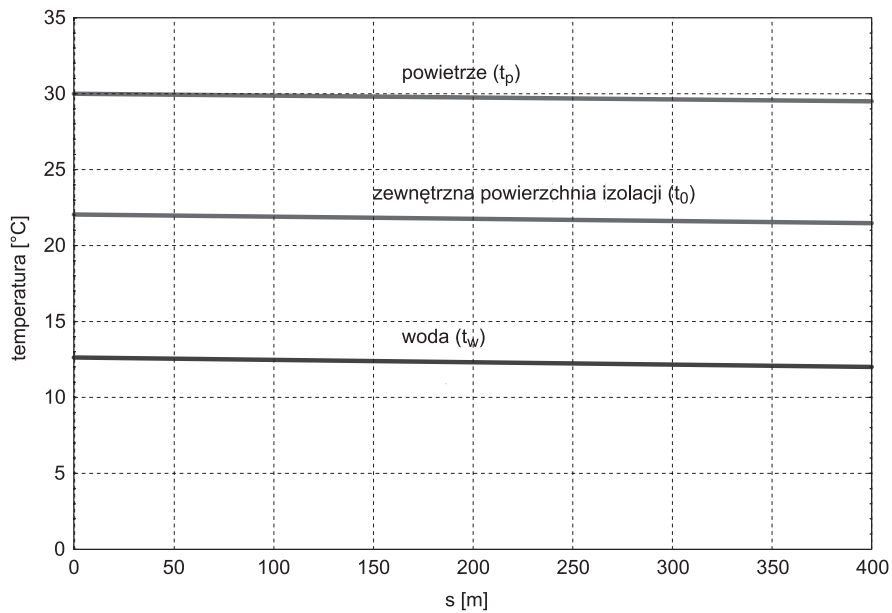
a ich różnica

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

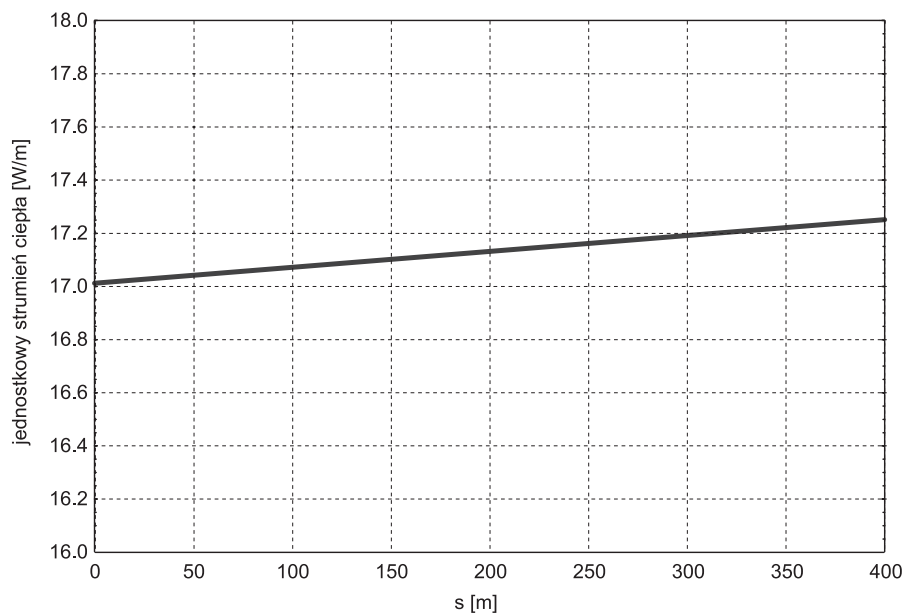
Wyznaczony z (35) przyrost temperatury wody na 400-metrowym odcinku rurociągu wynosi

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

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