

Jan TALER¹
Magdalena JAREMKIEWICZ²

IDENTYFIKACJA WSPÓŁCZYNNIKA WNIKANIA CIEPŁA NA ZEWNĘTRZNEJ POWIERZCHNI TERMOMETRU DO WYZNACZANIA NIEUSTALONEJ TEMPERATURY PŁYNU

Opracowano metodę wyznaczania współczynnika wnikania ciepła na powierzchni zewnętrznej termometru służącego do pomiaru temperatury czynnika przepływającego pod wysokim ciśnieniem. Metoda opiera się na rozwiązaniu odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła. Współczynnik wnikania ciepła jest określany na podstawie pomiaru temperatury w środku metalowego cylindrycznego termometru oraz na podstawie pomiaru temperatury ścianki cylindrycznego rurociągu, który jest izolowany cieplnie. Dodatkowo jest wyznaczany współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni rurociągu. Korelacje na liczby Nusselta, z których są wyznaczane współczynniki wnikania ciepła na zewnętrznej powierzchni termometru i wewnętrznej powierzchni rurociągu, zawierają nieznanne współczynniki, które wyznacza się metodą najmniejszych kwadratów. Wyznaczone współczynniki wykazują dobrą zgodność ze współczynnikami przyjętymi podczas rozwiązywania zagadnienia bezpośredniego.

Słowa kluczowe: pomiar temperatury płynu, stan nieustalony, odwrotne zagadnienie przewodzenia ciepła, metoda krocząca, korelacja na liczbę Nusselta

1. Wstęp

Do dokładnego wyznaczenia nieustalonej temperatury czynnika niezbędna jest identyfikacja współczynnika wnikania ciepła na zewnętrznej powierzchni termometru o nowej konstrukcji. Zastosowanie metody zostanie zilustrowane na przykładzie wyznaczania temperatury pary nasyconej przepływającej w rurociągu o promieniu powierzchni zewnętrznej 0,1775 m i grubości ścianki 0,05 m. Do obliczeń zostaną przyjęte stałe właściwości fizyczne materiału ścianki rurociągu: iloczyn gęstości i ciepła właściwego $\rho c = 3,7665 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, współczynnik wyrównywania temperatury (dyfuzyjność cieplna) $a = 7,699 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Temperatura ścianki rurociągu będzie mierzona na powierzchni zewnętrznej. Wewnątrz

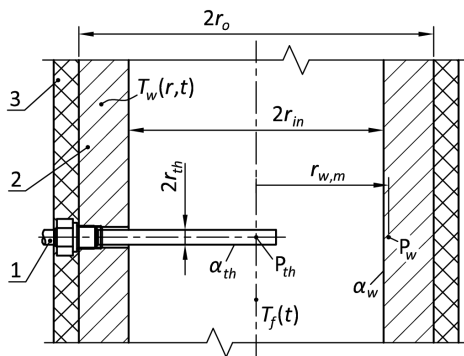
¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Jan Taler, Politechnika Krakowska, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, tel.: (12) 6283554, e-mail: taler@mech.pk.edu.pl.

² Magdalena Jaremkiewicz, Politechnika Krakowska, e-mail: mjaremkiewicz@pk.edu.pl.

rurociągu zostanie umieszczony cylinder stalowy o promieniu powierzchni zewnętrznej 0,0035 mm z otworem, w środku którego znajduje się cienki termoelement. Właściwości fizyczne elementu cylindrycznego są następujące: $\rho c = 3,6751 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, $a = 1,317 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Najpierw będą wygenerowane dane pomiarowe „dokładne”, przez rozwiązanie zagadnienia bezpośredniego, a następnie wyznaczone poszukiwane współczynniki w korelacjach na liczbę Nusselta.

2. Matematyczne sformułowanie problemu

Temperatura przepływającego czynnika będzie wyznaczana na podstawie pomiaru temperatury w osi cylindra (termometru) oraz pomiaru temperatury ścianki (rys. 1.).



Rys. 1. Pomiar temperatury czynnika w rurociągu; 1 – cylindryczny termometr, 2 – rurociąg, 3 – izolacja rurociągu, P_{th} – punkt pomiaru temperatury termometru usytuowany w jego osi, P_w – punkt pomiaru temperatury wewnątrz ścianki rurociągu

Fig. 1. Measurement of the temperature of the medium in the pipeline; 1 – cylindrical thermometer, 2 – pipeline, 3 – insulation of the pipeline, P_{th} – temperature measurement point located at the axis of the thermometer, P_w – temperature measurement point inside the pipeline wall

Pole temperatury w cylindrycznym termometrze jest opisane równaniem niustalonego przewodzenia ciepła:

$$c_{th}(T_{th})\rho_{th}(T_{th})\frac{\partial T_{th}}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\lambda_{th}(T_{th}) \frac{\partial T_{th}}{\partial r} \right], \quad 0 \leq r \leq r_{th} \quad (1)$$

oraz warunkami brzegowymi:

$$\left. \frac{\partial T_{th}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (2)$$

$$T_{th}|_{r=0} = f_{th}(t) \quad (3)$$

zadanymi w środku cylindra dla $r = 0$. Jest to odwrotne zagadnienie przewodzenia ciepła, gdyż dla $r = 0$ znana jest temperatura i gęstość strumienia ciepła, a temperatura zewnętrznej powierzchni termometru nie jest znana.

We wzorach (1)-(3) przyjęto następujące oznaczenia: c_{th} , ρ_{th} , λ_{th} – odpowiednio ciepło właściwe, gęstość i współczynnik przewodzenia ciepła materiału termometru, f_{th} – temperatura mierzona w środku termometru, r – promień, r_{th} – promień powierzchni zewnętrznej termometru, t – czas, T_{th} – temperatura termometru.

Nieustalony rozkład temperatury w ścianie rurociągu wyznacza się z równania przewodzenia ciepła:

$$c_w(T_w)\rho_w(T_w)\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_w(T_w)\frac{\partial T_w}{\partial r}\right], \quad r_{in} \leq r \leq r_o \quad (4)$$

oraz warunków brzegowych:

$$\left[\lambda_w(T_w)\frac{\partial T_w}{\partial r}\right]_{r=r_o} = 0 \quad (5)$$

$$T_w|_{r=r_{wm}} = f_w(t) \quad (6)$$

Gęstość strumienia ciepła na zewnętrznej powierzchni rurociągu jest równa zeru (5) z uwagi na przyjętą doskonałą izolację cieplną. Temperatura ścianki jest mierzona w punkcie $r = r_{w,m}$ leżącym wewnątrz ścianki. W pracy przyjęto, że punkt P_w leży na zewnętrznej powierzchni rurociągu i $r_{w,m} = r_o$. W warunku brzegowym (6) symbol $f_w(t)$ oznacza zmierzony przebieg temperatury. Symbole r_{in} i r_o oznaczają odpowiednio promienie powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej rurociągu. Przy założeniu, że współczynnik wnikania ciepła na zewnętrznej powierzchni termometru α_{th} jest znany, temperaturę płynu $T_{f,th}(t)$ można wyznaczyć z warunku brzegowego na zewnętrznej powierzchni termometru:

$$\lambda_{th}\frac{\partial T_{th}}{\partial r}\bigg|_{r=r_{th}} = \alpha_{th}\left(T_{f,th} - T_{th}\bigg|_{r=r_{th}}\right) \quad (7)$$

z którego po przekształceniu otrzymuje się:

$$T_{f,th} = T_{th}\bigg|_{r=r_{th}} + \frac{\lambda_{th}}{\alpha_{th}}\frac{\partial T_{th}}{\partial r}\bigg|_{r=r_{th}} \quad (8)$$

W podobny sposób można wyznaczyć temperaturę czynnika $T_{f,w}$ z warunku brzegowego na wewnętrznej powierzchni rurociągu, przy założeniu że współczynnik wnikania ciepła α_w jest znany. Z warunku brzegowego:

$$\lambda_w\frac{\partial T_w}{\partial r}\bigg|_{r=r_{in}} = \alpha_w\left(T_{f,w} - T_w\bigg|_{r=r_{in}}\right) \quad (9)$$

wyznacza się temperaturę czynnika $T_{f,w}$:

$$T_{f,w} = T_w \Big|_{r=r_{in}} + \frac{\lambda_w}{\alpha_w} \frac{\partial T_w}{\partial r} \Big|_{r=r_{in}} \quad (10)$$

Temperatury czynnika $T_{f,th}$ i $T_{f,w}$ określone odpowiednio ze wzorów (8) i (10) powinny być sobie równe. Z uwagi na przybliżony charakter rozkładu temperatury wewnątrz termometru oraz ścianki, które są wyznaczane z rozwiązania zagadnień odwrotnych, temperatury te mogą się różnić. Również współczynnik wnikania ciepła $\alpha_{th}(t)$ na zewnętrznej powierzchni termometru oraz współczynnik wnikania ciepła $\alpha_w(t)$ na wewnętrznej powierzchni rurociągu określa się z korelacji znanych w literaturze. Są to zwykle korelacje wyznaczone dla przepływu rozwiniętego hydrodynamicznie i termicznie w warunkach ustalonych. W rzeczywistych rurociągach występują kolana, zawory, przewężenia lub rozszerzenia przekroju, które zmieniają rozkład prędkości i temperatury w przepływającym czynniku i powodują, że wzory znane z literatury nie mogą być bezpośrednio stosowane do wyznaczania współczynników wnikania ciepła.

W celu wyznaczenia temperatury płynu jest przyjmowana postać korelacji na liczbę Nusselta dla termometru i dla rurociągu, przy czym niektóre współczynniki występujące w korelacji na współczynnik wnikania ciepła na powierzchni termometru x_1, \dots, x_{m_1} oraz wybrane współczynniki w korelacji na współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni rurociągu x_{m_1+1}, \dots, x_m występujące w tych wzorach są wyznaczone za pomocą metody najmniejszych kwadratów:

$$S(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \left[T_{f,th}(t_i) - T_{f,w}(t_i) \right]^2 \quad (11)$$

tak aby suma S osiągała minimum. Wektor poszukiwanych współczynników $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{m_1}, x_{m_1+1}, \dots, x_m)^T$ zawiera współczynniki występujące w korelacji na liczbę Nusselta zarówno dla termometru, jak i rurociągu. Liczba nieznanymi współczynników m musi być mniejsza niż liczba punktów czasowych n . Liczba punktów czasowych t_i , $i = 1, \dots, n$, w których są wyznaczane temperatury czynnika $T_{f,th}$ i $T_{f,w}$, powinna być dostatecznie duża, aby wyeliminować wpływ przypadkowych błędów pomiaru temperatury termometru ścianki i rurociągu. Zwykle w sumie S określonej wzorem (11) uwzględnia się kilkadziesiąt punktów czasowych.

Dla opływanego poprzecznie cylindra (termometru) przyjęto korelacje zaproponowane przez Churchilla i Bernsteina [2], ważne dla $Re_{th}Pr > 0,2$. W zależności od liczby Reynoldsa korelacje te mają następującą postać:

- $Re_{th} > 400\,000$

$$\text{Nu}_{th} = 0,3 + \frac{x_1 \text{Re}_{th}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}}{\left[1 + (0,4/\text{Pr})^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{\text{Re}_{th}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (12)$$

- $10\,000 < \text{Re}_{th} < 400\,000$

$$\text{Nu}_{th} = 0,3 + \frac{x_1 \text{Re}_{th}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}}{\left[1 + (0,4/\text{Pr})^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{\text{Re}_{th}}{282000}\right)^{1/2}\right] \quad (13)$$

- $\text{Re}_{th} < 10\,000$

$$\text{Nu}_{th} = 0,3 + \frac{x_1 \text{Re}_{th}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}}{\left[1 + (0,4/\text{Pr})^{2/3}\right]^{1/4}} \quad (14)$$

Właściwości fizyczne czynnika przyjmuje się dla średniej arytmetycznej temperatur czynnika i powierzchni cylindra. W oryginalnych wzorach Churchilla i Bernsteina współczynnik $x_1 = 0,62$. Przyjęto następującą postać korelacji na współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni rurociągu (wzór Dittusa-Boeltera) [2]:

$$\text{Nu}_p = x_2 \text{Re}_p^{4/5} \text{Pr}^n \quad (15)$$

gdzie: $0,7 \leq \text{Pr} \leq 160$, $\text{Re}_p > 10\,000$, stosunek średnicy wewnętrznej rurociągu do jego długości $2r_{in}/L > 10$, natomiast $n = 0,4$ dla nagrzewania, a $n = 3$ dla chłodzenia. Właściwości termofizyczne są wyznaczone dla średniej wartości temperatury płynu. W oryginalnej korelacji Dittusa-Boeltera x_2 przyjmuje wartość $0,023$.

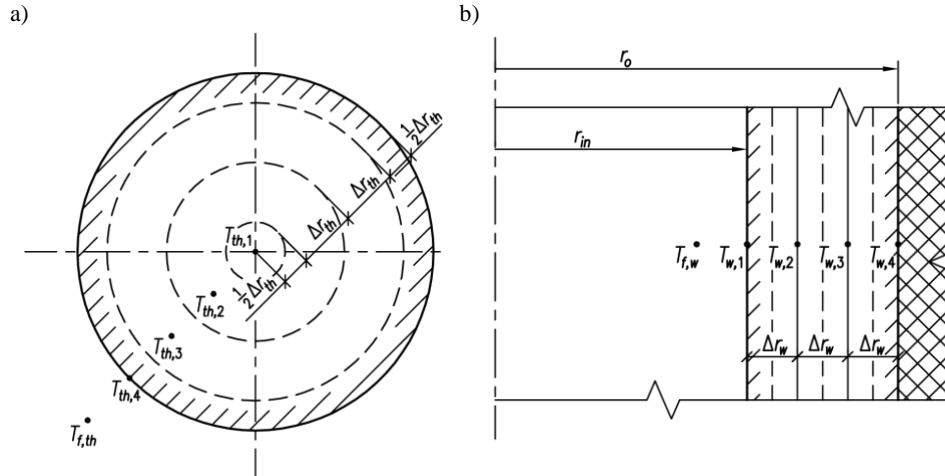
3. Wyznaczanie nieustalonego rozkładu temperatury w termometrze i ścianie rurociągu

Zagadnienie odwrotne (1)-(3) dla termometru oraz zagadnienie dla rurociągu (4)-(6) rozwiązano metodą krocząca [1]. Podział termometru i ścianki rurociągu na objętości skończone ilustrują odpowiednio rys. 2a i 2b. Kroczenie w przestrzeni rozpoczyna się od punktu pomiaru temperatury, to jest od środka cylindra w przypadku termometru i od zewnętrznej powierzchni w przypadku rurociągu. Kolejne temperatury w węzłach usytuowanych na promieniu termometru są obliczane z następujących wzorów:

$$T_{th,2} = T_{th,1} + \frac{1}{2} \frac{(\Delta r_{th})^2}{\lambda_{th,1} + \lambda_{th,2}} c_{th,1} \rho_{th,1} \frac{dT_{th,1}}{dt} \quad (16)$$

$$T_{th,3} = T_{th,2} - \frac{1}{3} \frac{\lambda_{th,1} + \lambda_{th,2}}{\lambda_{th,3} + \lambda_{th,2}} (T_{th,1} - T_{th,2}) + \frac{4}{3} (\Delta r_{th})^2 \frac{c_{th,2} \rho_{th,2}}{\lambda_{th,3} + \lambda_{th,2}} \frac{dT_{th,2}}{dt} \quad (17)$$

$$T_{th,4} = T_{th,3} - \frac{3}{5} \frac{\lambda_{th,2} + \lambda_{th,3}}{\lambda_{th,4} + \lambda_{th,3}} (T_{th,2} - T_{th,3}) + \frac{8}{5} (\Delta r_{th})^2 \frac{c_{th,3} \rho_{th,3}}{\lambda_{th,4} + \lambda_{th,3}} \frac{dT_{th,3}}{dt} \quad (18)$$



Rys. 2. Podział obszaru na objętości skończone: a) termometr cylindryczny, b) ścianka rurociągu
Fig. 2. Division of the domain into finite volumes: a) cylindrical thermometer, b) pipeline wall

Temperaturę czynnika wyznacza się z równania bilansu energii dla węzła nr 4:

$$\begin{aligned} \pi \left[r_{th}^2 - \left(r_{th} - \frac{\Delta r_{th}}{2} \right)^2 \right] c_{th,4} \rho_{th,4} \frac{dT_{th,4}}{dt} = \\ = 2\pi \left(r_{th} - \frac{\Delta r_{th}}{2} \right) \frac{\lambda_{th,3} + \lambda_{th,4}}{2} \frac{T_{th,3} - T_{th,4}}{\Delta r_{th}} + 2\pi r_{th} \alpha_{th} (T_{f,th} - T_{th,4}) \end{aligned} \quad (19)$$

z którego po przekształceniu otrzymuje się:

$$T_{f,th} = T_{th,4} - \frac{5}{12} \frac{\lambda_{th,3} + \lambda_{th,4}}{\alpha_{th} \cdot \Delta r_{th}} (T_{th,3} - T_{th,4}) + \frac{11}{24} \Delta r_{th} \frac{c_{th,4} \rho_{th,4}}{\alpha_{th}} \frac{dT_{th,4}}{dt} \quad (20)$$

gdzie: współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda_{th,i} = \lambda_{th}(T_{th,i})$, $c_{th,i} = c_{th}(T_{th,i})$, $\rho_{th,i} = \rho_{th}(T_{th,i})$, a krok przestrzenny w kierunku promieniowym $\Delta r_{th} = r_{th}/3$.

W podobny sposób wyznacza się temperaturę ścianki oraz temperaturę czynnika. Kroczenie w przestrzeni rozpoczyna się od węzła nr 4 w kierunku powierzchni wewnętrznej. Z równania bilansu energii dla węzła nr 4 wyznaczono temperaturę w węźle nr 3. Następnie są wyznaczane kolejno temperatury w węzłach nr 2 i nr 1. W wyniku takiego postępowania otrzymuje się następujące wyrażenia określające czasowe przebiegi temperatury we wszystkich węzłach:

$$T_{w,3} = T_{w,4} + \frac{r_o^2 - (r_o - \Delta r_w/2)^2}{r_o - \Delta r_w/2} \Delta r_w \frac{c_{w,4} \rho_{w,4}}{\lambda_{w,3} + \lambda_{w,4}} \frac{dT_{w,4}}{dt} \quad (21)$$

$$T_{w,2} = T_{w,3} + 4(\Delta r_w)^2 \frac{r_{in} + 2\Delta r_w}{2r_{in} + 3\Delta r_w} \frac{c_{w,3} \rho_{w,3}}{\lambda_{w,2} + \lambda_{w,3}} \frac{dT_{w,2}}{dt} - \frac{2r_{in} + 5\Delta r_w}{2r_{in} + 3\Delta r_w} \frac{\lambda_{w,3} + \lambda_{w,4}}{\lambda_{w,2} + \lambda_{w,4}} (T_{w,4} - T_{w,3}) \quad (22)$$

$$T_{w,1} = T_{w,2} + 4(\Delta r_w)^2 \frac{r_{in} + \Delta r_w}{2r_{in} + \Delta r_w} \frac{c_{w,2} \rho_{w,2}}{\lambda_{w,1} + \lambda_{w,2}} \frac{dT_{w,2}}{dt} - \frac{2r_{in} + 3\Delta r_w}{2r_{in} + \Delta r_w} \frac{\lambda_{w,2} + \lambda_{w,3}}{\lambda_{w,1} + \lambda_{w,3}} (T_{w,3} - T_{w,2}) \quad (23)$$

Z równania bilansu energii dla węzła nr 1:

$$\pi \left[\left(r_{in} + \frac{\Delta r_w}{2} \right)^2 - r_{in}^2 \right] c_{w,1} \rho_{w,1} \frac{dT_{w,1}}{dt} = 2\pi r_{in} \dot{q}_{in} + 2\pi \left(r_{in} + \frac{\Delta r_w}{2} \right) \frac{\lambda_{w,1} + \lambda_{w,2}}{2} \frac{T_{w,2} - T_{w,1}}{\Delta r_w} \quad (24)$$

został wyznaczony strumień \dot{q}_{in} :

$$\dot{q}_{in} = c_{w,1} \rho_{w,1} \frac{\Delta r_w}{2} \left(1 + \frac{\Delta r_w}{4r_{in}} \right) \frac{dT_{w,1}}{dt} - \frac{\lambda_{w,1} + \lambda_{w,2}}{2} \frac{T_{w,2} - T_{w,1}}{\Delta r_w} \left(1 + \frac{\Delta r_w}{2r_{in}} \right) \quad (25)$$

W celu określenia temperatury czynnika przepływającego przez rurę, skorzystano z warunku brzegowego:

$$\dot{q}_{in} = \alpha_w (T_{f,w} - T_{w,1}) \quad (26)$$

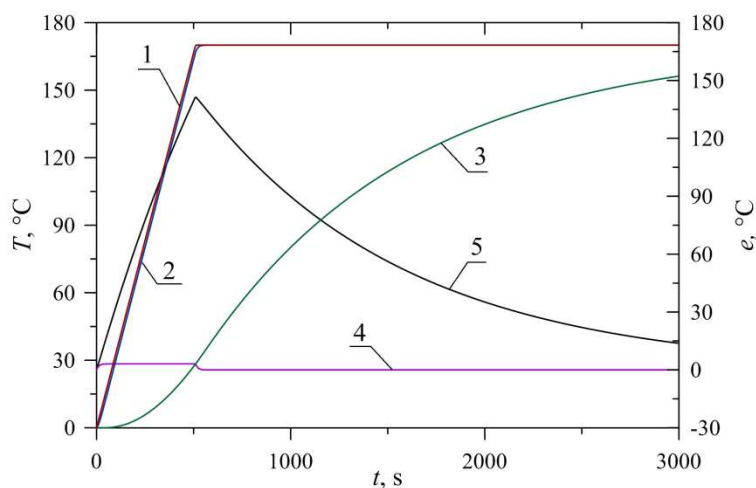
z którego otrzymuje się

$$T_{f,w}(t) = T_{w,1}(t) + \frac{\dot{q}_{in}(t)}{\alpha_w} \quad (27)$$

gdzie gęstość strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni rurociągu \dot{q}_{in} jest określona wzorem (25).

4. Przykład zastosowania metody

Wyznaczone zostaną: temperatura przepływającego czynnika $T_f(t)$ oraz współczynnik x_2 w korelacji (15), przy założeniu, że współczynnik x_1 we wzorach (12)-(14) wynosi 0,62, zgodnie z propozycją Churchilla i Bernsteina. Promień powierzchni zewnętrznej termometru $r_{th} = 3,5 \text{ mm} = 0,0035 \text{ m}$, a wymiary rurociągu są następujące: promień powierzchni zewnętrznej $r_o = 0,1775 \text{ m}$, grubość ścianki $s = r_o - r_{in} = 50 \text{ mm} = 0,05 \text{ m}$. Prędkość przepływu pary wodnej



Rys. 3. Temperatura czynnika oraz mierzone temperatury termometru i ścianki rurociągu; 1 – temperatura czynnika T_f , 2 – temperatura w osi termometru $T_{th,1}$, 3 – temperatura zewnętrznej powierzchni rurociągu $T_{w,1}$, 4 – różnica temperatury między temperaturą czynnika i temperaturą w osi termometru $e_{th} = T_f - T_{th,1}$, 5 – różnica temperatury między temperaturą czynnika i temperaturą zewnętrznej powierzchni rurociągu $e_w = T_f - T_{w,1}$

Fig. 3. Medium and measured temperatures of the thermometer and pipeline wall temperature; 1 – medium temperature T_f , 2 – temperature in the axis of thermometer $T_{th,1}$, 3 – temperature of pipeline outer surface $T_{w,1}$, 4 – difference between the fluid temperature and the temperature at the thermometer axis $e_{th} = T_f - T_{th,1}$, 5 – difference between the fluid temperature and the temperature on the outer surface of the pipeline $e_w = T_f - T_{w,1}$

wynosi 15 m/s. Przy rozwiązaniu zagadnienia bezpośredniego przyjęto, że temperatura czynnika rośnie ze stałą prędkością $v_T = dT_f/dt = 0,3333$ K/s od temperatury początkowej równej 0°C do 170°C . Po osiągnięciu temperatury 170°C temperatura czynnika pozostaje stała. Do obliczeń przyjęto następujące stałe właściwości fizyczne: $c_{th} = 469$ J/(kg·K), $\rho_{th} = 7836$ kg/m³, $\lambda_{th} = 48,4$ W/(m·K), $c_w = 486$ J/(kg·K), $\rho_w = 7750$ kg/m³, $\lambda_w = 29$ W/(m·K). Przebieg temperatur zewnętrznej powierzchni termometru i rurociągu, które przyjęto jako zmierzone przebiegi temperatury, przedstawiono na rys. 3.

Współczynniki wnikania ciepła na powierzchni termometru i rurociągu obliczano za pomocą korelacji (12)-(14) i (15). W sumie kwadratów uwzględniono 200 punktów pomiarowych z krokiem czasowym 5 s. W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano stałą $x_2 = 0,0231$. Jest to wartość bardzo bliska stałej $x_2 = 0,023$, występującej we wzorze Dittusa-Boeltera (15). Dla tych samych danych wejściowych przeprowadzono obliczenia, przyjmując $x_2 = 0,023$ i wyznaczając x_1 . W tym przypadku otrzymano wartość $x_1 = 0,638$, która różni się od wartości $x_1 = 0,62$ przyjętej podczas generowania danych pomiarowych. Przyczyną większego błędu wyznaczania x_1 jest powolna odpowiedź zewnętrznej powierzchni rurociągu na zmiany temperatury czynnika (rys. 3.). W celu poprawnego równoczesnego wyznaczenia stałych x_1 i x_2 punkt pomiaru temperatury ścianki powinien być usytuowany w niewielkiej odległości od wewnętrznej powierzchni rurociągu, tak aby tłumienie i opóźnienie sygnału wejściowego, jakim jest temperatura czynnika, nie było zbyt wielkie.

5. Podsumowanie

Przedstawiona w artykule metoda może być stosowana podczas wyznaczania nieustalonej temperatury przepływającego czynnika. Temperaturę czynnika można określić z dużą dokładnością dzięki zastosowaniu cylindrycznego termometru, w którego osi jest mierzona jego temperatura. Wykorzystując jako sygnały wejściowe czasowe przebiegi temperatury mierzone w środku termometru i ścianki, wyznacza się temperaturę czynnika za pomocą metody kroczącej, dzięki której można rozwiązać odwrotne zagadnienie przewodzenia ciepła. Z przeprowadzonych obliczeń testowych wynika, że aby prawidłowo zidentyfikować temperaturę czynnika, promień zewnętrznej powierzchni termometru powinien być tego samego rzędu co odległość punktu pomiaru temperatury ścianki od powierzchni wewnętrznej rurociągu.

Podziękowanie

Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w badaniach współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy PBS1/A4/4/2012 – Projekt Badań Stosowanych – Opracowanie nowoczesnych metod oceny trwałości resztkowej elementów ciśnieniowych instalacji energetycznych.

Literatura

- [1] Jaremkiewicz M.: Odwrotne zagadnienia wymiany ciepła występujące w pomiarach nieustalanej temperatury płynów, Wydawn. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2012.
- [2] Kreith F.: The CRC Handbook of Mechanical Engineering, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida 1998.

IDENTIFICATION OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT ON THE EXTERNAL SURFACE OF THE THERMOMETER USED FOR DETERMINING TRANSIENT FLUID TEMPERATURE

Summary

The aim of the study was to develop a method of determining the heat transfer coefficient on the outer surface of the thermometer with the large diameter casing, which is used for measuring the temperature of the fluid flowing under high pressure. The method is based on solving the inverse heat conduction problems. The heat transfer coefficient is determined based on measuring the temperature in the middle of the solid cylinder and the temperature of the pipeline wall which is thermally insulated. The heat transfer coefficient on the inner surface of the pipeline is calculated using the known correlation for the Nusselt number. The correlation for the Nusselt number contains one unknown coefficient which is determined using the least squares method. Several time points are taken into account in the sum of temperature difference squares. The estimated coefficients are in good agreement with the input values used for the solution of the inverse problem.

Keywords: fluid temperature measurement, transient state, inverse heat conduction problem, stepwise method, correlation for Nusselt number

DOI: 10.7862/rm.2015.25

Otrzymano/received: 14.09.2014 r.

Zaakceptowano/accepted: 20.03.2015 r.