

PAWEŁ LUDOWSKI\*

## NUMERYCZNO-EKSPERYMENTALNA METODA WYZNACZANIA LOKALNEGO OBCIĄŻENIA CIEPLNEGO ŚCIAN KOMÓR PALENISKOWYCH KOTŁA

### NUMERICAL-EKSPERIMENTAL METHOD FOR DETERMINING LOCAL HEAT FLUX ABSORBED BY FURNACE WATERWALLS OF STEAM BOILERS

#### Streszczenie

Przedstawiono nową metodę identyfikacji lokalnych warunków pracy rur ekranowych kotłów parowych. Obok lokalnego obciążenia cieplnego ściany komory paleniskowej kotła wyznaczany jest współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni rury ekranowej oraz temperatura czynnika wewnątrz rury. Miernik stanowi krótki odcinek mimośrodowej rury, w którym od strony paleniska zamontowane są 2 lub 4 termoelementy w pobliżu zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni rury. Nieliniowe zagadnienie najmniejszych kwadratów rozwiązane zostało metodą Levenberga-Marquardta. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym miernika wyznaczany jest w każdym kroku iteracyjnym za pomocą oprogramowania ANSYS/CFX.

*Słowa kluczowe: strumień ciepła, kotły, zagadnienie odwrotne, wstawka pomiarowa*

#### Abstract

The tubular type instrument (flux tube) was developed to identify boundary conditions in water wall tubes of steam boilers. The meter is constructed from a short length of eccentric tube containing two or four thermocouples on the fire side below the inner and outer surfaces of the tube. The fifth thermocouple is located at the rear of the tube on the casing side of the water-wall tube. The non-linear least squares problem is solved numerically using the Levenberg–Marquardt method. Temperature distribution in the cross section of the flux tube was calculated at each iteration step using ANSYS/CFX software.

*Keywords: heat flux, boilers, inverse problems, heat flux meter*

---

\* Mgr inż. Paweł Ludowski, Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Lokalne obciążenie cieplne ściany komory paleniskowej kotła zdefiniowane jest jako ilość ciepła przejmowana przez ścianę, odniesiona do jednostki powierzchni rzutu ściany na płaszczyznę prostopadłą do kierunku przepływu ciepła i jednostki czasu. Jest to bardzo ważny parametr wykorzystywany w projektowaniu i eksploatacji kotłów wodnych i parowych [1]. Zmiany lokalnego obciążenia cieplnego ściany w czasie są miarą szybkości zanieczyszczania ścian komory paleniskowej żużłem [2]. W celu zmniejszenia emisji tlenu azotu rozkład obciążenia cieplnego na wysokości ścian komory paleniskowej powinien być równomierny, dzięki czemu unika się zbyt wysokiej temperatury spalin, która sprzyja tworzeniu się tlenków azotu [3]. Z tego względu w układach komputerowych służących do monitorowania i eksploatacji kotła w trybie on-line stosuje się ciągły pomiar obciążenia cieplnego. Przedstawiona metoda może być użyta do wyznaczania odkładania się kamienia kotłowego lub tlenków żelaza na wewnętrznej powierzchni rur ekranowych. Opór cieplny osadów na wewnętrznej powierzchni wstawki można obliczyć ze wzoru

$$R = \frac{1}{\alpha_z} - \frac{1}{\alpha_w} \quad (1)$$

gdzie współczynnik wnikania ciepła  $\alpha_z$  dla rury o zanieczyszczonej powierzchni wewnętrznej obliczany jest ze wzoru

$$\frac{1}{\alpha_z} = \frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_o}{\lambda_o} = \frac{1}{\alpha_w} + R \quad (2)$$

We wzorach (1) i (2) przyjęto następujące oznaczenia:

- $R = \frac{\delta_o}{\lambda_o}$  – opór cieplny warstwy osadu na wewnętrznej powierzchni rury w  $(m^2 \cdot K)/W$ ,  
 $\delta_o, \lambda_o$  – odpowiednio grubość warstwy w metrach i współczynnik przewodzenia ciepła osadu w  $W/(m \cdot K)$ ,  
 $\alpha_z$  – współczynnik wnikania ciepła dla rury o zanieczyszczonej powierzchni wewnętrznej w  $W/(m^2 \cdot K)$ ,  
 $\alpha_w$  – współczynnik wnikania ciepła dla rury o czystej powierzchni wewnętrznej w  $W/(m^2 \cdot K)$ .

Opór cieplny osadu wyznaczany jest ze wzoru (1). Współczynnik wnikania ciepła  $\alpha_w$  można wyznaczyć za pomocą opracowanej metody na początku eksploatacji kotła, gdy powierzchnia rur ekranowych jest czysta lub po chemicznym czyszczeniu wewnętrznej powierzchni rur. Zastępczy współczynnik wnikania  $\alpha_z$  wyznaczany jest na bieżąco w trakcie eksploatacji kotła. Innym wskaźnikiem zanieczyszczenia powierzchni wewnętrznej jest maksymalna temperatura zewnętrznej powierzchni wstawki, która rośnie wraz z odkładaniem się osadu na wewnętrznej powierzchni rury ekranowej. Maksymalna temperatura zewnętrznej powierzchni rury od strony spalin wyznaczana jest w trybie on-line z użyciem programu ANSYS/CFX na podstawie temperatur mierzonych w przekroju poprzecznym wstawki pomiarowej.

Wyznaczany na bieżąco opór cieplny osadu  $R$  oraz maksymalna temperatura wstawki od strony komory paleniskowej mogą być wykorzystywane jako wskaźniki stopnia zanieczyszczenia rur ekranowych kotłów. Jeżeli opór cieplny osadu i maksymalna temperatura rury są większe od wartości dopuszczalnych, to kocioł należy poddać czyszczeniu chemicznemu.

Prezentowana metoda może być zastosowana do oceny lokalnego stopnia zanieczyszczenia komory paleniskowej kotła. Jeżeli wyznaczana na bieżąco wartość obciążenia cieplnego  $q_m$  spada poniżej zadanej wartości granicznej, to należy włączyć zdmuchiвач żużla w celu usunięcia lokalnego zażużlowania komory. Metoda umożliwia wyznaczenie z dużą dokładnością temperatury czynnika  $T_f$  przepływającego wewnątrz rury. W pracy przeanalizowane zostaną dwie wstawki termometryczne. W pierwszej temperatura wstawki od strony paleniska mierzona jest w dwóch punktach usytuowanych na różnych promieniach oraz na zewnętrznej powierzchni wstawki od strony izolacji kotła. W drugiej wstawce liczba punktów pomiaru temperatury od strony paleniska jest dwukrotnie większa, to jest temperatura ścianki wstawki mierzona jest w czterech punktach. Lokalizacja piątego punktu pomiarowego jest taka sama jak w pierwszej wstawce. Porównana zostanie niepewność wyznaczania poszukiwanych wielkości: gęstości strumienia  $\dot{q}_m$  i współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  oraz temperatury czynnika  $T_f$ .

## 2. Matematyczne sformułowanie problemu

Schematy wstawek pomiarowych przedstawiono na rysunkach 1a i b.

Wstawka pomiarowa pogrębiona jest od strony paleniska, dzięki czemu łatwiej zamocować jest termoelementy w czołowej części wstawki. Wstawka wykonana jest ze stali węglowej o współczynniku przewodzenia ciepła  $\lambda(T)$  zależnym od temperatury. Ustalony rozkład temperatury we wstawce wyznacza się z równania przewodzenia ciepła

$$\nabla \cdot [\lambda(T) \nabla T] = 0 \quad (3)$$

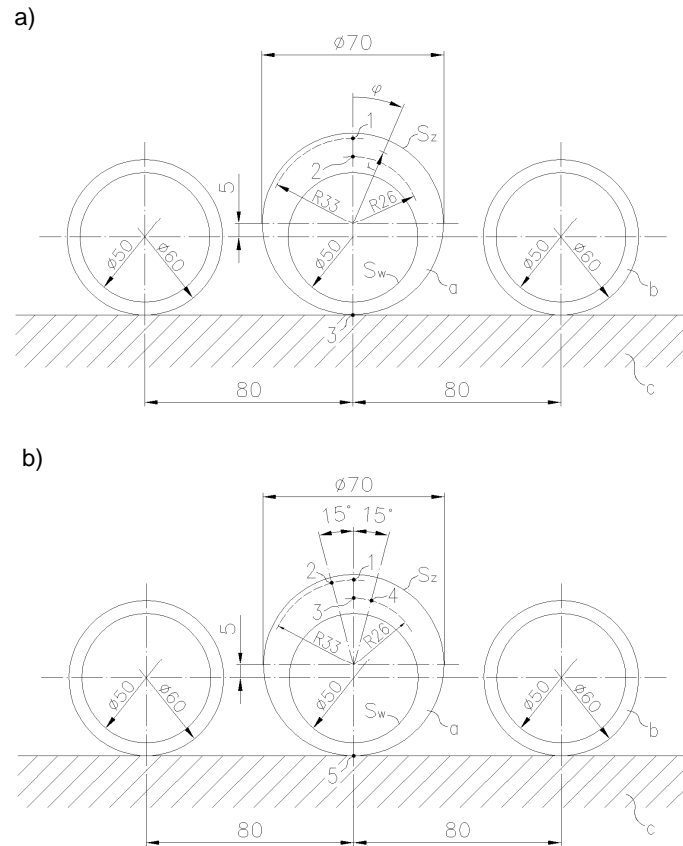
oraz z warunku brzegowego na powierzchni zewnętrznej (rys. 2)

$$\left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \right]_{S_2} = \dot{q}_m \cdot \psi(\varphi_1) \quad (4)$$

i powierzchni wewnętrznej

$$\left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \right]_{S_w} = \alpha (T_f - T|_{S_w}) \quad (5)$$

We wzorach (3)–(5) przyjęto następujące oznaczenia:  $\nabla$  – operator gradientu (nabla),  $T$  – temperatura wstawki,  $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła materiału wstawki,  $n$  – normalna do powierzchni skierowana na zewnątrz obszaru,  $\alpha$  – współczynnik wnikania ciepła,  $\psi$  – współczynnik opromieniowania zewnętrznej powierzchni wstawki,  $\varphi_1$  – kąt (rys. 3),  $T_f$  – temperatura czynnika wewnątrz rury,  $S_w$  – powierzchnia wewnętrzna wstawki,  $S_2$  – powierzchnia zewnętrzna wstawki.



Rys 1. Schemat mimośrodowej wstawki termometrycznej do identyfikacji warunków brzegowych w rurach ekranowych kotłów: a) wstawka z 3 punktami pomiaru temperatury, b) wstawka z 5 punktami pomiaru temperatury; a – wstawka pomiarowa, b – rura ekranowa, c – izolacja cieplna ekranu

Fig. 1. The heat flux tube placed between two waterwall tubes: a) heat flux tube with 3 thermocouples on the fire side; b) heat flux tube with 5 thermocouples on the fire side; a – flux tube, b – water wall tube, c – thermal insulation

Zagadnienie brzegowe (3)–(5) nazywane jest zagadnieniem bezpośrednim lub prostym, gdyż znane są warunki brzegowe. Problem analizowany w pracy jest zagadnieniem odwrotnym, w którym na podstawie temperatury w zadanych punktach  $(r_i, \varphi_i)$ ,  $i = 1, \dots, m$ , gdzie  $m$  oznacza liczbę punktów pomiaru temperatury, wyznaczone są  $n = 3$  parametry:  $\dot{q}_m$ ,  $\alpha$ ,  $T_f$ . Wymienione parametry:  $\dot{q}_m$ ,  $\alpha$ ,  $T_f$  wyznaczone są na podstawie temperatury wstawki mierzonej w  $m$  punktach

$$T_i = f_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (6)$$

gdzie  $T_i$  i  $f_i$  oznaczają odpowiednio temperaturę zmierzoną i obliczoną w punkcie  $(r_i, \varphi_i)$ .

Parametry  $\dot{q}_m$ ,  $\alpha$ ,  $T_f$  wyznaczone zostaną za pomocą metody najmniejszych kwadratów, tak aby suma kwadratów różnic temperatury zmierzonych i obliczonych była najmniejsza

$$\sum_{i=1}^m [T_i(q_m, \alpha, T_f) - f_i]^2 = \min \quad (7)$$

Nieliniowe zagadnienie najmniejszych kwadratów rozwiązano metodą Levenberga-Marquardta [5].

### 3. Testy obliczeniowe

Najpierw wyznaczono rozkład temperatury w przekroju poprzecznym wstawki pomiarowej przy założeniu, że obciążenie cieplne  $q_m$ , współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  na wewnętrznej powierzchni wstawki oraz temperatura czynnika  $T_f$  są znane i wynoszą:  $q_m = 250\,000 \text{ W/m}^2$ ,  $\alpha = 30\,000 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ ,  $T_f = 318^\circ\text{C}$ . Zmiany współczynnika opromieniowania  $\psi(\varphi_1)$  na obwodzie rury wyznaczono za pomocą programu ANSYS [1]. Uwzględniono zależność współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury

$$\lambda(T) = 53,26 - 0,02376224 \cdot T \quad (8)$$

gdzie współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$  wyrażony jest w  $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$ , a temperatura  $T$  w  $^\circ\text{C}$ . Rozkład temperatury wyznaczono za pomocą ANSYS/CFX v12.1 z udziałem modelu wstawki na elementy skończone przedstawionym na rys. 2. Wyznaczone zmiany temperatury na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wstawki przedstawiono na rys. 3. Obliczone wartości temperatury wstawki w punktach:

$$\begin{aligned} P_1 - r_1 &= 33 \text{ mm}, \quad \varphi_1 = 0^\circ, \\ P_2 - r_2 &= 33 \text{ mm}, \quad \varphi_2 = 15^\circ, \\ P_3 - r_3 &= 26 \text{ mm}, \quad \varphi_3 = 0^\circ, \\ P_4 - r_4 &= 26 \text{ mm}, \quad \varphi_4 = 15^\circ, \\ P_5 - r_5 &= 35 \text{ mm}, \quad \varphi_5 = 180^\circ, \end{aligned}$$

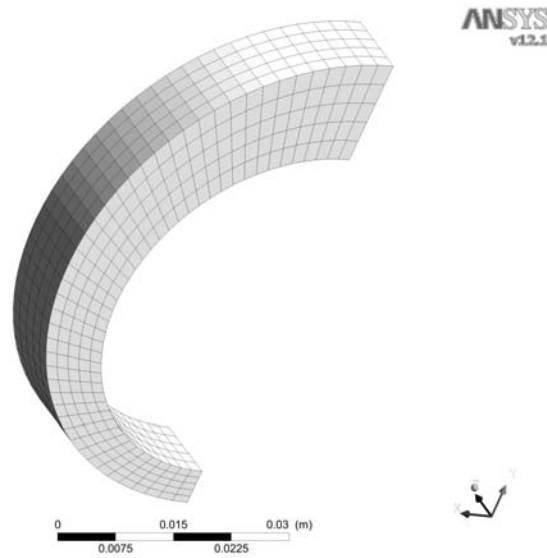
w których mierzone są temperatury, są następujące:

$$\begin{aligned} f_1 &= 418,31^\circ\text{C}, \\ f_2 &= 415,67^\circ\text{C}, \\ f_3 &= 374,08^\circ\text{C}, \\ f_4 &= 372,22^\circ\text{C}, \\ f_5 &= 321,11^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Traktując obliczone temperatury jako dane pomiarowe, otrzymano następujące wartości poszukiwanych parametrów:

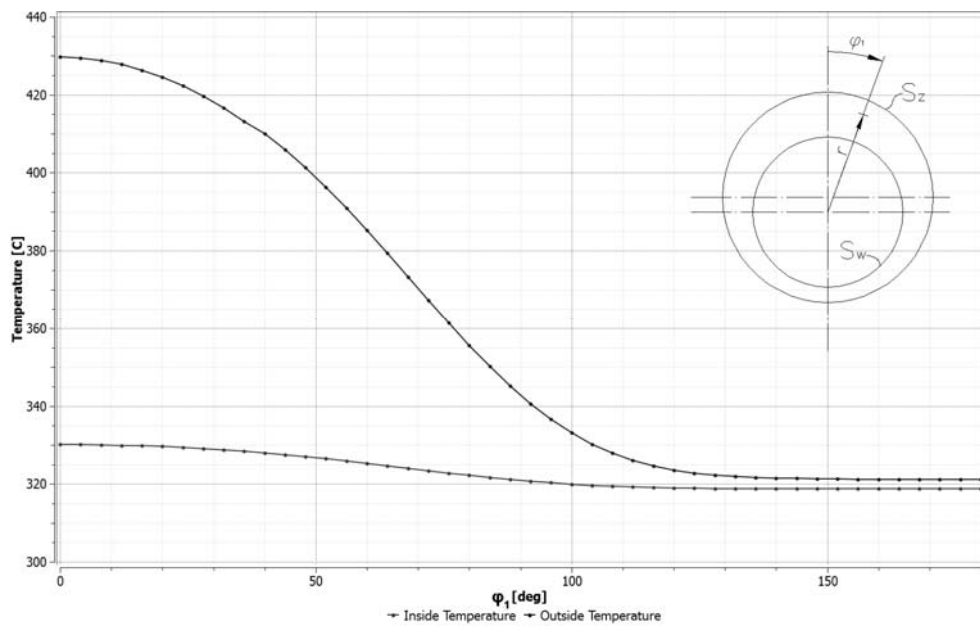
3 punkty pomiarowe:  $P_1$ ,  $P_3$ , i  $P_5$

$$\begin{aligned} q_m &= 250\,000,19 \text{ W/m}^2, \\ \alpha &= 30\,000,38 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}, \\ T_f &= 318,00^\circ\text{C}. \end{aligned}$$



Rys. 2. Podział modelu wstawki na elementy skończone – 1150 elementów, 1692 węzły

Fig. 2. Division of geometrical model of the heat flux tube into finite elements – 1150 elements, 1692 nodes



Rys. 3. Zmiany temperatury na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wstawki w funkcji kąta  $\varphi_1$

Fig. 3. Flux tube temperature at outer and inner surfaces as a function of angular coordinate  $\varphi_1$

5 punktów pomiarowych:  $P_1, P_2, P_3, P_4$  i  $P_5$

$$q_m = 249\,999,94 \text{ W/m}^2,$$

$$\alpha = 30\,000,16 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)},$$

$$T_f = 318,00^\circ\text{C}.$$

Widać, że dla dokładnych danych pomiarowych wyznaczone wartości poszukiwanych parametrów bardzo dobrze zgadzają się z danymi wejściowymi przyjętymi do obliczeń.

Następnie wyznaczone zostaną niepewności wyznaczania poszukiwanych parametrów przy założeniu, że 95% przedziały ufności dla wielkości mierzonych bezpośrednio są następujące:  $2\sigma_{f_j} = \pm 0,2\text{K}$ ;  $j = 1, \dots, 5$ ;  $2\sigma_\lambda = \pm 0,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ;  $2\sigma_\lambda = \pm 0,05 \text{ mm}$ ;  $2\sigma_{\phi_j} = \pm 0,5^\circ$ ;  $j = 1, \dots, 5$ .

Średnie odchylenie standardowe  $\sigma_{x_i}$  parametru  $x_i$  obliczano za pomocą zasady przenoszenia wariancji opracowanej przez Gaussa [6]

$$\sigma_{x_i} = \left[ \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial x_i}{\partial f_j} \sigma_{f_j} \right)^2 + \left( \frac{\partial x_i}{\partial \lambda} \sigma_\lambda \right)^2 + \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial x_i}{\partial r_j} \sigma_{r_j} \right)^2 + \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial x_i}{\partial \phi_j} \sigma_{\phi_j} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

We wzorze (9) symbole  $x_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  oznaczają:  $x_1 = q_m$ ,  $x_2 = \alpha$ ,  $x_3 = T_f$ .

Najpierw wyznaczone zostaną niepewności wyznaczanych parametrów  $q_m$ ,  $\alpha$  i  $T_f$  za pomocą wstawki przedstawionej na rys. 1a, której temperatura mierzona jest w 3 punktach.

Przyjmując następujące niepewności parametrów  $x_i$  wyznaczanych pośrednio, otrzymano

$$2\sigma_{x_1} = 4073,50 \text{ W/m}^2; 2\sigma_{x_2} = 3921,12 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}; 2\sigma_{x_3} = 0,22 \text{ K}$$

Granice 95% przedziału ufności dla wyznaczanych parametrów są następujące:

$$q_m = 250000,2 \pm 4073,5 \text{ W/m}^2;$$

$$\alpha = 30000,4 \pm 3921,1 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)};$$

$$T_f = 318,0 \pm 0,22^\circ\text{C}.$$

Identyczne obliczenia przeprowadzono dla wstawki przedstawionej na rys. 1b, w której zainstalowano 2 dodatkowe punkty pomiarowe w czołowej części wstawki. Otrzymano następujące wyniki

$$2\sigma_{x_1} = 3557,73 \text{ W/m}^2; 2\sigma_{x_2} = 2379,85 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}; 2\sigma_{x_3} = 0,22 \text{ K}$$

Granice 95% przedziału ufności dla wyznaczanych parametrów są następujące:

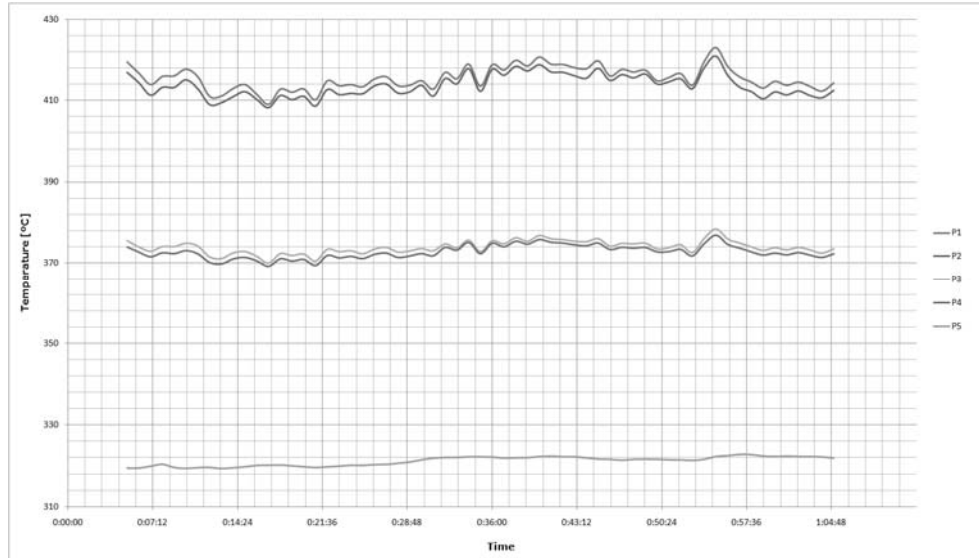
$$q_m = 249\,999,9 \pm 3557,7 \text{ W/m}^2;$$

$$\alpha = 30\,000,16 \pm 2379,9 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)};$$

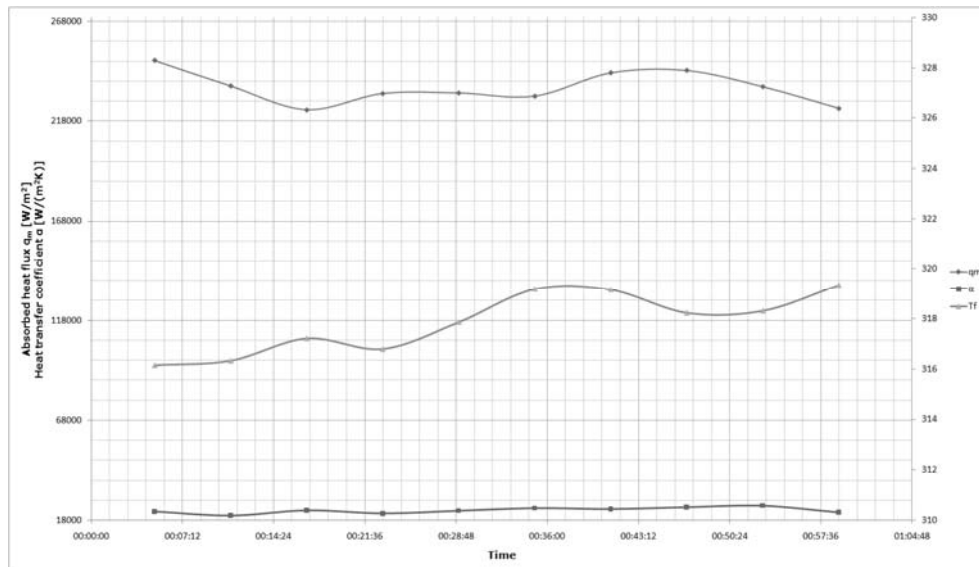
$$T_f = 318,0 \pm 0,22^\circ\text{C}.$$

Z analizy otrzymanych wyników widać, że dokładność wyznaczania poszukiwanych parametrów w obydwu przypadkach jest bardzo dobra. Należy jednak zwrócić uwagę, że w przypadku 5 punktów pomiarowych (rys. 1b) niepewność wyznaczania obciążenia cieplnego  $q_m$  jest mniejsza niż w przypadku 3 punktów. Większa liczba punktów pomiaru temperatury w czołowej części wstawki zapewnia większą dokładność, gdyż niewłaściwe usytuowanie jednego z termoelementów przy prawidłowej lokalizacji pozostałych 4 punktów pomiarowych nie ma większego wpływu na wyznaczone pośrednio parametry  $q_m$ ,  $\alpha$  i  $T_f$ .

a)



b)



Rys. 4. Zmierzone przebiegi temperatury wstawki położonej na wysokości 15,4 m w 5 punktach (a) oraz wyznaczone na ich podstawie przebiegi obciążenia cieplnego  $q_m$ , współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  i temperatury czynnika  $T_f$  (b)

Fig. 4. Measured temperature histories at 5 points for heat flux tube located at the level of 15,4 m (a) and estimated parameters: absorbed heat flux  $q_m$ , heat transfer coefficient  $\alpha$  and fluid temperature  $T_f$  (b)

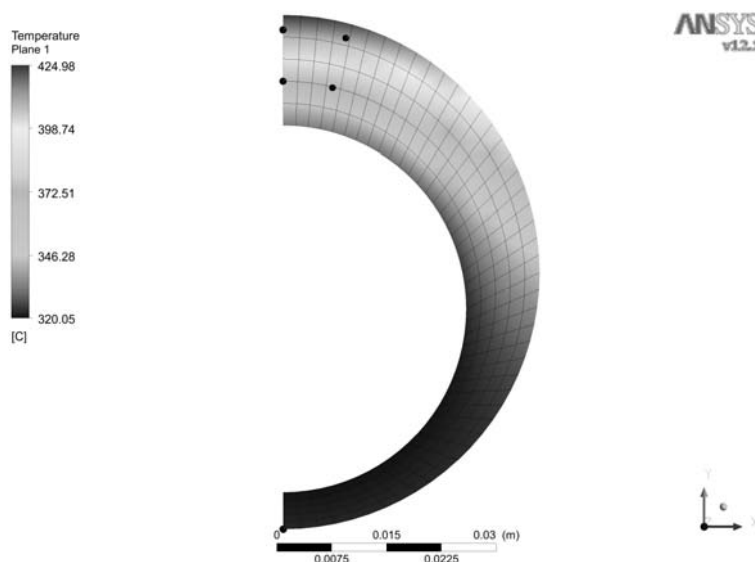


W przypadku dwóch punktów pomiarowych usytuowanych na różnych promieniach od strony ogniowej błąd usytuowania jednego termoelementu wpływa w większym stopniu na błąd wyznaczenia  $q_m$  i  $\alpha$ . W obydwu przypadkach niepewność wyznaczenia temperatury  $T_f$  jest podobna, ponieważ temperatura ścianki mierzona w punkcie 5 jest zbliżona do temperatury czynnika.

#### 4. Badania eksperymentalne w komorze paleniskowej kotła

Badania eksperymentalne przeprowadzono w kotle o wydajności 210 t/h w jednej z krajowych elektrowni. Wstawki pomiarowe zainstalowano w środku ekranu na różnych wysokościach kotła. Wyniki pomiarów temperatury wstawki usytuowanej na wysokości 15,4 m przedstawiono na rys. 4a, a wyznaczone na tej podstawie parametry na rys. 4b.

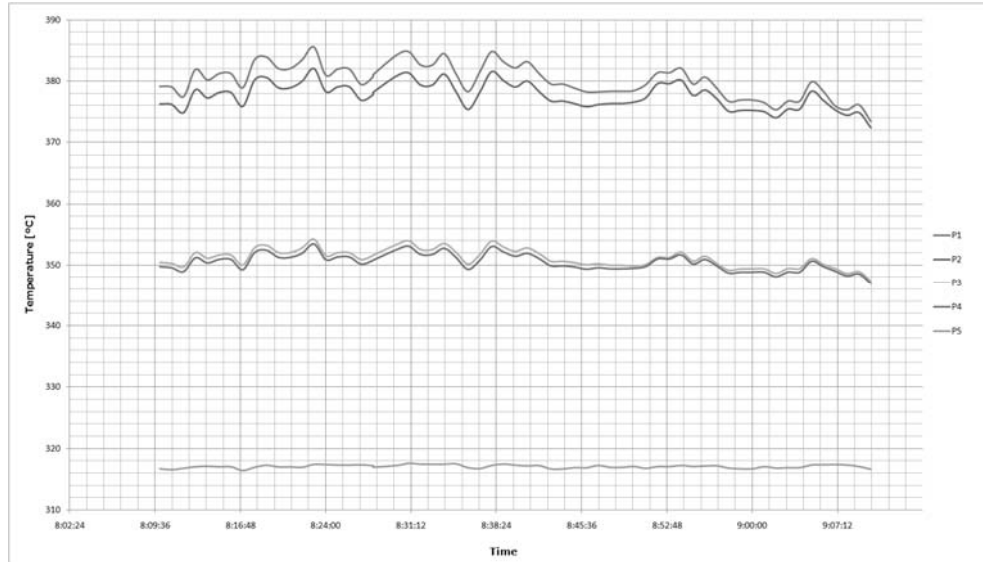
Podobne pomiary i obliczenia przeprowadzono dla wstawki usytuowanej na wysokości 19,2 m. Wyniki pomiarów i obliczeń przedstawiono odpowiednio na rys. 6a i b.



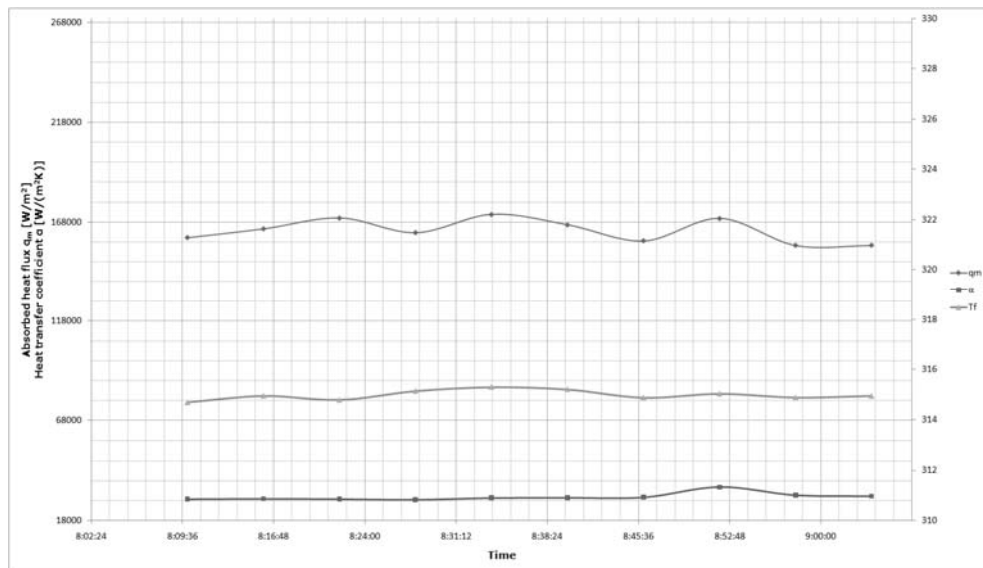
Rys. 5. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym wstawki usytuowanej na poziomie 15,4 m wyznaczony na podstawie następujących danych pomiarowych  $T_1 = 413,509^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 412,227^\circ\text{C}$ ;  $T_3 = 372,855^\circ\text{C}$ ;  $T_4 = 372,227^\circ\text{C}$ ;  $T_5 = 322,209^\circ\text{C}$ . Wyznaczone parametry:  $q_m = 230\,425,8\text{ W/m}^2$ ;  $\alpha = 24\,128,8\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ ;  $T_f = 319,19^\circ\text{C}$

Fig. 5. Temperature distribution in cross section of the flux tube located at level of 15,4 m, which was determined on the basis of measured temperatures:  $T_1 = 413,509^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 412,227^\circ\text{C}$ ;  $T_3 = 372,855^\circ\text{C}$ ;  $T_4 = 372,227^\circ\text{C}$ ;  $T_5 = 322,209^\circ\text{C}$ . The estimated parameters are:  $q_m = 230\,425,8\text{ W/m}^2$ ;  $\alpha = 24\,128,8\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ ;  $T_f = 319,19^\circ\text{C}$

a)

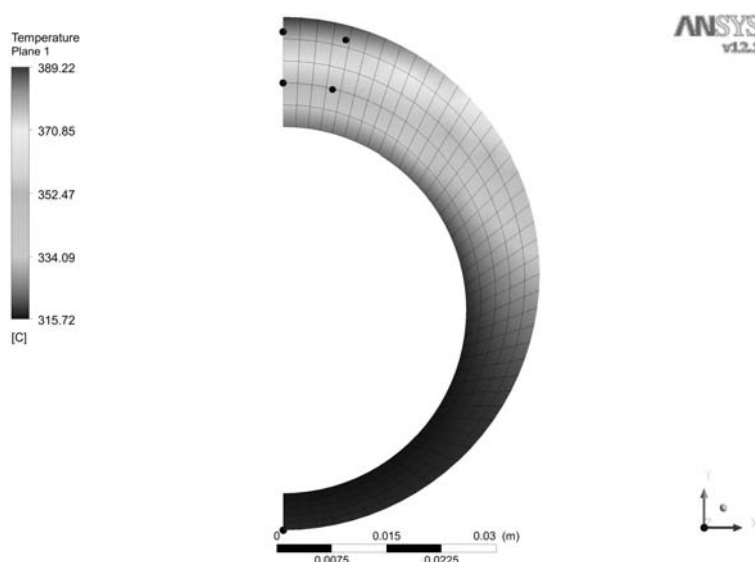


b)



Rys. 6. Zmierzone przebiegi temperatury wstawki w 5 punktach (a) oraz wyznaczone na ich podstawie przebiegi obciążenia cieplnego, współczynnika wnikania ciepła i temperatury czynnika (b). Położenie wstawki: 19,2 m

Fig. 6. Measured temperature histories at 5 points for heat flux tube located at the level of 19,2 m (a) and estimated parameters: absorbed heat flux  $q_m$ , heat transfer coefficient  $\alpha$  and fluid temperature  $T_f$  (b)



Rys. 7. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym wstawki usytuowanej na poziomie 19,2 m wyznaczone na podstawie następujących danych pomiarowych  $T_1 = 382,170^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 379,040^\circ\text{C}$ ;  $T_3 = 352,270^\circ\text{C}$ ;  $T_4 = 351,460^\circ\text{C}$ ;  $T_5 = 317,300^\circ\text{C}$ . Wyznaczone parametry:  $q_m = 166\,577,5\text{ W/m}^2$ ;  $\alpha = 29\,489,5\text{ W/(m}^2\text{ K)}$ ;  $T_f = 315,21^\circ\text{C}$

Fig. 7. Temperature distribution in cross section of the flux tube located at level of 19,2 m, which was determined on the basis of measured temperatures:  $T_1 = 382,170^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 379,040^\circ\text{C}$ ;  $T_3 = 352,270^\circ\text{C}$ ;  $T_4 = 351,460^\circ\text{C}$ ;  $T_5 = 317,300^\circ\text{C}$ . The estimated parameters are:  $q_m = 166\,577,5\text{ W/m}^2$ ;  $\alpha = 29\,489,5\text{ W/(m}^2\text{ K)}$ ;  $T_f = 315,21^\circ\text{C}$

Wstawka pomiarowa na wysokości 15,4 m znajduje się bezpośrednio nad palnikami, co sprawia, że wartość obciążenia cieplnego  $q_m$  jest większa w porównaniu z obciążeniem cieplnym na wysokości 19,2 m. Na wysokości 15,4 m obciążenie cieplne wynosi około  $230\,000\text{ W/m}^2$ , podczas gdy na wysokości 19,2 m około  $168\,000\text{ W/m}^2$ .

Na uwagę zasługuje bardzo wysoka trwałość wstawek pomiarowych wynosząca ponad 5 lat.

## 5. Wnioski

Przedstawiona w artykule wstawka pomiarowa do wyznaczania gęstości strumienia ciepła, współczynnika wnikania ciepła na jej wewnętrznej powierzchni oraz temperatura czynnika odznacza się wysoką dokładnością i trwałością. Wstawka, w której w czołowej jej części znajdują się 4 punkty pomiaru temperatury usytuowane na różnych promieniach, odznacza się większą dokładnością w porównaniu ze wstawką, w której są tylko 2 punkty pomiaru temperatury w jej czołowej części. Obydwie wstawki pomiarowe mogą być stosowane do pomiaru lokalnego obciążenia cieplnego ścian komór paleniskowych kotłów. Ściany mogą membranowe lub wykonane z rur gładkich niepołączonych ze sobą.

## Literatura

- [1] Taler J., Taler D., Sury A., *Identification of thermal operation conditions of water-wall tubes using eccentric tubular tube meters*, Rynek Energii, No. 1 (92), 2011.
- [2] Taler J., Trojan M., Taler D., *Simulation and Monitoring of Fouling and Slagging in Coal – Fired Steam Boilers*, Rynek Energii, No. 1 (86), 2010, 137-147.
- [3] Pronobis M., Hernik B., Wejkowski R., *Kinetics of low NO<sub>x</sub> corrosion of waterwalls in utility boilers*, Rynek Energii, No. 6 (91), 2010, 121-128.
- [4] Taler J. (red), *Procesy cieplne i przepływowe w dużych kotłach energetycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011.
- [5] Seber G.A.F., Wild C.F., *Nonlinear Regression*, John Wiley & Sons, New York 1989.
- [6] Policy on Reporting Uncertainties in Experimental Measurements and Results, Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 122, May 2000, 411-413.