

Zbigniew LORKIEWICZ

Andrzej PUSZER

Instytut Energetyki Paliwowej

POMIAR WSPÓŁCZYNNIKA WNIKANIA CIEPŁA
W ŁOŻU FLUIDALNYM METODĄ DYNAMICZNĄ

Streszczenie. W referacie omówiono trzy sposoby wyznaczania współczynnika wnikania ciepła w dynamicznej metodzie pomiaru. Poćniano opis metody oraz zamieszczono wyniki badań i porównano je z wynikami metody statycznej.

1. Wstęp

Powszechnie przyjęte jest posługiwanie się całkowitym współczynnikiem wnikania ciepła od łoża fluidalnego do zanurzonej w nim powierzchni ogrzewalnej. Współczynnik ten można wyznaczyć eksperymentalnie na drodze:

- a) statycznej - bilans energii układu: łożo fluidalne - wymiennik ciepła w stanie ustalonym,
- b) dynamicznej - bilansu energii układu: łożo fluidalne - sonda pomiarowa w stanie nieustalonym.

Metodą statyczną posłużono się już w Instytucie Energetyki Paliwowej do wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła do pojedynczej, poziomej rury umieszczonej w palenisku fluidalnym. Dane eksperymentalne wraz z próbą ich uogólnienia przedstawiono w pracach [2], [10].

Wyniki badań współczynnika wnikania ciepła metodą dynamiczną zaprezentowano natomiast w niniejszym opracowaniu.

Do pomiaru stosuje się w tej metodzie specjalną sondę zwaną sondą Schmidta [6] lub α - kalorymetrem [1], na powierzchni której skokowo zmienia się warunki wymiany ciepła przez szybkie jej zanurzenie do łoża fluidalnego. Na podstawie czasowego przebiegu temperatury sondy określa się współczynnik wnikania ciepła. Znane są trzy sposoby obliczania współczynnika:

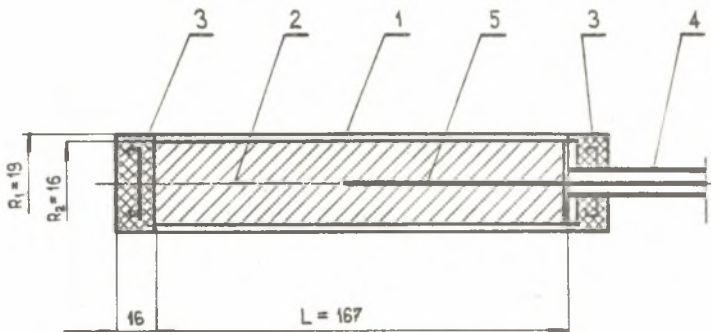
- a) przez określanie zmian szybkości temperatury $\frac{dt}{dt}$, podany przez St. Ochęduszkę [6],
- b) przez określenie stałej czasowej T_1 , skokowej charakterystyki temperatury sondy, podany przez Kondratiewa [1].

c) przez określenie pola zawartego między charakterystyką skokową sondy a jej asymptotą poziomą, podany przez Puszera [8],[9].

2. Metoda pomiaru

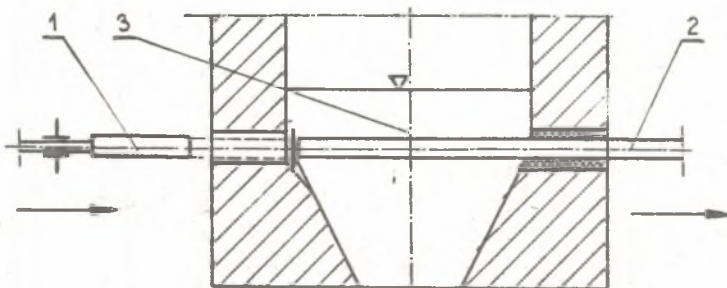
Badania eksperymentalne wykonano w Laboratorium Spalania Paliw Stałych Instytutu Energetyki Paliwowej. Do badań wykorzystano fluidalną komorę spalania: wysokość 1600 mm, średnica wewnętrzna 500 mm, średnica rusztu 100mm, strumień spalonego węgla - do 50 kg/h.

Schemat sondy pomiarowej stosowanej do pomiarów pokazano na rys.1. Składa się ona z odcinka badanej rury kotłowej (1), walca miedzianego (2), osłon ceramicznych (3) oraz uchwyty (4). W osi walca, w połowie jego długości umieszczono termoelement płaszczyzny NiCr-Ni (5). Konstrukcję sondy wykonano w oparciu o opis sondy Schmidta podany przez St. Ochęduszkę [6].



Rys. 1. Sonda pomiarowa

1 - rura kotłowa, 2 - walec miedziany, 3 - osłona ceramiczna, 4 - uchwyt, 5 - termopara



Rys. 2. Schemat zasady pomiaru

1 - sonda pomiarowa, 2 - rura chłodząca, 3 - łożo fluidalne

Sposób przeprowadzenia pomiaru przedstawiono schematycznie na rys. 2. W miejsce rury chłodzącej (2) umieszczonej poziomo w łożu fluidalnym (3) wprowadza się bardzo szybko sondę (1). Wprowadzenie sondy i usuwanie rury odbywa się jednocześnie. Czasową zmianę temperatury walca miedzianego mierzone za pomocą termopary i miliwoltomierza rejestrującego. Ponadto dokonywano pomiarów innych wielkości pozwalających na określenie warunków działania paleniska fluidalnego: temperatury łoża fluidalnego, strumienia powietrza, składu spalin nad łożem itp.

3. Opracowanie wyników pomiaru

Opracowanie wyników pomiaru w metodzie dynamicznej może być dokonane trzema sposobami.

Sposób pierwszy oparty jest na bilansie energii sondy przy założeniu płaskiego profilu temperatury ($\lambda_s \rightarrow \infty$) [6].

$$mc \frac{dt}{d\tau} = \alpha A (\vartheta - t) \quad (1)$$

Współczynnik wnikania ciepła α będzie zatem

$$\alpha = \left[\frac{m c}{A(\vartheta - t)} \frac{dt}{d\tau} \right]_{t=\Theta} \quad (2)$$

gdzie:

$A = 2\pi R_1 L$ - powierzchnia boczna sondy,

m - masa odcinka pomiarowego sondy,

c - ciepło właściwe sondy,

ϑ - temperatura ośrodka badanego (łoża fluidalnego),

t - temperatura sondy,

Θ - temperatura ścianki rury kotłowej chłodzonej wodą, umieszczonej w łożu fluidalnym o takich samych parametrach jak sonda pomiarowa.

Różnica temperatur $\Theta - t$ jest bliska zera, ponieważ udział oporu przewodzenia przez rurę i miedziany walec w całkowitym oporze przewodzenia ciepła jest niewielki. Według szacunkowej oceny wynosi on 2-3%, zależnie od wartości współczynnika α .

Sposób drugi oparty jest na tych samych założeniach co poprzedni. Rozwiązując liniowe równanie różniczkowe (1) przy skokowej zmianie temperatury ośrodka

$$\vartheta = \frac{1}{\Delta\vartheta}$$

otrzymuje się

$$t(\tau) = \Delta \psi \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T_1}\right) \right] \quad (3)$$

gdzie:

$$T_1 = \frac{m c}{\alpha A} - \text{stała czasowa.}$$

Współczynnik wnikania ciepła α określa się z zależności [1], [4]:

$$\alpha = \frac{m c}{A} \frac{1}{T_1^* \Psi} \quad (4)$$

gdzie:

Ψ - liczba Kondratiewa,

T_1^* - stała czasowa wyznaczona z wykresu [7] (rys. 3b).

Zależność (4) jest poprawna dla sondy wykonanej z materiału jednorodnego. Liczba Ψ charakteryzuje nierównomierność rozkładu temperatur ($\lambda_s \neq \infty$) w sondzie i jest funkcją jej geometrycznych i fizycznych parametrów oraz warunków wymiany ciepła z ośrodkiem mierzonym i rodzaju wymuszenia. Jeśli w przekroju poprzecznym sondy występuje płaski profil temperatury, wówczas $\Psi = 1$ i $T_1^* = T_1$.

Sposób trzeci uwzględnia dwuwarstwową budowę sondy pomiarowej, dla której profil temperatury określa układ dwóch równań różniczkowych Fouriera [5] przy warunkach brzegowych 3 i 4 rodzaju

$$c_i \rho_i \frac{\partial t_i}{\partial t} = \text{div}(\lambda_i \text{grad } t_i) \quad (5)$$

gdzie:

$i = 1, 2$ (1 - dotyczy rury kotłowej, 2 - walca miedzianego).

Rozwiązanie układu równań (5) po dokonaniu całkowitej transformacji Laplace'a przy zerowym warunku początkowym będzie [8]:

$$t_2(\xi, s) = G(\xi, s) \cdot \psi(s) \quad (6)$$

gdzie:

$$G(\xi, s) = \frac{N(\xi, s)}{M(s)}$$

$$N(\xi, s) = k_R [I_0(\beta_2 k_R) K_1(\beta_2 k_R) + I_1(\beta_2 k_R) K_0(\beta_2 k_R)] I_0(\xi \frac{\beta_1}{k_R})$$

$$M(s) = \left[\frac{2}{\beta_1} K_1(\beta_2) - K_0(\beta_2) \right] \left[k_E I_1(\beta_1) I_0(\beta_2 k_R) - \right. \\ \left. + k_R I_0(\beta_1) I_1(\beta_2 k_R) \right] + \left[\frac{\beta_2}{\beta_1} I_1(\beta_2) + I_0(\beta_2) \right] \left[k_E I_1(\beta_1) K_0(\beta_2 k_R) + \right. \\ \left. + k_R I_0(\beta_1) K_1(\beta_2 k_R) \right]$$

gdzie:

$\xi = \frac{r}{R_2}$ - względny promień, na którym realizowany jest pomiar temperatury t ,

$Bi = \frac{\alpha R_1}{\lambda_1}$ - liczba Biota,

$$k_R = \frac{R_1}{R_2}; \quad k_E = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2}}$$

s - operator z całkowego przekształcenia Laplace'a,

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{s}{a_1}} R_1, \quad \beta_2 = \sqrt{\frac{s}{a_2}} R_2,$$

$I_0(x)$, $I_1(x)$ - zmodyfikowane funkcje Bessela o argumentie x , pierwszego rodzaju, zerowego i pierwszego rzędu [5],

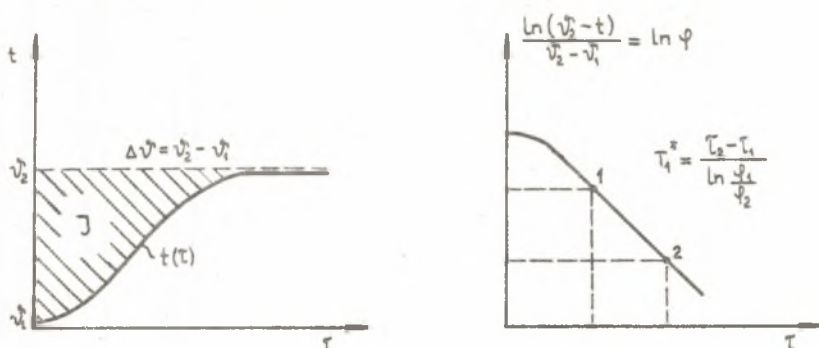
$K_0(x)$, $K_1(x)$ - zmodyfikowane funkcje Bessela o argumentie x , drugiego rodzaju, zerowego i pierwszego rzędu [5].

W oparciu o prace [8], [9] i badania własne autorów proponuje się do wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła posłużyć polem J zawartym między charakterystyką skokową $t(\tau)$ a jej asymptotą poziomą ψ_2 (rys. 3a).

Pole J jest wielkością łatwą do określenia na drodze planimetrowania lub całkowania sygnału elektrycznego z termoelementu za pomocą integratora elektronicznego.

Pozostaje do określenia zależność

$$J = f(\alpha) = \int_0^{\infty} [\Delta \psi - t(\tau)] d\tau \quad (7)$$



Rys. 3. Charakterystyka skokowa sondy

a - w układzie współrzędnych t, τ , b - w układzie współrzędnych $\ln \varphi, \tau$

Dla praktycznych obliczeń, gdy dana jest transmitancja $G(\xi, s)$, korzystniej jest zależność (7) przedstawić w formie operatorowej:

$$J = \int_0^{\infty} \left[\int_0^{\infty} [\Delta \psi - t(\tau)] \exp(-s\tau) d\tau \right] ds = \Delta \psi \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1 - G(\xi, s)}{s} \quad (8)$$

Po obliczeniu granicy (8) przy uwzględnieniu zależności (6) otrzymano \underline{B} :

$$\alpha_f = \frac{c_1}{\Delta \psi c_2 + c_3} \quad (9)$$

gdzie:

$$c_1 = 2 \frac{\lambda_2}{R_2} \left[1 + k_R \left(\frac{k_\lambda}{k_a} - k_R \right) \right]$$

$$c_2 = \frac{4a_2}{R_2^2}$$

$$c_3 = \left(\frac{f}{k_a} \right)^2 + k_R^2 + 2 k_R \left(\frac{k_\lambda}{k_a} - k_R \right) \ln k_R - \left(\frac{k_R}{k_a} \right)^2 - 1$$

$$k_a = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, \quad k_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

4. Wyniki badań

Przeprowadzono kilkanaście serii pomiarów przy różnych temperaturach i prędkościach fluidyzacji oraz jednakowej ziarnistości węgla doprowadzanego do paleniska fluidalnego. Współczynniki wnikania ciepła obliczono trzema sposobami: (2), (4), (9), a reprezentatywne wyniki przedstawiono w tabelicy 1.

Tablica 1

Przykład wyników badań

Lp.	Parametry łoża		Współczynnik wnikania ciepła α , W/m^2K				
			z m i e r z o n y			obliczony	
	t °C	w m/s	wzór (2)		wzór (4)	wzór (9)	równanie [2]
			Θ °C	α , W/m^2K			
1	900	1,59	414	244,6	289,4	226,5	214,8
2	895	1,58	403	231,3	285,1	234,8	216,5
3	788	1,44	360	207,6	230,3	192,8	212,7
4	778	1,42	355	205,8	222,8	185,0	214,8
5	679	1,29	310	236,6	237,8	201,8	221,8

W sposobie pierwszym (2) istotną rolę odgrywa przyjęcie temperatury ścianki Θ , dla której określa się szybkość zmiany temperatury. Temperatura Θ jest złożoną funkcją warunków wymiany ciepła w układzie rura kotłowa - łożo fluidalne. Wyniki podane w tabelicy 1 dotyczą przypadku podgrzewania wody o ciśnieniu 0,3 MPa i prędkości przepływu 0,3 m/s.

Maksymalny błąd względny metody dynamicznej, obliczony dla trzech sposobów wyznaczenia współczynnika α , odpowiednio wynosi: 21%, 12%, 7,5%.

Dla porównania podano w tabelicy 1 wyniki obliczeń współczynnika z równania korelacyjnego otrzymanego z badań statycznych [2]. W tym przypadku maksymalny błąd metody wynosi 17%.

5. Podsumowanie

Wyniki osiągnięte metodą dynamiczną są porównywalne z wynikami badań współczynnika α metodą statyczną. Maksymalna różnica względna nie przekracza 14%.

Metoda dynamiczna wymaga przygotowania odpowiedniej sondy z zachowaniem identyczności jej średnicy ze średnicą rury wymiennika ciepła, skracca jednak czas eksperymentu i pozwala na pomiary współczynnika α w dowolnej strefie złoża.

Z podanych sposobów obliczeń zaleca się stosować sposób trzeci, gdyż zależność (9) wiążąca współczynnik wnikania ciepła z właściwościami cieplnymi materiałów sondy ($a_1, a_2, \lambda_1, \lambda_2$), jej parametrami konstrukcyjnymi (R_1, R_2, ξ), polem J i przyrostem temperatury ΔT wynika z rozwiązania układu równań Fouriera (5) bez wprowadzania "grubych" założeń upraszczających. Ponadto dla tego przypadku uzyskano najlepszą zgodność wyników pomiarów z metodą statyczną.

Stwarza ona również możliwość bezpośredniego odczytu w przypadku zastosowania w układzie pomiarowym elektronicznego integratora zrealizowanego na bazie wzmacniacza operacyjnego.

LITERATURA

- [1] Kondratiew G.M.: Riegularnyj tieplovoj rieżim. Izd. Tiechnikotieoriēticheskoj literatury, Moskwa 1954.
- [2] Tran Thi Diem: Badania współczynnika wnikanie ciepła od warstwy fluidalnej do wymiennika zanurzonego w warstwie. Praca dypl. magisterska Dąbrowa Górnicza 1979, IEP.
- [3] Bałdys A.: Pomiary współczynnika wnikania ciepła w palenisku fluidalnym metodą dynamiczną. Praca dyplomowa magisterska, Dąbrowa Górnicza 1979, IEP.
- [4] Łytkow A.W.: Tieorija tieploпроводности. Izd. Wysszaja Szkoła, Moskwa 1967.
- [5] Mc Lachan N.W.: Funkcje Bessela dla inżynierów. PWN, Warszawa 1964.
- [6] Ochęduszek St.: Teoria maszyn cieplnych. T. III. PWT, Warszawa 1955.
- [7] Płaskowski A.: Eksperymentalne wyznaczanie własności dynamicznych obiektów regulacji. WNT, Warszawa 1965.
- [8] Puszer A.: Badania procesu przetwarzania dynamicznego i statycznego termometrycznych czujników rezystancyjnych. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1972.
- [9] Puszer A.: Dynamiczny błąd przetwarzania czujnika termometrycznego. Pomiary, Automatyka, Kontrola 1975, nr 3.
- [10] Tomczek J., Lorkiewicz Z., Jastrzęb Z.: Badania współczynnika wnikania ciepła do pojedynczej poziomej rury w palenisku fluidalnym. Archiwum Term. i Spalania (zgłoszone do druku).

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООБМЕНА В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Резюме

В статье рассматриваются три способа нахождения коэффициента теплообмена при использовании динамического метода измерения. Описаны также методы и представлены результаты исследований в сравнении с результатами статистического метода.

MEASUREMENT OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT
IN A FLUIDISED BED IN DYNAMIC METHOD

S u m m a r y

There are presented three ways of heat transfer coefficient calculation by means of dynamic method of measurement in this paper. Description of the method is also published in this work. The results of experiments are presented and compared with the results of the static method.