ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978

ENERGETYKA z. 67 Nr kol. 563

Stefan POSTRZEDNIK
Instytut Techniki Cieplnej

PRZEKAZYWANIE CIEPŁA W WYMIENNIKACH TYPU "BATERIA KOKSOWNICZA"

Streszczenie. W pracy podano analityczne rozwiązanie nieustalonego oraz pseudoustalonego pola temperatury w wymienniku ciepła, w którym następuje przekazywanie ciepła od spalin, poprzez ścianę ceramiczną, do usypanego w komorze wsadu. Wymiana ładunku w komorze odbywa się w sposób cykliczny. W objętości wsadu uwzględniono występowanie wewnętrznych źródeł ciepła, związanych z zachodzącymi przemianami chemicznymi wsadu.

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

a - współczynnik wyrównania temperatury,

A, B - indeks podobszaru układu, współczynniki rozwiązania,

(Bi) - liczba Biota,

(Fo) - liczba Fouriera,

H - wysokość układu,

K, L - liczby podobieństwa, funkcje rozwiązania,

m, n - indeksy sumacyjne,

q - wydajność wewnętrznych źródeł ciepła,

s - szerokość ściany,

S - zredukowana szerokość ściany, indeks dotyczący ściany,

T - temperatura bezwzględna,

w - współrzędna środka komory,

x - współrzędna liniowa układu,

α - wartości własne rozwiązania, współczynnik wnikania ciepła,

β - wartości własne rozwiązania,

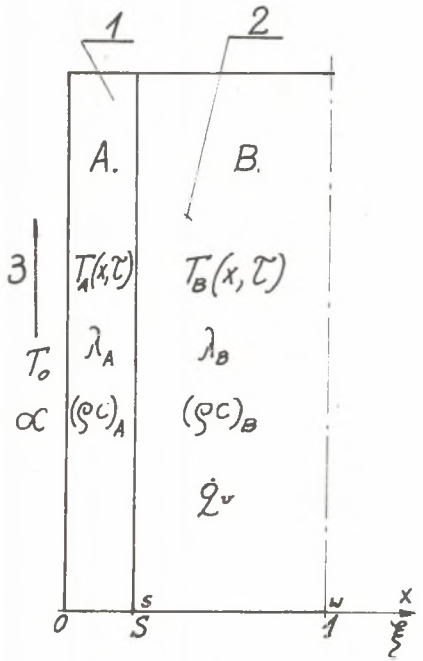
ξ - współrzędna zredukowana,

φ - funkcja jednostkowa,

θ - temperatura zredukowana.

1. Uwagi wstępne

W przypadku konieczności wysokotemperaturowego podgrzewania materiałów sypkich, kiedy czynnik grzewczy nie może bezpośrednio stykać się z materiałem podgrzewanym, zachodzi potrzeba stosowania wymienników ciepła o specjalnej konstrukcji. Jednym z możliwych rozwiązań jest bateryjny wymiennik ciepła, którego element pokazano schematycznie na rys. 1.



Rys. 1. Powtarzalny element układu 1 - ściana, 2 - wsad, 3 - czynnik grzewczy

Element układu stanowią dwie rozległe płyty (w przybliżeniu nieskończenie rozległe - z uwagi na propozycję wymiarów geometrycznych: grubość $s << h,b$ wysokości, głębokości) [1] - ściąna i wsad (podobszary A i B), ogrzewane od strony kanału spalinowego.

Przyjęto, że własności termiczne materiału ściany i wsadu są różne lecz niezmienne w czasie zachodzenia procesu ($\lambda_A \neq \lambda_B$, $a_A \neq a_B$). Przekazywanie ciepła od strony spalin do ściany odbywa się na drodze promieniowania i konwekcji, co uwzględniono przy określaniu zastępczego współczynnika wnikania ciepła α. W obszarze B występować mogą objętościowe źródła ciepła, o wydajności $\dot{q}_v$, związane z przemianami chemicznymi zachodzącymi we wsadzie [2].

Taki układ, ze względu na budowę i zasadę działania jest typowym dla baterii koksowniczej, stąd też cała teoria podana niżej może być stosowana do opisu zjawisk termicznych zachodzących w elemencie baterii koksowniczej [3], [4]. W rozwiązaniu wykorzystano następujące zredukowane (względne) zmienne i parametry:

- współrzędne geometryczne

$$\xi = \frac{x}{w}, \qquad 0 \leqslant \xi \leqslant 1 \tag{1}$$

przy czym

$0 \leqslant \xi \leqslant S$ - dotyczy obszaru ściany,

$S \leqslant \xi \leqslant 1$ - obejmuje obszar wsadu,

gdzie $S = \frac{s}{w}$.

- temperatura

$$\theta = \frac{T - T_p}{T_0 - T_p}, \quad 0 \leqslant \theta \leqslant 1 \tag{2}$$

gdzie

T_p - średnia początkowa temperatura wsadu,

T_0 - temperatura w kanale spalinowym,

- liczby i kryteria

$$(Bi) = \frac{\alpha_w}{\lambda_A}, \quad (Fo)_A = \frac{a_A \tau}{w^2}, \quad (Fo)_B = \frac{a_B \tau}{w^2} \tag{3}$$

$$K = \frac{\lambda_B}{\lambda_A}, \quad L = \sqrt{\frac{a_B}{a_A}}$$

Pełny opis procesu przepływu ciepła w układzie winien obejmować rozwiązanie pola temperatury dla przypadków:

- nieustalonego (faza rozruchowa),
- cyklicznie powtarzalnego (stan pseudoustalony),
- cyklicznego nieustalonego (zmiana długości cyklu pomiędzy dwoma stanami pseudoustalonymi).

Niżej podano rozwiązania dla dwóch pierwotnych przypadków.

2. Sformułowanie zagadnienia

Rozwiązać należy zagadnienia początkowo-brzegowe sformułowane następująco:

a) dla podobszaru A (ściana komory)

- równanie różniczkowe

$$\frac{\partial \theta_A}{(Fo)_A} = \frac{\partial^2 \theta_A}{\partial \xi^2}, \quad 0 \leqslant \xi \leqslant s \tag{4}$$

- warunek brzegowy zewnętrzny

$$\left.\frac{\partial \theta_A}{\partial \xi}\right|_{\xi=0} = -(Bi)\,(1 - \theta_A)\Big|_{\xi=0}, \quad (Fo)_A > 0 \tag{5}$$

- warunek początkowy

$$\theta_A\left[\xi, (Fo)_A\right]\Big|_{(Fo)_A=0} = \theta_S(\xi), \quad \text{dla} \quad (Fo)_A = 0, \quad 0 \leqslant \xi \leqslant s. \tag{6}$$

gdzie

$\Theta_S(\xi)$ - początkowy rozkład temperatury w ściance komory.

W przypadku, gdy rozpatruje się zjawisko przepływu ciepła w komorze jako proces periodyczny (pseudoustalony) wówczas w miejsce warunku (6) należy uwzględnić: warunek zgodności rozkładów temperatury w ścianie przy końcu jednego cyklu procesu grzania i na początku następnego

$$\Theta_S(\xi) = \Theta_A\left[\xi, (Fo)_A^*\right], \tag{7}$$

gdzie:

liczba $(Fo)_A^* = \frac{a_A \tau_k}{\omega^2}$, dotyczy końca cyklu trwającego τ_k.

a) dla podobszaru B (podgrzewany wsad)

- równanie różniczkowe

$$\frac{\partial \Theta_B}{(Fo)_B} = \frac{\partial^2 \Theta_B}{\partial \xi^2} + q, \quad S \leqslant \xi \leqslant 1 \tag{8}$$

gdzie zredukowana wydajność źródeł ciepła

$$q = \dot{q}_v \frac{w^2}{\lambda_B (T_o - T_p)} \tag{9}$$

- warunek brzegowy zewnętrzny

$$\left.\frac{\partial \Theta_B}{\partial \xi}\right|_{\xi=1} = 0 \qquad (Fo)_B > 0 \tag{10}$$

wynika z symetrii pola temperatury,

- warunek początkowy

$$\Theta_B\left[\xi, (Fo)_B\right] = \Theta_w(\xi), \ (Fo)_B = 0, \ S \leqslant \xi \leqslant 1 \tag{11}$$

jest wspólny dla procesu nieustalonego jak pseudoustalonego.

c) warunki zgodności na granicy podobszarów A i B, tzw. warunki brzegowe IV rodzaju

$$\left.\Theta_A\left[\xi, (Fo)_A\right]\right|_{\xi=S} = \left.\Theta_B\left[\xi, (Fo)_B\right]\right|_{\xi=S} \tag{12}$$

$$\left.\frac{\partial \Theta_A}{\partial \xi}\right|_{\xi=S} = K \left.\frac{\partial \Theta_B}{\partial \xi}\right|_{\xi=S} \tag{13}$$

d) związek pomiędzy liczbami Fouriera

$$(Fo)_B = L^2 (Fo)_A \tag{14}$$

wynika bezpośrednio z równań (3).

3. Metoda rozwiązania problemu

Do rozwiązania zagadnienia początkowo-brzegowego, sformułowanego w rozdziale poprzednim, zastosowano specjalną metodę analityczną polegającą na:

a) znalezieniu rozwiązań analitycznych nieustalonego pola temperatury w poszczególnych podobszarach układu (rozwiązania te mogą być określone, po wykorzystaniu zewnętrznych warunków brzegowych, z dokładnością do pewnego zespołu stałych),
b) dokonaniu "zszycia" rozwiązań dla podobszarów graniczących ze sobą (wykorzystuje się w tym celu funkcje określone w punkcie "a" oraz warunki brzegowe IV rodzaju - równania (12), (13) - na granicy podobszarów),
c) uwzględnieniu warunków początkowych cyklu dla całego obszaru (operacje te przeprowadza się z wykorzystaniem własności funkcji ortogonalnych w całym obszarze wielowarstwowym), co pozwala na określenie pozostałej grupy stałych współczynników rozwiązania.

Bardzo ważną sprawą jest właściwa konstrukcja samego zbioru funkcji rozwiązania, umożliwiająca pełną realizację etapów a, b, c.

4. Rozwiązanie pola temperatury

Postępując zgodnie z metodą omówioną w rozdziale 3 w odniesieniu do zagadnienia sformułowanego w 2 uzyskano

- dla podobszaru A

$$\theta_A\left[\xi, (Fo)_A\right] = K_0^A(\xi) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{\cos(\alpha_n \xi) + C_n \sin(\alpha_n \xi)}{\cos(\alpha_n S) + C_n \sin(\alpha_n S)} \exp\left[-\alpha_n^2 (Fo)_A\right], \tag{15}$$

gdzie

$$K_0^A(\xi) = C_1^A + C_2^A \xi, \qquad 0 \leqslant \xi \leqslant S$$

- dla podobszaru B

$$\theta_B\left[\xi,\ (Fo)_B\right] = K_0^B(\xi) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \frac{\cos\left[\beta_n(1-\xi)\right]}{\cos\left[\beta_n(1-S)\right]} \exp\left[-\beta_n^2 (Fo)_B\right], \tag{16}$$

gdzie

$$K_0^B(\xi) = C_1^B + C_2^B\,\xi + C_3^B\,\xi^2 \qquad S \leqslant \xi \leqslant 1$$

W równaniu (16) uwzględniono już częściowo warunek (10). W oparciu o (5) i (15) wyznaczono

$$C_n = \frac{(Bi)}{\alpha_n}, \qquad n = 1,2,3,\ldots \tag{17}$$

Stosując warunki (5), (8), (10), (13),(12) do funkcji $K_0^A(\xi)$ i $K_0^B(\xi)$ uzyskano

$$C_1^A = 1 + \frac{q}{(Bi)} K(1 - \frac{S}{2}), \qquad C_2^A = q\,K(1 - \frac{S}{2})$$

$$C_1^B = 1 + q(1 - \frac{S}{2})\left[\frac{K}{(Bi)} + S\,(K - 1)\right] \tag{18}$$

$$C_2^B = q, \qquad C_3^B = -\frac{q}{2}$$

Spełnienie warunków zgodności (12), (13) w stosunku do (15), (16) wymaga aby

$$\alpha_n = L\beta_n, \qquad A_n = B_n \overset{df}{=} W_n, \qquad n = 1,2,3,\ldots \tag{19}$$

przy czym wartości własne α_n wyznacza się z zależności

$$\frac{(Bi) - \alpha_n\,tg(\alpha_n S)}{\alpha_n + (Bi)\,tg(\alpha_n S)} - \frac{K}{L}\,tg\left[\alpha_n\,\frac{1-S}{L}\right] = 0 \tag{20}$$

Z powyższego równania wynika, że każda z wartości własnych α_n jest funkcją

$$\alpha_n = f_\alpha(Bi,\ K,\ L,\ S), \qquad n = 1,2,3,\ldots \tag{20a}$$

Do obliczenia wartości α_n opracowano specjalny algorytm obliczeniowy na EMC. Mając na uwadze zależności (15), (16), (19) można zapisać pełne rozwiązanie pola temperatury w formie

$$\Theta\left[\xi,(Fo)\right] = \varphi_A K_o^A(\xi) + \varphi_B K_o^B(\xi) + \sum_{n=1}^{\infty} W_n \cdot \left[\varphi_A K_n^A(\xi) + \varphi_B K_n^B(\xi)\right] \cdot F_n\left[(Fo)\right], \tag{21}$$

gdzie

$$\varphi_A = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, \quad \varphi_B = \begin{cases} 0 & 0 \leqslant \xi \leqslant S \\ 1, & \text{dla} \quad S \leqslant \xi \leqslant 1 \end{cases}$$

$$K_n^A(\xi) = \frac{\cos(\alpha_n \xi) + \frac{(Bi)}{\alpha_n}\sin(\alpha_n \xi)}{\cos(\alpha_n S) + \frac{(Bi)}{\alpha_n}\sin(\alpha_n S)} \tag{22}$$

$$K_n^B(\xi) = \frac{\cos\left[\beta_n(1-\xi)\right]}{\cos\left[\beta_n(1-S)\right]}$$

$$F_n\left[(Fo)\right] = \exp\left[-\alpha_n^2(Fo)_A\right] = \exp\left[-\beta_n^2(Fo)_B\right]$$

$$n = 1,2,3,\ldots$$

Utworzona funkcja $\left[\varphi_A K_n^A(\xi) + \varphi_B K_n^B(\xi)\right]$ jest ortogonalna w przedziale $\left[0,1\right]$. Własność ta zostanie wykorzystana przy określaniu współczynników W_n. Otrzymuje się wtedy (dla (Fo) = 0) z równania (21)

$$W_n = \frac{\int_0^1 \left\{\left[\Theta(\xi,0) - \varphi_A K_o^A(\xi) - \varphi_B K_o^B(\xi)\right]\left[\varphi_A K_n^A(\xi) + \varphi_B K_n^B(\xi)\right]\right\} d\xi}{\int_0^1 \left[\varphi_A K_n^A(\xi) + \varphi_B K_n^B(\xi)\right]^2 d\xi} \tag{23}$$

$$n = 1,2,3,\ldots$$

Korzystając z równania (23) oraz mając na uwadze warunki początkowe (6) i (11) względnie (7) i (11) wyznacza się zbiór współczynników W_n, dotyczących nieustalonego względnie pseudoustalonego pola temperatury. Do kon-

kretnych obliczeń brano oczywiście pod uwagę skończoną ilość wyrazów szeregów rozwiązania. Najlepszym kryterium co do ilości uwzględnionych wyrazów było spełnienie warunków zgodności (12), (13) na granicy podobszarów A i B.

LITERATURA

[1] Carslaw H.S., JAEGER J.C.: Conduction of Heat in Solids, Oxford U.P. 1959.

[2] Kasperczyk J.: Die Hochtemperaturverkokung als Temperatur-Zeit Reaktion, TU Berlin 1970.

[3] Szpilewicz A.: Kinetyka procesu koksowania ubitego ładunku w komorze przemysłowej, SITPH, Katowice 1965.

[4] LOISON R. i inni: Le Coke, Dunod, Paris 1970.

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ТЕПЛООБМЕННИКЕ ТИПА "КОКСОВАЯ БАТАРЕЯ"

Р е з ю м е

В работе представлено аналитическое решение нестационарного и периодического распределения температуры в теплообменнике, в котором происходит теплопередача от дымовых газов через стенку до пористого материала, выполняющего камеру. Загрузка камеры производится периодически. В объёме всада выступают внутренние источники тепла, связанные с химическими превращениями материала.

HEAT CONDUCTION IN HEAT EXCHANGERS OF THE COKE OVEN TYPE

S u m m a r y

The paper describes a non-steady temperature field in the bank of coke ovens heat exchanger. The coke chamber is filled cyclically with heated loose material. Thermal sources of chemical changes in the charge are taken into account.