

Tadeusz KRUCZEK

Instytut Techniki Ciepłej
Politechnika Śląska

WYZNACZANIE ROZKŁADÓW TEMPERATURY PRZY PRZEPLYWIE GAZU PRZEZ ZŁOŻE MATERIAŁU ZIARNISTEGO

Streszczenie. W referacie przedstawiono metodę wyznaczania rozkładów temperatury w fazie stałej i gazowej przy podgrzewaniu lub chłodzeniu materiału ziarnistego za pomocą przepływającego gazu. Zastosowano metodę ilorazu różnicowego przedniego. Wykonano przykładowe obliczenia.

A DETERMINATION OF THE TEMPERATURE FIELD AT THE FLOW OF GAS THROUGH THE GRANULAR MATERIAL BED

Summary. The paper presents a method of the temperature field determination at heating or cooling of granular material by means of the gas flowing through the bed. The forward finite difference scheme has been applied. The exemplary calculations have been carried out.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ПЕРЕПЛЫВЕ ГАЗА ЧЕРЕЗ СЛОЙ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА

Резюме. В работе представлен метод определения температурного поля при подогреванию или охлаждению зернистого материала с помощью переплывающего газа. Был использован метод переднего отношения разностей. Были сделаны вычисления.

OZNACZENIA

- a - jednostkowa powierzchnia poprzeczna elementu różnicowego, m²
- c, (Mc) - pojemność cieplna właściwa, J/(kg K), J/(kmol K)
- I - entalpia, strumień entalpii, J, W
- n - gęstość strumienia gazu, kmol/(m²s)
- Q - ilość ciepła, strumień ciepła, J, W
- T - temperatura, K

- α - konwekcyjny współczynnik wymiany ciepła, $W/(m^2K)$
 Δx - grubość elementu różnicowego, m
 ξ - powierzchnia jednostkowa materiału ziarnistego, m^2/m^3
 λ - współczynnik przewodzenia ciepła, $W/(m K)$

INDEKSY

- G - dotyczy fazy gazowej
i - dotyczy i-tego elementu
k - dotyczy konwekcji
p - dotyczy stałego ciśnienia
s - dotyczy fazy stałej
t - dotyczy t-tego kroku czasowego
 λ - dotyczy przewodzenia ciepła
* - strumień danej wielkości fizycznej

1. WSTĘP

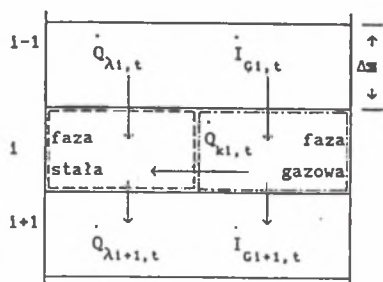
Podgrzewanie lub chłodzenie materiału ziarnistego za pomocą przepływającego przez złożę gazu jest częstym przypadkiem występującym w przemyśle. Przykładem może być chłodzenie spieku wielkopiecowego za pomocą powietrza lub podgrzewanie mieszanki spiekalniczej przed zapłonem za pomocą gorącego powietrza lub spalin [2]. Także w czasie procesu spiekania zachodzi chłodzenie górnej i podgrzewanie dolnej warstwy mieszanki poniżej strefy spalania koksiku [1]. Do modelowania tych procesów niezbędny jest opis matematyczny wymiany ciepła pomiędzy gazem i materiałem ziarnistym. W sytuacji, gdy w trakcie procesu zachodzi zmiana warunków wymiany ciepła oraz własności fizycznych ciał biorących w nim udział, stosowanie rozwiązań numerycznych takich zagadnień jest koniecznością.

2. OPIS MATEMATYCZNY WYMIANY CIEPŁA W ZŁOŻU MATERIAŁU ZIARNISTEGO

Na rysunku 1 przedstawiono fragment różnicowego podziału złoża. Dla i-tego elementu różnicowego sporządza się bilanse energii dla fazy stałej i gazowej. Ponadto wykorzystuje się równania opisujące przepływ ciepła w fazie stałej oraz pomiędzy gazem a wypełnieniem ziarnistym. Przyjęto następujące założenia:

- element różnicowy jest izotermiczny w okresie kroku czasowego Δt ,
- konwekcyjny strumień ciepła między gazem a fazą stałą wyznacza się dla temperatury gazu dopływającego do elementu różnicowego,

c) przepływ gazu i ciepła w fazie stałej jest jednowymiarowy.



Rys.1. Podział różnicowy złoża

Fig.1. Difference division of the bed

Poniżej przedstawiono wielkości występujące w bilansach energii:

$$\dot{Q}_{k i, t} = a \xi \Delta x \alpha_{k i, t} (T_{G i, t} - T_{s i, t}) \quad (1)$$

$$\dot{I}_{G j, t} = W_{G j, t} (T_{G j, t} - T_0) \quad \text{gdzie } j=1, i+1 \quad (2)$$

$$\dot{I}_{s i, j} = W_{s i, j} (T_{s i, j} - T_0) \quad \text{gdzie } j=t, t+1 \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{\lambda j, t} = (T_{s j-1, t} - T_{s j, t})/R \quad \text{gdzie } j=1, i+1 \quad (4)$$

gdzie: $W_G = n_G a (Mc)_G$; $W_s = a \Delta x \rho_s c_s$; $R = \Delta x / (a \lambda_s)$.

Bilanse energii dla fazy gazowej i stałej w i -tym elemencie mają postać:

$$\dot{I}_{G i, t} = \dot{Q}_{k i, t} + \dot{I}_{G i+1, t} \quad (5)$$

$$(\dot{Q}_{\lambda i, t} - \dot{Q}_{\lambda i+1, t} + \dot{Q}_{k i, t}) \Delta t = \dot{I}_{s i, t+1} - \dot{I}_{s i, t} \quad (6)$$

Zależność (5) umożliwia wyznaczenie temperatury $T_{G i+1, t}$ przy wylocie z i -tego elementu różnicowego, ponieważ przy zastosowaniu ilorazu różnicowego przedniego znane są temperatury fazy stałej $T_{s i, t}$:

$$T_{G i+1, t} = \chi_G (T_{G i, t} - T_0) - \phi_G (T_{G i, t} - T_{s i, t}) + T_0 \quad (7)$$

gdzie:

$$\chi_G = \dot{W}_{G i, t} / \dot{W}_{G i+1, t}; \quad \phi_G = \Delta x a \xi \alpha_{k i, t} / \dot{W}_{G i+1, t} \quad (8)$$

Temperaturę fazy stałej w kolejnym kroku czasowym $T_{s i, t+1}$ wyznacza się z zależności (6):

$$T_{s i, t+1} = \frac{(T_{s i-1, t} - 2T_{s i, t} + T_{s i+1, t}) \Delta t}{R W_{s i, t+1}} + \phi_G \Delta t (T_{G i, t} - T_{s i, t}) + \chi_G (T_{s i, t} - T_0) + T_0 \quad (9)$$

gdzie:

$$\phi_s = a \Delta x \xi \alpha_{k1,t} / W_{s1,t+1}; \quad \chi_s = W_{s1,t} / W_{s1,t+1} \quad (10)$$

3. OGRANICZENIA GĘSTOŚCI PODZIAŁU RÓŻNICOWEGO I KROKU CZASOWEGO

Przy ustalaniu gęstości podziału różnicowego warstwy oraz długości kroku czasowego musi być uwzględniona poprawność fizyczna otrzymanych równań różnicowych. Wobec założenia (a), temperatura gazu przy wylocie z i -tego elementu różnicowego w t -tym kroku czasowym musi spełniać warunek:

$$T_{G1+1,t} - T_{s1,t} > 0 \quad (11)$$

Po wykorzystaniu (7), z zależności (11) dla zadanych warunków przepływu gazu otrzymuje się warunek na maksymalną grubość elementu różnicowego. Jeśli przyjmie się uproszczenie, że $\chi_G \cong 1$, warunek ten ma prostą postać:

$$1 - \phi_G > 0 \quad (12)$$

Maksymalna grubość elementu różnicowego wynika z formuły definiującej parametr ϕ_G . W celu zachowania poprawności fizycznej opisu procesu wymiany ciepła między fazą gazową i stałą, dla przypadku podgrzewania powinien być spełniony kolejny warunek:

$$T_{G1+1,t} - T_{s1,t+1} > 0 \quad (13)$$

Warunek ten zabezpiecza przed ewentualną zmianą kierunku przepływu ciepła między gazem a fazą stałą w następnym kroku czasowym. Warunek (13) należy rozwinąć wykorzystując równania (9,10). Wynika z niego ograniczenie na długość kroku czasowego. Jeżeli przyjmie się uproszczenie $\chi_G \cong \chi_s \cong 1$ oraz jeśli $\dot{Q}_{\lambda 1,t} - \dot{Q}_{\lambda 1+1,t} \cong 0$, wówczas warunek (13) przyjmuje stosunkowo prostą postać:

$$\Delta t < (1 - \phi_G) / \phi_s \quad (14)$$

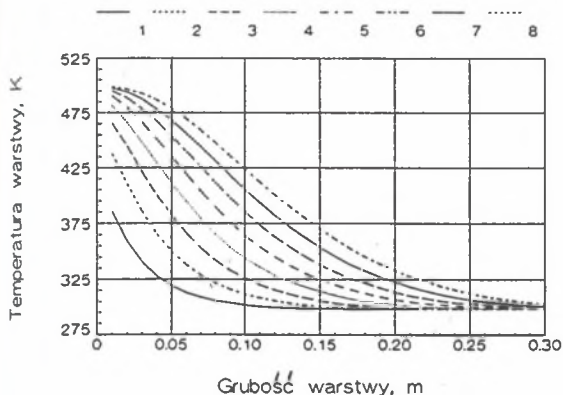
z której w przybliżeniu można wyznaczyć maksymalną długość kroku czasowego dla przyjętego podziału różnicowego warstwy. Dalsze ograniczenie wynika z warunku zachowania takiej struktury równań różnicowych, aby podwyższenie każdej ze znanych temperatur $T_{s,j,t}$ prowadziło do podwyższenia obliczanych wartości temperatur $T_{s1,t+1}$ [3]. Warunek ten jest spełniony, gdy suma współczynników w równaniu (9) stojących przed każdą z temperatur $T_{s,j,t}$ jest większa od zera. Prowadzi to do następującego ograniczenia kroku czasowego:

$$\Delta t < \frac{\chi_s}{\vartheta + \frac{2}{R W_{s1,t+1}}} \quad (15)$$

Powyższe ograniczenie dotyczy elementu różnicowego środkowego. W analogiczny sposób można sformułować to ograniczenie dla elementu brzegowego po określeniu rodzaju warunku brzegowego.

4. WYNIKI OBLICZEŃ

Wykorzystując przedstawiony algorytm przeprowadzono obliczenia dla przypadku podgrzewania mieszanki spiekalniczej na taśmie przed zapłonem za pomocą gorącego powietrza. Obliczenia przeprowadzono dla danych: temperatura początkowa powietrza oraz mieszanki 500K i 298K, grubość warstwy mieszanki 0,3 m, gęstość strumienia powietrza 0,0186 kmol/(s m²). Wyniki dotyczące rozkładu temperatury w fazie stałej przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Rozkład temperatury w złożu dla podanych czasów nagrzewania

Fig.2. Temperature distribution in the bed for mentioned periods of heating
 1- 40s; 2- 80s; 3-120s;
 4-160s; 5-200s; 6-240s;
 7-280s; 8-320s

5. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

- Wyniki przeprowadzonych obliczeń potwierdzają przydatność opracowanej metody wyznaczania nieustalonych pól temperatury w materiale ziarnistym.
- Ograniczenia kroku czasowego i gęstości podziału różnicowego wyrażone zależnościami (12,14,15) obowiązują w podanej postaci zarówno dla podgrzewania, jak i chłodzenia materiału ziarnistego.

- c) Ograniczenie (15) dla przypadku bez przewodzenia ciepła w fazie stałej ($R \rightarrow \infty$) w mniejszym stopniu ogranicza krok czasowy niż warunek (14).

LITERATURA

- [1] Kruczek T.: Efekty zastosowania w procesie aglomeracji rud żelaza gorących rozrzedzonych spalin. Mat.Konf. INTERENERGOMET 91, Ustroń 1991, s.37-46.
- [2] Kruczek T.: An analysis of the energy efficiency in different methods of hot waste air utilization in a sintering plant. Archives of Metallurgy, nr 3, 1992.
- [3] Szargut J., (red.): Modelowanie numeryczne pól temperatury. Wyd. I. WNT, Warszawa 1992.

Recenzent: Prof. Jerzy Stanisław Gdula

Wpłynęło do redakcji dnia 12.11.1992

Abstract

The heating or cooling of granular material by means of gas often occurs in the chemical and metallurgical industry. The preheating of sinter mix on a sinter strand before ignition, sintering process or the cooling of the sinter after agglomeration can be considered as the example of this phenomenon [1,2]. The paper describes an algorithm for the calculation of the gas- and solid-temperature fields while the gas flows through the granular material bed. For this algorithm the forward finite difference scheme has been applied. The bed of the granular material is divided into difference elements, Fig.1. At the beginning of this process the temperature distribution in the granular material must be known. It has been assumed that during the current step time the difference elements are isothermal. The temperature of the gas leaving the element is calculated according to the energy balance for gas-phase, Eq. (7). The calculation of the solid-phase temperature for the next time step is based on an energy balance for solid-phase inside the element, Eq. (9). The algorithm contains a few limitations. These limitations are expressed by equations (11,13,15) and both concern the thickness of the difference element and size of the time step. On the basis of this algorithm exemplary calculations have been carried out. Some of the obtained results are shown in Fig.2.