

Valery PASS

MODEL MATEMATYCZNY STREFY CHŁODZENIA W PIECU SZYBOWYM
DO WYPALANIA WAPNA

Streszczenie. W pracy podano równania różniczkowe opisujące dynamiczny proces cieplny zachodzący w dolnej części wapienniczego pieca szybowego - tzw. strefie chłodzenia.

1. Wstęp

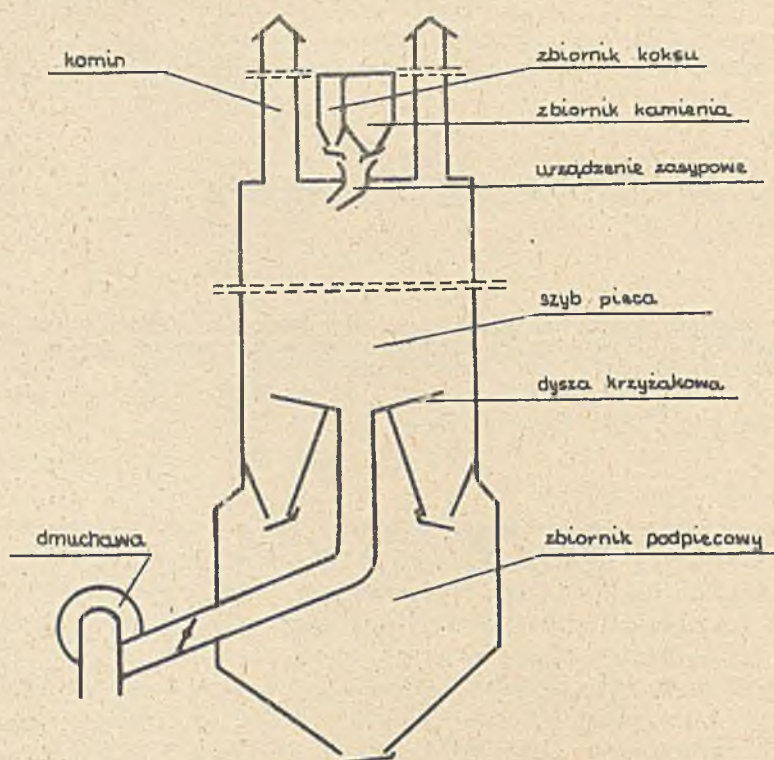
Niniejszy artykuł jest pierwszym z cyklu trzech, w których przedstawiono model matematyczny trzech stref w piecu szybowym.

Rozkład węglanu wapnia CaCO_3 , zawartego w kamieniu wapiennym, na tlenek wapnia CaO (wapno palone) i dwutlenek węgla CO_2 jest reakcją endotermiczną. Dla rozkładu jednego kilomola CaCO_3 (100 kg) należy dostarczyć 177820 kJ ciepła [2], [6]. Energię cieplną uzyskuje się ze spalania koksu.

W piecach szybowych np. typu 100 A, 100 B, 100 C (rys. 1), koks i kamień równomiernie zmieszane (wsad) zasypuje się ze wspólnego zbiornika nadpiecowego lub oddzielnych zbiorników koksu i kamienia do szybu pieca. Równocześnie potrzebne do spalania powietrze wtłaczane jest od dołu pieca poprzez dyszę krzażakową zapewniającą możliwie równomierny w przekroju rozływ [7].

Spalanie koksu odbywa się w środkowej części pieca - strefie wypalania. Poniżej niej, w strefie chłodzenia nie zachodzą już reakcje chemiczne, odbywa się tam proces chłodzenia wypalonego wapna doprowadzanym od dołu powietrzem. Powyżej strefy wypalania znajduje się strefa podgrzewania. Wsad znajdujący się w tej strefie ogrzewany jest gorącymi gazami spalinowymi - następuje odparowanie wilgoci [2], [6]. Odbiór wypalonego wapna (tzw. "uciąg") odbywa się cyklicznie, wapno z dolnej części pieca zsypywane jest do zbiornika podpiecowego. Poziom wsadu w piecu jest ruchomy (na skutek "uciągu" i osiadania w trakcie spalania koksu) i waha się między dwoma poziomami "max" i "min". Zасыp nowej porcji rozpoczyna się po opadnięciu wsadu do poziomu "min", a kończy po osiągnięciu poziomu "max" [7].

Ze względu na fakt, że procesy zachodzące w poszczególnych strefach są jakościowo różne, konieczne jest rozbięcie modelu matematycznego na trzy segmenty. Tematem niniejszego artykułu jest opis zjawisk w strefie chłodzenia.



Rys. 1. Wapienniczy piec szczybowy typu 100 C

Procesy termiczne zachodzące w strefie chłodzenia są skomplikowane. Z tego względu, budując model matematyczny z wykorzystaniem praw termodynamiki, konieczne jest przyjęcie następujących założeń upraszczających:

- 1) granulacja wapna palonego jest jednakowa w każdym przekroju strefy chłodzenia,
- 2) wapno w przedsiale osadu między "uciągami" jest nieruchome,
- 3) strata ciepła przez wymurówkę jest pomijalna,
- 4) parametry strefy chłodzenia są skupione w przekroju, a rozłożone wzdłuż osi pieca,
- 5) umowną górną granicą strefy chłodzenia jest płaszczyzna izotermii $t_w = 800^\circ\text{C}$,
- 6) rozpliw powietrza jest równomierny, a stany nieustalone strugi powietrza trwają pomijalnie krótko,
- 7) powietrze jest suche,
- 8) zmiany ciśnienia powietrza wzdłuż osi pieca są pomijalnie małe,
- 9) przepływ powietrza jest turbulentny,
- 10) wymiana ciepła między fazą stałą, a gazową odbywa się na drodze konwekcji.

Równania modelu matematycznego wyprowadzono dla następujących oznaczeń:

$\dot{m}_p \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ - strumień masy powietrza,

$m_{\text{CaO}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right]$ - masa wapna w szybie pieca na jednostkę wysokości,

$c_{\text{CaO}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$ - pojemność cieplna właściwa wapna,

$c_p \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$ - ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu,

T_w [K] - temperatura bezwzględna wapna,

T_p [K] - temperatura bezwzględna powietrza,

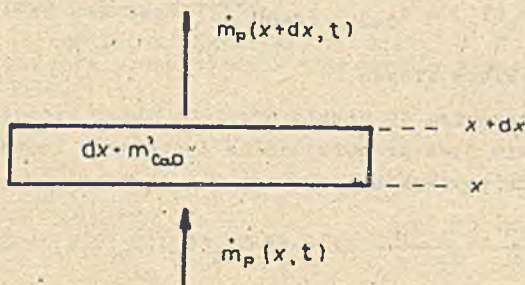
$\alpha_{\text{wp}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s m}^2 \text{K}} \right]$ - powierzchniowy współczynnik wnikania ciepła z wapna do powietrza,

$\lambda \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s m K}} \right]$ - zastępczy współczynnik wnikania ciepła,

F [m^2] - powierzchnia wymiany ciepła.

2. Opis matematyczny

Model matematyczny strefy chłodzenia jest stosunkowo prosty, gdyż nie zachodzą w niej reakcje chemiczne. Przyjęto początek układu współrzędnych na dole szybu (jest nieruchomy) i podzielono szyb na równoległe warstwy o wysokości dx .



Rys. 2. Elementarna warstwa wapna w szybie pieca

2.1. Bilans masy

Z założenia 1 i 2 oraz z faktu, że nie zachodzą reakcje chemiczne wynika, że masa wapna w każdej warstwie jest stała. Natomiast z założenia 6 wynika, że strumień masy powietrza w każdej chwili czasu jest stały na całej wysokości strefy chłodzenia.

Równania bilansu masy są następujące:

$$\dot{m}'_{CaO}(x,t)dx = \dot{m}'_{CaO}(x+dx,t)dx = \dot{m}'_{CaO}dx \quad (1)$$

$$\dot{m}_p(x,t) = \dot{m}_p(x+dx,t) = \dot{m}_p(t) \quad (2)$$

2.2. Bilans energii

Wprowadzając oznaczenie:

$E_{CaO}(x,t)$, $E_p(x,t)$ - energia wewnętrzna wapna i powietrza w elementarnej warstwie,

$i_p(x,t)$ - entalpia strumienia powietrza

równanie bilansu energii [1,3,4] przyjmuje postać:

$$\frac{\partial E_{CaO}(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial E_p(x,t)}{\partial t} = i_p(x,t) - i_p(x+dx,t) = - \frac{\partial i_p(x,t)}{\partial x} dx \quad (3)$$

Ponieważ pojemność cieplna powietrza w stosunku do pojemności cieplnej wapna jest bardzo mała (rzędu 10^{-4}), można odrzucić drugi składnik lewej strony równania (3).

Podstawiając odpowiednie wartości do wzoru otrzymamy:

$$dx \dot{m}'_{CaO} \frac{\partial [c_{CaO}(T_w) T_w]}{\partial t} = -\dot{m}_p(t) \frac{\partial [c_p(T_p) T_p]}{\partial x} dx$$

Ostatecznie:

$$\dot{m}'_{CaO} \frac{\partial [c_{CaO}(T_w) T_w]}{\partial t} = -\dot{m}_p(t) \frac{\partial [c_p(T_p) T_p]}{\partial x} \quad (4)$$

$$c_p = c_p(T_p) \text{ a } c_{CaO} = c_{CaO}(T_w) \quad \text{według tablic [5].}$$

2.3. Równanie wymiany ciepła

Zgodnie z założeniem 10 ciepło przyjęte przez strumień powietrza w elementarnej warstwie jest proporcjonalne do różnicy temperatury fazy stałej i gazowej oraz do powierzchni wymiany ciepła w tej warstwie:

$$\dot{m}_p(t) \frac{\partial [c_p(T_p) T_p]}{\partial x} dx = dF \alpha_{wp}(T_p) [T_w(x,t) - T_p(x,t)].$$

Ponieważ z założenia 1 mamy $\frac{dF}{dx} = \text{const}$, wobec tego podstawiając $A = \frac{dF}{dx} \alpha_{wp}$ otrzymuje się:

$$\dot{m}_p(t) \frac{\partial [c_p(T_p) T_p]}{\partial x} = A(T_p) [T_w(x,t) - T_p(x,t)] \quad (5)$$

$A = A(T_p)$ z założenia 9 i [3], [4].

2.4. Warunki początkowe i brzegowe

Aby układ różniczkowych równań cząstkowych (4), (5) był jednoznacznie rozwiązalny, konieczna jest znajomość warunku początkowego $T_w(x,0)$ i brzegowego $T_p(0,t)$.

$$T_w(x,0) = \varphi(x) \quad (6)$$

$$T_p(0,t) = T_{ot}(t) \quad (7)$$

4. Zakończenie

Modelem matematycznym strefy chłodzenia jest układ równań (4) i (5) wraz z warunkami początkowym i brzegowym (6) i (7). Współczynniki tych równań $c_{CaO}(T_w)$, $c_p(T_p)$, $A(T_p)$ można znaleźć w literaturze [1], [3], [4], [5]. Model powyższy obowiązuje w dolnej części pieca do przekroju izotermy $T_w = 1073,15$ [K] i w przedziale czasu między "uciągami".

LITERATURA

- [1] OCHĘDUSZKO S.: Termodynamika stosowana. WNT, Warszawa 1970.
- [2] БРУСИЛОВСКИЙ Г.В.: Производство извести. ГОСХИМИЗДАТ Москва 1954.
- [3] HOBLER T.: Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa 1971.
- [4] BRETSZNAJDER ST.: Własności gazów i cieczy. WNT, Warszawa 1962.
- [5] RAZNJEVIC K.: Tablice cieplne z wykresami. WNT, Warszawa 1966.
- [6] AHRENDTS I., BOROWSKI J., CIEŚLIŃSKI W., PAWLAK W.: Technologia materiałów wiążących. PWSZ, Warszawa 1959.
- [7] M. JASTRZĘBSKA, A. GUZIK, K. LATAWIEC, M. CHYRA, W. PASS, B. ADAMEK: Automatyzacja procesów produkcyjnych w przemyśle wapienniczym. Praca naukowo-badawcza 1976.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ ОХЛАЖДЕНИЯ
В ШАХТНОЙ ИЗВЕШКООБЖИГАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Резюме

В статье представлены дифференциальные уравнения, описывающие динамический тепловой процесс, происходящий в нижней части шахтной известкообжигательной печи — так называемой зоне охлаждения.

MATHEMATICAL MODEL OF COOLING ZONE OF THE LIME SHAFT KILN

Summary

In the paper the differential equations have been used to describe the dynamics of a thermal process occurring in the bottom part of a lime shaft kiln, in the so called cooling zone.