

Walery PASS

MODEL MATEMATYCZNY STREFY PODGRZEWANIA W PIECU SZYBOWYM
DO WYPALANIA WAPNA

Streszczenie. W pracy podano równania różniczkowe opisujące dynamikę procesu cieplnego zachodzącego w górnej części wapienniczego pieca szybowego - tzw. strefie podgrzewania.

1. Wstęp

Niniejszy artykuł jest ostatnim z cyklu trzech opisujących dynamiczne procesy cieplne w poszczególnych strefach wapienniczego pieca szybowego [5], [6].

W strefie podgrzewania znajduje się wilgotny wsad (mieszanina koksu i kamienia wapiennego), ogrzewany gorącymi gazami spalinowymi uchodzącymi ze znajdującej się poniżej strefy wypalania. Następuje odparowanie wilgoci [1].

Ponieważ procesy cieplne zachodzące w strefie podgrzewania są skomplikowane, dla modelu tej strefy zostały przyjęte następujące założenia upraszczające:

- 1) parametry strefy podgrzewania są skupione w przekroju, a rozłożone wzdłuż osi pieca
- 2) granulacja wsadu jest stała,
- 3) wsad na całej długości strefy podgrzewania ma tę samą prędkość ruchu,
- 4) górna granica strefy podgrzewania waha się między poziomami "max" (po zasypie) i "min", dolną jest poziom izotermny 800°C,
- 5) strata ciepła przez wymurówkę jest pomijalna,
- 6) odparowanie wilgoci poniżej temperatury wrzenia jest znikome,
- 7) rozptyw gazów jest równomierny w całym przekroju, a stany nieustalone strumienia gazów trwają pomijalnie krótko,
- 8) gazy są półdoskonałe,
- 9) zmiany ciśnienia gazów wzdłuż osi pieca są pomijalnie małe,
- 10) przepływ gazów jest burzliwy,
- 11) wymiana ciepła między gazami a wsadem odbywa się na drodze konwekcji.

Równania modelu matematycznego wyprowadzono dla następujących oznaczeń:

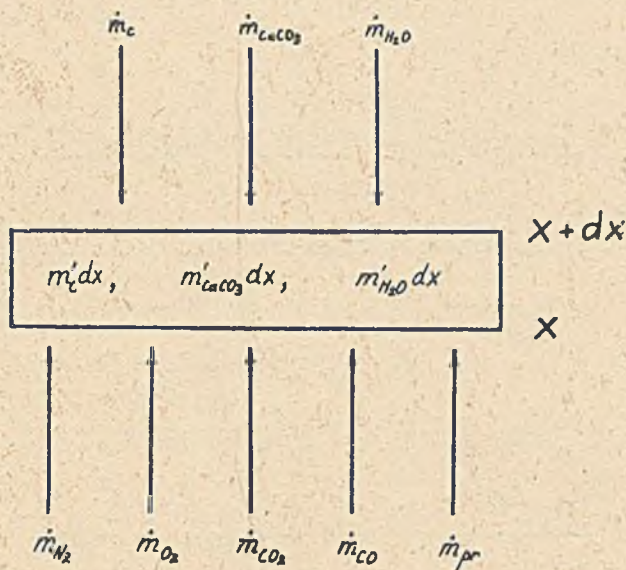
\dot{m}_2 [$\frac{kg}{s}$] - strumień masy azotu

\dot{m}_2 ["] - strumień masy tlenu

- \dot{m}_{CO_2} ["] - strumień masy dwutlenku węgla
 \dot{m}_{CO} ["] - " " - tlenku węgla
 \dot{m}_{pr} ["] - " " - pary wodnej
 \dot{m}_{H_2O} ["] - " " - wilgoci
 \dot{m}_C ["] - " " - koksu
 \dot{m}_{CaCO_3} [$\frac{kg}{s}$] - " " - kamienia wapiennego
 m'_C [$\frac{kg}{m}$] - masa koksu na jednostkę wysokości szybu
 m'_{CaCO_3} [$\frac{kg}{m}$] - " kamienia wapiennego na jednostkę wysokości szybu
 m'_{H_2O} ["] - " wilgoci na jednostkę wysokości szybu
 $\Delta \dot{m}_{H_2O}$ [$\frac{kg}{m \cdot s}$] - szybkość parowania na jednostkę wysokości szybu
 c_{N_2} [$\frac{kJ}{kg \cdot K}$] - pojemność cieplna właściwa (ciepło właściwe) azotu
 c_{O_2} ["] - " " - " właściwa tlenu
 c_{CO_2} ["] - " " - " właściwa dwutlenku węgla
 c_{CO} ["] - " " - " właściwa tlenku węgla
 c_{pr} ["] - " " - " właściwa pary wodnej
 c_{H_2O} ["] - " " - " właściwa wody
 c_C ["] - " " - " właściwa koksu
 c_{CaCO_3} ["] - " " - " właściwa kamienia wapiennego
 T_p [K] - temperatura bezwzględna gazów
 T_w [K] - " " " wsadu
 w_p [$\frac{kJ}{kg}$] - entalpia (ciepło) parowania wody
 w [$\frac{m}{s}$] - prędkość ruchu wsadu
 λ [$\frac{kJ}{s \cdot m \cdot K}$] - zastępczy współczynnik wnikania ciepła
 x_2, x_3 [m] - dolna i górna granica strefy podgrzewania

2. Opis matematyczny

Model matematyczny strefy podgrzewania nieznacznie różni się od modelu strefy chłodzenia [5]. Różnica polega na odwróceniu kierunku przepływu ciepła (w strefie chłodzenia od wsadu do powietrza; w strefie podgrzewania od gazów do wsadu) i uwzględnieniu procesu suszenia. Analogicznie jak w modelach niższych stref rozpatrujemy bilanse masy i energii w elementarnej warstwie o wysokości dx [2].



Rys. 1. Elementarna warstwa wsadu w strefie podgrzewania

2.1. Bilans masy

a) Bilans dla gazów.

Z założenia 7 wynikają następujące równania:

$$\dot{m}_{N_2}(x, t) = \dot{m}_{N_2}(0, t) = \dot{m}_{N_2}(t) \quad (1)$$

$$\dot{m}_{O_2}(x, t) = \dot{m}_{O_2}(x_2, t) \quad (2)$$

$$\dot{m}_{CO_2}(x, t) = \dot{m}_{CO_2}(x_2, t) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{CO}(x, t) = \dot{m}_{CO}(x_2, t) \quad (4)$$

$$\dot{m}_{pr}(x + dx, t) = \dot{m}_{pr}(x, t) + \Delta \dot{m}_{H_2O}(x, t) dx$$

stąd wynika:

$$\frac{\partial \dot{m}_{pr}(x, t)}{\partial x} = \Delta \dot{m}_{H_2O}(x, t) \quad (5)$$

b) Bilans dla wsadu.

Z założenia 2 wynika, że rozkład mas koksu i kamienia wapiennego wzdłuż osi jest jednostajny:

$$\dot{m}'_C = \text{const} \quad (6)$$

$$\dot{m}'_{CaCO_3} = \text{const} \quad (7)$$

Natomiast z założenia 3 wynika:

$$w(x, t) = w(x_2, t) \quad (8)$$

Zatem strumienie masy wsadu można wyrazić następująco:

$$\dot{m}'_C = \dot{m}'_C w(x_2, t) \quad (9)$$

$$\dot{m}'_{CaCO_3} = \dot{m}'_{CaCO_3} w(x_2, t) \quad (10)$$

$$\dot{m}'_{H_2O}(x, t) = \dot{m}'_{H_2O}(x_2, t) w(x_2, t) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} dx \dot{m}'_{H_2O}(x, t + dt) &= dx \dot{m}'_{H_2O}(x, t) + \dot{m}'_{H_2O}(x + dx, t) dt - \\ &- \dot{m}'_{H_2O}(x, t) dt - \Delta \dot{m}'_{H_2O}(x, t) dx dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{m}'_{H_2O}(x, t)}{\partial t} dx dt &= \frac{\partial \dot{m}'_{H_2O}(x, t)}{\partial x} dx dt - \\ &- \Delta \dot{m}'_{H_2O}(x, t) dx dt \end{aligned}$$

Ostatecznie:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{m}'_{H_2O}(x, t)}{\partial t} &= \frac{\partial \dot{m}'_{H_2O}(x, t) w(x_2, t)}{\partial x} - \\ &- \Delta \dot{m}'_{H_2O}(x, t) \end{aligned} \quad (12)$$

Ponieważ zgodnie z założeniem 6 pomijamy parowanie dla temperatur wsadu niższych od 100°C, szybkość parowania można określić następująco:

$$\Delta \dot{m}'_{H_2O}(x, t) = \begin{cases} 0 & T_w < 373,15 \text{ K} \\ \frac{A [T_p(x, t) - T_w(x, t)]}{w_p}; & T_w = 373,15^\circ \text{K} \wedge \dot{m}'_{H_2O}(x, t) \neq 0 \\ 0 & \dot{m}'_{H_2O}(x, t) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

gdzie:

$A [T_p(x, t) - T_w(x, t)]$ - jest strumieniem ciepła na jednostkę wysokości szybu oddawanego do wsadu przez gazy spalinowe.

2.2. Bilans energii

a) Bilans dla gazów

$$\frac{\partial \{ \dot{m}_{N_2}(t) c_{N_2}(T_p) + \dot{m}_{O_2}(x_2, t) c_{O_2}(T_p) + \dot{m}_{CO_2}(x_2, t) c_{CO_2}(T_p) + \dot{m}_{CO}(x_2, t) c_{CO}(T_p) + \dot{m}_{pr}(x, t) c_{pr}(T_p) \} T_p(x, t)}{\partial x} = -A [T_p(x, t) - T_w(x, t)] + \Delta \dot{m}_{H_2O}(x, t) c_{pr}(T_w) T_w(x, t) \quad (14)$$

b) Bilans dla wsadu.

$$\frac{\partial \{ [\dot{m}'_C c_C(T_w) + \dot{m}'_{CaCO_3} c_{CaCO_3}(T_w) + \dot{m}'_{H_2O}(x, t) c_{H_2O}(T_w)] T_w(x, t) \}}{\partial t} = \frac{\partial \{ [\dot{m}_C c_C(T_w) + \dot{m}_{CaCO_3} c_{CaCO_3}(T_w) + \dot{m}_{H_2O}(x, t) c_{H_2O}(T_w)] T_w(x, t) \}}{\partial x} + A [T_p(x, t) - T_w(x, t)] - \Delta \dot{m}_{H_2O}(x, t) w_p \quad (15)$$

3. Warunki początkowe i brzegowe.

Aby równania modelu matematycznego przedstawione powyżej miały jednoznaczne rozwiązanie, znane być muszą następujące warunki początkowe i brzegowe:

$$T_w(x, 0) = \psi(x) \quad (16)$$

$$T_p(x_2, t) \quad (17)$$

$$\dot{m}'_{H_2O}(x, 0) = \dot{m}'(x) \quad (18)$$

3. Zakończenie

Modelem matematycznym strefy podgrzewania jest zespół równań (1) ÷ (15) oraz z warunkami początkowym i brzegowymi (16) ÷ (18). Model obowiązuje w przedziale czasu między "uciągami" wapna.

Współczynnik A jest funkcją temperatury [3, 4] podobnie jak ciepła właściwe substancji uwzględnionych w modelach.

LITERATURA

- [1] БРУСИЛОВСКИЙ Г.В.: Производство известк. Госхиздат Москва 1954.
 [2] OSIEDUSZKO S.: Termodynamika stosowana. WNT, Warszawa 1970.

- [3] HOBLER T.: Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa 1971.
- [4] BRETSZNAJDER ST.: Własności cieczy i gazów. WNT, Warszawa 1962.
- [5] PASS W.: Model matematyczny strefy ochłodzenia w piecu szybowym do wypalania wapna. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka nr 50.
- [6] PASS W.: Model matematyczny strefy rozkładu w piecu szybowym do wypalania wapna. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka nr 50.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ ПОДОГРЕВА
В ШАХТНОЙ ИЗВЕСТКООБЖИГАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Р е з ю м е

В статье представлены дифференциальные уравнения, описывающие динамику теплового процесса, происходящего в верхней части шахтной известкообжигательной печи, так называемой зоне подогрева.

MATHEMATICAL MODEL OF HEATING ZONE IN THE LIME SHAFT KILN

S u m m a r y

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