www.ptcer.pl/mccm

MATERIAŁY CERAMICZNE /CERAMIC MATERIALS/, 68, 3, (2016), 213-217

Różne podejścia do wymiany ciepła w kalcynowanej warstwie ziarnistego wsadu wapienia – Część I: Uproszczony model wymiany ciepła

Ryszard Lech[1], Przemysław Szostak[2], Henryk Szeląg[2]

[1]AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
[2]Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych, ul. Cementowa 8, 31-983 Kraków
*e-mail: lech@agh.edu.pl

Streszczenie

Transport ciepła do powierzchni kalcynowanego ziarna wsadu od przepływającej mieszaniny gazów i otaczających go ziaren (powierzchni stałych) zachodzi na drodze promieniowania, konwekcji i przewodzenia. Na ogół przyjmuje się, że zasadnicza cześć strumienia ciepła wnika do wsadu na drodze promieniowania. W niniejszej, pierwszej części artykułu pokazano uproszczony model matematyczny przyjęty do obliczenia strumienia ciepła wnikającego do ziarna podczas kalcynacji w warstwie oraz sformułowano założenie o konfiguracji ułożenia kalcynowanych ziaren w niewielkiej objętości warstwy. W drugiej części artykułu pokazane zostaną wyniki liczbowe eksperymentu, wykonanego w celu wyznaczenia emisyjności powierzchni ziaren wybranych wapieni i wapna z nich wyprodukowanego, oraz wyniki obliczeń innych współczynników modelu.
Słowa kluczowe: dysocjacja termiczna, wapień, wymiana ciepła

DIFFERENT APPROACHES TO HEAT TRANSFER IN CALCINED BED OF PARTICLE LIMESTONE BATCH – PART I: SIMPLIFIED MODEL OF HEAT TRANSMISSION

Heat transport to a calcined limestone particle surface from a flowing gaseous mixture and surfaces of the other particles surrounding the particle occurs by radiation, convection and conduction. On the whole it is assumed that a basic part of heat transport to a limestone batch occurs by radiation. A simplified model of heat transfer is shown in this paper. The model is used to the rough calculation of the heat flux transported to the particle during calcination within a layer, and an assumption is formulated applying to the packing of particles in a small volume of particle layer. The calculation results of experiments carried out for determination of calcined particles emissivity for chosen limestones and produced limes will be shown in the second part of the paper together with the calculation results of other model coefficients.
Keywords: Thermal decomposition, Limestone, Heat transfer

1. Wstęp

Modele opisujące wymianę ciepła podczas kalcynacji wsadu wapieni już od dłuższego czasu są przedmiotem badań. Prace w tym zakresie prowadzone są w dwóch uzupełniających się kierunkach: modelowania matematycznego dysocjacji termicznej ziarna lub bryły oraz modelowania matematycznego kalcynacji wsadu podczas produkcji wapna. Ostatnio rozpoczęte zostały prace badawcze w zakresie kontrakcji objętości kalcynowanego, ziarnistego wsadu wapienia, umieszczonego w naczyniu cylindrycznym.

Przegląd modeli opisujących dysocjację termiczną ziarna wapienia znaleźć można w pracach [1-3]. Prace [4-11] opisują dysocjację termiczną ziarnistego wsadu wapienia z uwzględnieniem zagadnień wymiany ciepła, masy i kinetyki chemicznej. Kontrakcja objętości warstwy ziarnistego wsadu wapienia jest omawiana w pracy [12] na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Upakowanie warstwy ziarnistego wsadu wapienia ma wpływ na wielkość kontrakcji, co było przedmiotem badań opisanych w pracy [13]. Również skurcz ziaren na skutek uwalniania ditlenku węgla podczas kalcynacji lub wzrost ich objętości wynikający z pękania i odkształceń ziarna wapienia podczas kalcynacji [1, 12] przyczyniają się do różnej wielkości kontrakcji dla różnych wapieni.

2. Wymiana ciepła, masy i pędu w kalcynowanej warstwie ziaren wapienia

Rozpatrując kalcynację warstwy ziarnistego wsadu wapienia należy rozpatrzyć zagadnienia wymiany ciepła, masy, pędu i kinetykę zachodzącej reakcji dysocjacji termicznej wapienia. Wymiana ciepła, masy i kinetyka stanowią grupę wzajemnie

przenikających się problemów. Wymiana pędu podczas kalcynacji warstwy stanowi odrębne zagadnienie, gdyż warstwę można rozpatrywać jako przemieszczającą się w szybie pieca lub nieruchomą, kalcynowaną w komorze pieca. Zagadnienie ruchu kalcynowanej warstwy wapienia jeszcze bardziej komplikuje się, jeśli wziąć pod uwagę zmianę porowatości warstwy wsadu wapienia - powodowaną siłami tarcia, występującymi podczas ruchu wsadu w szybie pieca na skutek uciągu wapna - i objętościowy skurcz warstwy na skutek uwalniania ditlenku węgla. Dodatkowo trzeba uwzględnić odkształcenia ziaren czy brył wapienia podczas kalcynacji powodowane różnym składem fazowym wapieni i naprężeniami termicznymi. Nawet podczas kalcynacji warstwy ziarnistego wsadu wapienia, umieszczonej w piecu komorowym, występuje ruch wsadu powodowany skurczem kalcynowanych ziaren, na skutek uwalniania ditlenku węgla, i odkształceniami.

W modelowaniu kalcynacji wsadu wapienia w szybie pieca do produkcji wapna palonego na ogół wszystkie powyższe zagadnienia bierze się pod uwagę w układzie równań opisujących dysocjację termiczną warstwy. W przypadku uproszczonego podejścia do kalcynacji warstwy wapienia, polegającego na pominięciu wpływu ruchu warstwy na jej dysocjację termiczną, zasadnicze parametry procesu dysocjacji termicznej wiążą się przede wszystkim z warunkami cieplnymi procesu i jego kinetyką. Koncentrując się na wpływie cieplnych warunków kalcynacji wsadu wapienia na przebieg jego dysocjacji termicznej wyróżnić można następujące czynniki związane z mechanizmami transportu ciepła:

– promieniowanie: temperatura ziaren i temperatura gazu, emisyjność (refleksyjność, absorpcyjność) powierzchni wapienia i wapna, porowatość warstwy (uziarnienie, kształt ziaren), skład gazu i ciśnienie gazu;

– konwekcja: temperatura gazu, skład gazu, ciśnienie gazu, szybkość przepływu, wielkość ziaren (brył) i porowatość warstwy;

– przewodzenie: właściwości (rodzaj) wapienia i wielkość ziaren (brył).

Powyższe czynniki są w znacznej liczbie ujęte w uproszczonym modelu matematycznym nagrzewania wsadu w piecu komorowym [14], dlatego model ten zostanie dalej zastosowany w analizie dysocjacji termicznej ziarnistej warstwy wsadu wapienia umieszczonej na trzonie pieca komorowego.

Na Rys. 1 przedstawiono uproszczony schemat wymiany ciepła, zachodzącej w kalcynowanej warstwie ziaren wapienia. Do kalcynowanego ziarna wapienia o temperaturze powierzchni T_1 wpływa strumień ciepła Q_1 transportowany na drodze promieniowania od ścian innych ziaren wapienia, promieniowania od „bryły gazowej", otaczającej kalcynowane ziarno, i konwekcji wywołanej przepływem mieszaniny gazów od dołu do góry kalcynowanej warstwy wsadu.

Do wstępnego opisu wymiany ciepła pomiędzy kalcynowanym ziarnem wapienia w warstwie umieszczonej w naczyniu cylindrycznym i jego otoczeniem można zastosować uproszczony model wymiany ciepła pomiędzy wsadem a komorą pieca wypełnioną gazem emitująco-absorbującym [14], co jest pokazane na Rys. 2. Dodatkowo w tym podejściu pomija się wpływ zapylenia strugi gazu na omawianą wymianę ciepła [8]. Uwzględniając w wymianie ciepła w komorze pieca mechanizm radiacyjnego i konwekcyjnego wnikania ciepła do wsadu i ścian komory, strumień ciepła wnikający do wsadu zapisać można równaniem [14]:

$$\overset{o}{Q}_1 = \frac{F_1}{M}\left\{e_g\varepsilon_1\left(1+R_2P_{g2}\varphi_{2-1}\right)+e_2\varepsilon_1P_{g2} - \right.$$
$$\left. - e_1\left[1-R_2P_{g2}\left(\varphi_{2-2}+P_{g1}\varphi_{2-1}\right)\right]\right\}+F_1\alpha_1\left(T_g-T_1\right), \qquad (1)$$

gdzie: F_1 jest powierzchnią kalcynowanego ziarna wapienia, e_g powierzchniową gęstością emisji własnej „bryły gazowej" na powierzchnię kalcynowanego ziarna, ε_1 współczynnikiem emisyjności kalcynowanego ziarna, R_2 refleksyjnością powierzchni innych ziaren, otaczających kalcynowane ziarno, P_{gi} przezroczystością „bryły gazowej" na drodze do powierzchni, α_1 konwekcyjnym współczynnikiem wnikania ciepła do wsadu, T_g temperaturą „bryły gazowej" i T_1 temperaturą powierzchni kalcynowanego ziarna.

We wzorze (1) mianownik M ma postać:

$$M = 1 - R_2P_{g2}(\varphi_{2-2} + R_1P_{g1}\varphi_{2-1}). \qquad (2)$$

Wartości współczynników konfiguracji w równaniach (1) i (2) z ich definicji wynoszą:

$$\varphi_{1-2} = 1, \varphi_{2-1} = F_1/F_2, \varphi_{2-2} = (F_2 - F_1)/F_2. \qquad (3)$$

Każdorazowo w modelach kalcynacji ziarnistego wsadu wapieni, omawianych w literaturze, przyjmuje się, że dominującymi mechanizmami transportu ciepła do kalcynowanego ziarna wapienia w warstwie są wymiana ciepła przez promieniowanie „bryły gazowej" i powierzchni stałych, otaczających kalcynowane ziarno. Często pomija się wpływ konwekcyjnego strumienia ciepła, wnikającego do kalcynowanego ziarna, lub przyjmuje się szacunkowo, że strumień ciepła transportowany na drodze konwekcji stanowi tylko małą część np. (5-10)% całkowitego strumienia ciepła, wnikającego do kalcynowanego ziarna wapienia. Dlatego w dalszej części niniejszej pracy zostaną poddane analizie współczynniki wielkości zawartych w równaniu (1), których wartości istotnie wpływają na wymianę ciepła w kalcynowanej warstwie ziarnistego wsadu wapienia, przy czym w części doświadczalnej niniejszej pracy przytoczone zostaną wyniki badań emisyjności promieniowania powierzchni wybranych wapieni i otrzymanego z nich wapna.

3. Emisyjności powierzchni wapienia i wapna

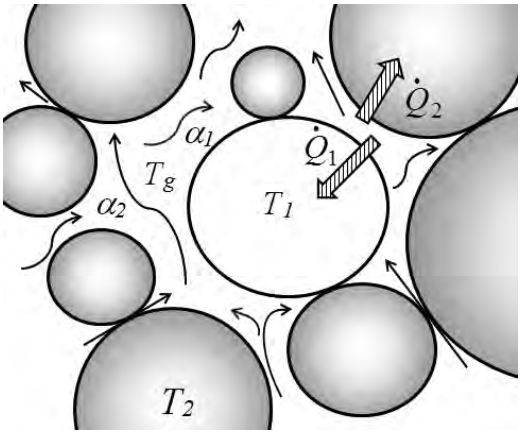
W Tabeli 1 zebrano wartości emisyjności wapieni, różnie obrobionych powierzchni marmurowych, wapna, tlenku wapnia itd. Na podstawie przytoczonych wartości emisyjności nie można odpowiedzieć na pytanie o statystycznie istotne różnice emisyjności powierzchni wapieni i wapna, przyczyniające się do różnych czasów dysocjacji termicznej różnych wapieni [2]. Dlatego w pracach nad modelowaniem termicznej dysocjacji wapieni przeprowadzono eksperyment w celu zbadania występowania tych różnic w przypadku wybranych wapieni, stosowanych w przemysłowej produkcji wapna. Wyniki tego eksperymentu są zamieszczone w drugiej części niniejszej pracy.

4. Refleksyjność powierzchni otaczających kalcynowane ziarno

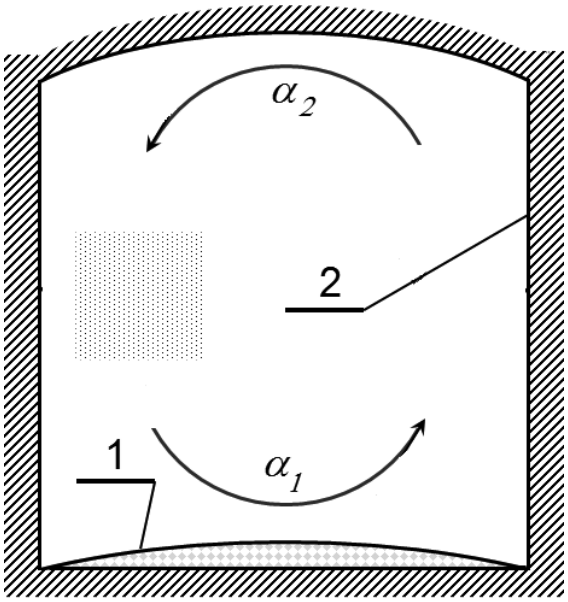
Refleksyjność R_2 powierzchni stałych, czyli powierzchni ziaren kalcynowanych i ziaren (brył) wyprodukowanego wapna, oblicza się korzystając z prawa Kirchhoffa przy znajomości emisyjności powierzchni wymieniających ciepło [24], które mówi, że emisyjność ciała szarego jest równa jego zdolności pochłaniania (absorpcji). Dlatego ze wzoru:

$$R_2 = 1 - A_2 = 1 - \varepsilon \tag{4}$$

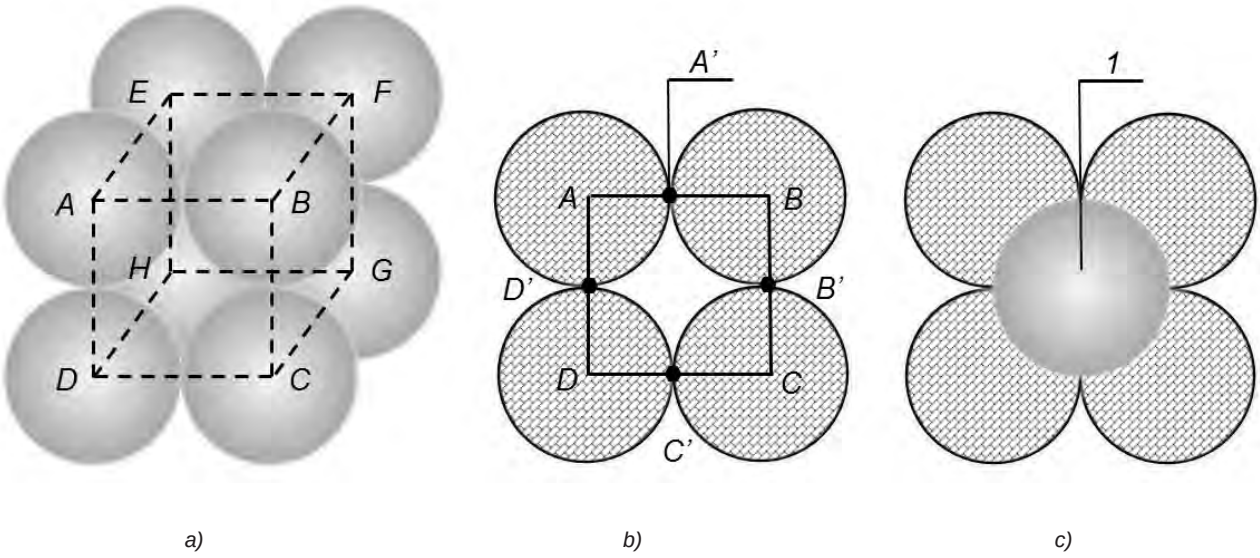
obliczyć można refleksyjność powierzchni kalcynowanych ziaren.



Rys. 1. Uproszczony schemat wymiany ciepła między nagrzewanym ziarnem o temperaturze powierzchni T_1 a otaczającymi ziarnami o temperaturze T_2 i mieszaniną gazów o temperaturze T_g; α_1 jest współczynnikiem konwekcyjnego wnikania ciepła do nagrzewanego ziarna, α_2 jest współczynnikiem konwekcyjnego wnikania ciepła do ziaren otaczających nagrzewane ziarno, $\dot{Q}_1$ jest strumieniem ciepła wnikającym do nagrzewanego ziarna, $\dot{Q}_2$ jest strumieniem ciepła wnikającym do ziaren otaczających nagrzewane ziarno.
Fig. 1. Simplified model of heat transfer between a heated particle with surface temperature T_1 and both surrounding particles with temperature T_2 and gaseous mixture with temperature T_g; α_1 – coefficient of heat transfer by convection to the heated particle, α_2 – coefficient of heat transfer by convection to particles surrounding the heated particle, $\dot{Q}_1$ – heat flux transported to the heated particle, $\dot{Q}_2$ – heat flux transported to particles surrounding the heated particle.



Rys. 2. Schemat pieca komorowego z nagrzewanym wsadem i komorą z gazem emitująco-absorbującym: 1 – wsad, 2 – sciany komory, α_1 – współczynnik konwekcyjngo wnikania ciepła do wsadu, α_2 – współczynnik konwekcyjnego wnikania ciepła do ścian komory.
Fig. 2. Scheme of a chamber oven with a heated batch and a chamber containing emitting-absorbing gas: 1 – batch, 2 – walls of chamber, α_1 – coefficient of heat transfer to batch by convection, α_2 – coefficient of heat transfer to walls of chamber by convection.



Rys. 3. Schemat ułożenia sąsiadujących ze sobą ziaren kalcynowanego wapienia w warstwie: a) ziarna ułożone w narożach sześcianu, b) powierzchnia abstrakcyjna A'B'C'D' na ścianie ABCD, c) powierzchnia abstrakcyjna A'B'C'D' przysłonięta przez ziarno 1 położone na zewnątrz sześcianu ABCD.
Fig. 3. Scheme of packing of neighbouring particles within a calcined limestone layer: a) particle packing in corners of cube, b) abstractive surface A'B'C'D' on the ABCD wall, c) abstractive surface A'B'C'D' shaded by particle (marked 1), being located on the outside of the ABCD cube.

Tabela 1. Emisyjność panchromatyczna[*)] *niektórych materiałów.*
Table 1. Hemispherical emissivity[*)] *of chosen materials.*

Materiał	Uwagi/ Temperatura [°C]	Emisyjność ε		Literatura
Wapień	Powierzchnia naturalna/ 36	0,96		[15]
	40	0,95 [1)]		[16]
	250	0,83 [1)]		[16]
	500	0,75 [1)]		[16]
Wapień jasny szlifowany		0,95 [2)]	0,35 [3)]	[17, 18]
Wapień ciemny szlifowany		0,95 [2)]	0,50 [3)]	
Marmur szary szlifowany		0,93 [2)]	0,30 [3)]	
Marmur ciemny szlifowany		0,93 [2)]	0,50 [3)]	
Marmur szary, polerowany	20	0,93		[19]
	22	0,931		[20]
Marmur polerowany	22	0,93 [1)]		[21]
Marmur gładko szlifowany		0,545 [1)]		
Wapno		0,3 - 0,4 [1)]		[19, 22]
Tlenek wapnia	proszek	0,30 [1)]		[19]
	848 - 1310	0,27 - 0,28		[23]
	832	0,2		[17]
	850 - 1277	0,27		[16]
Zaprawa wapienna, biała, chropowata	20 - 200	0,93 [1)]		[21, 16, 24]
	10 - 88	0,93		[16]
Tynk, zaprawa wapienna chropowata	10 - 88	0,91		[20,22]
	10 - 88	0,93		[16]
	1020	0,91- 0,93		[16]

[*)] W literaturze [18] podano również widmową emisyjność normalną $\varepsilon_{\lambda,n}$ wapienia oraz widmową refleksyjność normalną $R_{\lambda,n}$ wapienia i wapna.
[1)] W Tabeli 5 podano ε_n, czyli normalną emisyjność panchromatyczną; półsferyczna emisyjność panchromatyczna dla błyszczącej powierzchni wynosi $\varepsilon = 1{,}2\varepsilon_n$, dla gładkiej powierzchni wynosi $\varepsilon = 0{,}95\varepsilon_0$, a dla powierzchni chropowatej $\varepsilon = 0{,}98\varepsilon_0$ [21].
[2)] Emisyjność promieniowania niskotemperaturowego, czyli promieniowania przegród i urządzeń grzejnych w temperaturze około 300 K [17, 18].
[3)] Emisyjność promieniowania wysokotemperaturowego, czyli promieniowania słonecznego w temperaturze około 6000 K [17, 18].

5. Współczynniki konfiguracji

W przypadku rozpatrywania wymiany ciepła pomiędzy dowolnie ułożonymi względem siebie ciałami doskonale czarnymi wprowadza się w obliczeniach współczynnik konfiguracji φ, przy pomocy którego określa się jaka część pełnej emisji promieniowania jednej powierzchni F_1 dociera do drugiej powierzchni F_2. Jeżeli powierzchnia F_2 całkowicie obejmuje powierzchnię F_1, to definicję współczynnika konfiguracji zapisuje się następującym wzorem [25]:

$$\varphi = \frac{F_1}{F_2}. \tag{5}$$

Kalcynowane ziarna wapienia w warstwie ułożone są przypadkowo, ale w celu przyjęcia do obliczeń szacunkowej wartości współczynników konfiguracji przyjmuje się, że ziarna są kuliste, a w niewielkiej objętości warstwy ułożone w narożach sześcianu, jak to pokazano na Rys. 3a. Liczba powierzchni rzeczywistych, nie wklęsłych, zawarta w sześcianie wynosi 8 (1/8 powierzchni każdego ziarna), a liczba powierzchni abstrakcyjnych, położonych na ścianach sześcianu, wynosi 6. Przykład powierzchni abstrakcyjnej pokazany jest na Rys. 3b. Powierzchnia ta zamyka wnękę w układzie powierzchni ziaren wymieniających ciepło, utworzoną przez ziarno oznaczone cyfrą 1, położone na zewnątrz rozpatrywanego prostopadłościanu i stykające się z ziarnami umieszczonymi w narożach A, B, C, D, co jest pokazane na Rys. 3c. W układzie takim do wyznaczenia jest 14^2 niewiadomych współczynników konfiguracji, przy czym dla powierzchni nie wklęsłych i abstrakcyjnych wartość współczynników konfiguracji wynosi $\varphi_{ii} = 0$. Do wyznaczenia niezerowych wartości współczynników konfiguracji stosuje się prawo zamkniętości i wzajemności. Ze względu na nieregularność kształtu kalcynowanych ziaren wapienia w przyjętym do analizy uproszczonym modelu wymiany ciepła do obliczenia współczynników konfiguracji wzięto pod

uwagę tylko powierzchnie rzeczywiste, zakładając, że tworzą zamknięty układ powierzchni. Wówczas współczynniki konfiguracji zawarte w równaniu (1) wynoszą:

$$\varphi_{2-1} = \frac{1}{7},\ \varphi_{2-2} = \frac{6}{7} \qquad (6).$$

6. Wnioski

Uproszczony model matematyczny, zastosowany w przedstawionej analizie wymiany ciepła, zachodzącej podczas nagrzewania ziarna wapienia w kalcynowanej warstwie ziarnistego wsadu, opisuje nagrzewanie ziarna w wybranej, niewielkiej objętości warstwy wsadu wapienia w danej chwili bez uwzględnienia przemieszczania się wsadu w szybie pieca na skutek uciągu i kontrakcji objętości warstwy. Model pokazuje wpływ temperatury kalcynacji, emisyjności powierzchni kalcynowanych ziaren, stężenia CO_2 i pary H_2O oraz porowatości kalcynowanej warstwy wsadu na strumień ciepła wnikający do termicznie dysocjowanego ziarna.

Do wykonania obliczeń strumienia ciepła, wnikającego do kalcynowanego ziarna, na podstawie przyjętego modelu niezbędne jest oszacowanie współczynników konfiguracji na podstawie założenia o możliwym ułożeniu stykających się ziaren.

Podziękowania

Praca została sfinansowana z prac statutowych nr 3NS01O16 Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie oraz badań własnych prowadzonych w Katedrze Technologii Materiałów Budowlanych AGH w Krakowie.

Literatura

[1] Boynton, R. S.: *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*, John Wiley and Sons Inc., New York, London, Sydney, (1966), 132-164.
[2] Lech, R.: Termiczny rozkład wapieni: Transport masy i ciepła, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, *Ceramika*, tom 105, (2008), 83-99.
[3] Lech, R.: Rozwój modelowania matematycznego dekarbonatyzacji wapieni, *CWB*, 4 (2012), 187-199.
[4] Verma, C. L., Dave, N. G., Saraf, S. K.: Performance estimation vis-a-vis design of mixed-feed lime shaft kilns, *ZKG Int.*, 9, (1988), 471-477.
[5] Verma, C. L.: Simulation of lime shaft kilns using mathematical modelling, *ZKG Int.*, 12, (1990), 576-582.
[6] Gordon, Y. M., Blank, M. E., Madison, V. V., Abovian, P. R.: New technology and shaft furnace for high quality metallurgical lime production, w *Proceedings of Asia Steel International Conference – 2003*, Jamshedpur, India, vol. 1, (2003), 1.b1.1-1.b.1.6.
[7] Gordon, Y. M., Shvidkiy, V., Yaroshenko, Y.: Optimization of the design and operating parameters of shaft furnaces, w materiałach METEC Congress, 3rd International Conference on Science and Technology of Ironmaking, Düsseldorf, (2003), 311-316.
[8] Bes, A.: *Dynamic process simulation of limestone calcination in normal shaft kilns*, PhD Thesis, Otto von Guericke Universität Magdeburg, (2006), 47-51.
[9] Hallak, B., Herz, F., Specht, E., Gröpler, R., Warnecke, G.: Simulation of limestone calcination in normal shaft kilns – mathematical model, *ZKG Int.*, 9, (2015), 66-71.
[10] Hallak, B., Herz, F., Specht, E., Gröpler, R, Warnecke, G.: Simulation of limestone calcinations in normal shaft kilns – Part 2: Influence of process parameters, *ZKG Int.*, 10, (2015), 46-50.
[11] Hallak, B., Herz, F., Specht, E., Gröpler, R., Warnecke, G.: Simulation of limestone calcinations in normal shaft kilns – Part 3: Influence of particle size distribution and type of limestone, *ZKG Int.*, 3, (2016), 64-68.
[12] Lech, R., Weisser, P.: Contraction in layers of particles of selected limestones as a result of thermal decomposition, *ZKG Int.*, 1-2, (2014),54-58.
[13] Lech, R., Szostak, P.: The packing of particles of the various limestones in a cylinder, *CWB*, 4, (2013), 238-244.
[14] Szargut, J.: *Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych pieców przemysłowych*, Wyd. Śląsk, Katowice, (1977), 108-132.
[15] Emissivity tables: www.thermoview.ru/pdf/emis3.pdf; (12.04.2016).
[16] Sala, A.: *Radiant properties of materials*, PWN, Elsevier, Warszawa, Amsterdam, (1986), 261, 272, 273, 292, 322.
[17] Pogorzelski, J. A.: Podstawy przenoszenia ciepła, w Klemm, P. (red.), *Budownictwo ogólne*, t. 2, rozdz. 4 – Fizyka budowli, Arkady, Warszawa, (2005), 123-139.
[18] Pogorzelski, J. A.: *Fizyka cieplna budowli*, PWN, Warszawa, (1976), 311.
[19] Bramson, M. A.: *Infrared Radiation, A Handbook for Applications with the Collection of Reference Tables*, Plenum Press, New York, (1968), 180, 535, 536.
[20] Hobler, T.: *Ruch ciepła i wymienniki*, WNT, Warszawa, (1979), 705, 744.
[21] Ražnjević, K.: *Tablice cieplne z wykresami*, WNT, Warszawa, (1966), 61-62.
[22] Staniszewski, B. (red.): *Wymiana ciepła. Zadania i przykłady*, PWN, Warszawa, (1965), 412.
[23] Hild, K.: *Die Gesamtstrahlung einiger Oxyde und Oxydgemische. Mitt. Kaiser Wilhelm-Inst. f. Eisenforsch*, Düsseldorf, 1932, Bd.14, 59 – 70.
[24] Wiśniewski, S.: *Wymiana ciepła*, PWN, Warszawa, (1979), 439-461, 493-499.
[25] Staniszewski, B.: *Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne*, PWN, Warszawa, (1979), 282-283, 427-431.

♦

Otrzymano 21 czerwca 2016, zaakceptowano 5 lipca 2016.