
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 23
(październik–grudzień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

Rok VIII

Warszawa–Opole 2015

EWA GŁODEK-BUCYK*
FRANCISZEK SŁADECZEK**
WOJCIECH KALINOWSKI***

Model matematyczny chłodnika rusztowego klinkieru

Słowa kluczowe: model matematyczny, chłodnik rusztowy klinkieru, wymiana ciepła.

Chłodniki rusztowe są elementem linii technologicznej pieca obrotowego do wypalania klinkieru, służącym do schładzania klinkieru w końcowym etapie procesu jego wytwarzania. Rozkład temperatury klinkieru podczas procesu ochładzania ma ważny wpływ na jakość produkowanego cementu. Dlatego też istotna jest znajomość gradientu temperatury klinkieru i powietrza w poszczególnych strefach tego urządzenia. W artykule przedstawiono symulacje pracy chłodnika klinkieru przy wykorzystaniu modelu infiltracyjnej wymiany ciepła w ośrodkach porowatych, który oparty jest na wymianie ciepła pomiędzy powietrzem chłodzącym a gorącym klinkierem.

1. Wstęp

Chłodniki rusztowe są elementem linii technologicznej pieca obrotowego do wypalania klinkieru, służące do schładzania w końcowym etapie procesu jego wytwarzania. Chłodnik spełnia dwie funkcje: schładzania klinkieru od temperatury ponad 1350°C do temperatury dopuszczalnej dla urządzeń transportowych oraz podgrzewania powietrza do spalania.

Wszystkie nowe i modernizowane instalacje wypalania klinkieru wyposażone są w chłodniki typu rusztowego. Chłodzenie klinkieru w chłodniku rusztowym jest realizowane w prądzie krzyżowym, w którym poziomo przesuwana warstwa materiału jest chłodzona strumieniem powietrza, przepływającym przez złożę. Część powietrza, jako powietrze wtórne i tzw. powietrze trzecie, jest kierowana

* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, e.glodek@icimb.pl

** Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, f.sladeczek@icimb.pl

*** Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, w.kalinowski@icimb.pl

do spalania paliwa, a pozostała część, jako tzw. powietrze nadmiarowe, po odpyleniu jest usuwana na zewnątrz.

Podstawowym zadaniem chłodnika klinkieru jest więc schładzanie klinkieru podczas ciągłej pracy instalacji do możliwie najniższej temperatury. W tym samym czasie powietrze do spalania powinno być podgrzane do maksymalnie najwyższej temperatury, tak aby przy jak najniższym wykorzystaniu energii z paliw zapewnić w strefie spiekania temperaturę wymaganą w procesie formowania klinkieru. Wykorzystanie ciepła odpadowego z chłodnika do podgrzewania powietrza w procesie spalania jest jedną z dróg redukcji zużycia paliw w instalacji, dlatego też kluczową rolę odgrywa sprawność chłodnika. Zależy ona głównie od efektywności odzysku ciepła ze złoża klinkieru i poziomu strat z powierzchni chłodnika (przewodzenie, konwekcja, promieniowanie).

W przemysłowych instalacjach wypalania można wydzielić dwie strefy chłodzenia klinkieru: pierwsza – wstępnego chłodzenia w piecu obrotowym oraz druga – chłodzenia w chłodniku klinkieru. Klinkier jest chłodzony, gdy jeszcze znajduje się w piecu, gdyż strefa maksymalnych temperatur (strefa spiekania) kończy się kilka metrów przed wylotem z pieca. Ochładzanie w tej strefie jest stosunkowo wolne ze względu na słabe warunki wymiany i przewodzenia ciepła. Rozkład temperatury klinkieru podczas procesu ochładzania ma istotny wpływ na jakość produktu wypalania. Dla zwiększenia wytrzymałości klinkieru jest korzystne, aby nie ochładzać go zbyt szybko w zakresie 1450–1250°C. Natomiast proces ochładzania klinkieru od ok. 1250 do 800°C powinien przebiegać szybko, aby zapobiec rozkładowi krzemianu trójwapniowego. Dla temperatury klinkieru poniżej 800°C szybkość chłodzenia nie wpływa na jego jakość [5].

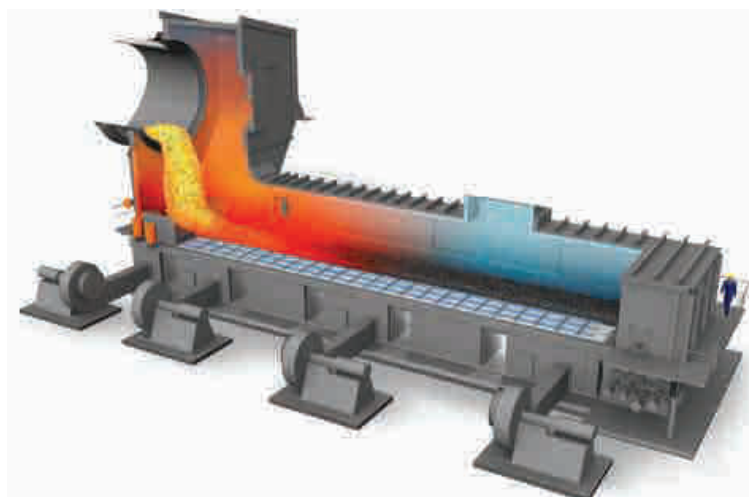
Modelowanie matematyczne jest najczęściej stosowaną metodą analizy pracy układów technologicznych, w tym również chłodników klinkieru. W literaturze przedmiotu występują różne podejścia do modelowania wymiany ciepła w chłodniku klinkieru. Jedną z nich jest wykorzystanie teorii przenikania ciepła przez przegrodę, przy pomocy której przykładowo w pracach [3–4] przeprowadzono obliczenia profilu temperatury klinkieru, powietrza oraz ścian chłodnika klinkieru. Natomiast w pracy [5] wykorzystano teorię konwekcyjnej wymiany ciepła, gdzie w oparciu o dane doświadczalne, określono wymianę ciepła między cząstkami stałymi a gazem, wykorzystując zależności pomiędzy liczbami Nusselta, Pecleta oraz Reynoldsa. Obecnie niektórzy badacze [2, 6–7] zaczęli stosować teorię infiltracyjnej wymiany ciepła w ośrodkach porowatych (*seepage heat transfer control mechanism model*). W pracach tych uwzględniono zmienne właściwości fizyczne gazu i klinkieru, efekt cieplnej dyspersji oraz brak równowagi termicznej w procesie wymiany ciepła gaz–ciało stałe.

2. Model chłodnika klinkieru

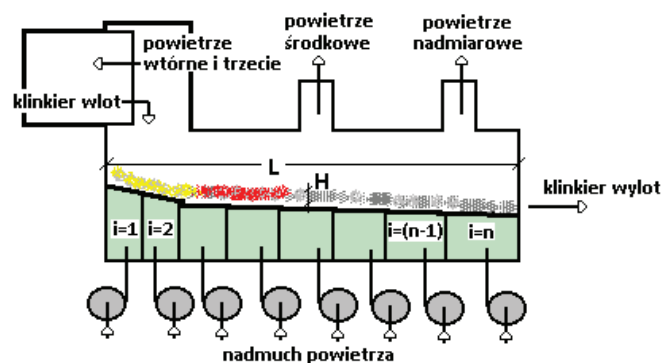
Obliczenia modelowe przeprowadzono przy następujących założeniach:

- wielkość ziarna klinkieru oraz jego porowatość jest zmienna,
- powietrze wprowadzane jest prostopadle do złoża klinkieru,
- rozkład strumienia powietrza wprowadzanego na chłodnik jest zmienny na długości chłodnika,
- rozkład strumienia powietrza jest niezmienny w przekroju poprzecznym chłodnika,
- końcowa temperatura klinkieru na wyjściu z jednej sekcji jest równa początkowej temperaturze klinkieru na wejściu do drugiej sekcji,
- strumień klinkieru w poszczególnych sekcjach jest stały,
- brak akumulacji energii w poszczególnych sekcjach.

Schemat chłodnika rusztowego klinkieru przedstawiono na rycinach 1 i 2.



Ryc. 1. Widok rusztowego chłodnika klinkieru typu Cross Bar [1]



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 2. Schemat technologiczny rusztowego chłodnika klinkieru

W celu określenia profilu temperatury złoża klinkieru i powietrza chłodnik podzielono na segmenty (ryc. 2), w których przeprowadzono obliczenia wymiany ciepła. Segmenty mają różną długość i powiązane są z komorami nadmuchu powietrza na chłodnik. Równania bilansu masy i energii ciała stałego (klinkieru) i powietrza w poszczególnych segmentach chłodnika przedstawiają się następująco:

– bilans masy klinkieru:

$$m_{k(1\dots n-1)} = m_{k(2\dots n)} \quad (1)$$

– równanie bilansu energii dla klinkieru:

$$(1-\varepsilon)\rho_k c p_k \frac{\partial T_k}{\partial T} = -\frac{\partial\left((1-\varepsilon)\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial y}\right)}{\partial y} + S\alpha(T_k - T_g) \quad (2)$$

– bilans masy powietrza:

$$m_{g1} = m_{g2} \quad (3)$$

– bilans energii powietrza:

$$\varepsilon\rho_g c p_g \frac{\partial T_g}{\partial T} + \frac{\partial(\varepsilon\rho_g c p_g w_g T_g)}{\partial y} = \frac{\partial\left(\varepsilon\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y}\right)}{\partial y} + S\alpha(T_k - T_g) \quad (4)$$

W analizowanym układzie dominującym sposobem wymiany ciepła jest konwekcja. Konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła pomiędzy ciałem stałym a powietrzem obliczono przy wykorzystaniu zależności empirycznej opracowanej przez Chiltona-Colborna (równanie 5). Wszystkie właściwości gazu zostały określone dla temperatury $T_f = (T_k + T_g)/2$. Wymiana ciepła uzależniona jest od wielkości cząstki, kształtu, porowatości złoża, strumienia gazu przepływającego przez złożo i właściwości gazu. Bazując na równaniach 5–7. wyznaczono konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła.

$$J_H = 2,9 \text{Re}^{-2/3} + 0,78 \text{Re}^{-0,381} \quad (5)$$

$$J_H = \frac{\alpha}{cp_g \rho_g w_g} \left(\frac{cp_g \mu_g}{\lambda_g} \right) \quad (6)$$

$$Re = \frac{d_k \rho_g w_g}{(1-\varepsilon) \mu_g \Phi_k} \quad (7)$$

Parametry charakteryzujące właściwości mediów uczestniczących w procesie aproksymowano następującymi zależnościami:

$$\begin{aligned} - \lambda_k &= 0,244(1 + 0,00063T_k) [2], \\ - \lambda_g &= (-2 \cdot 10^{-6} \cdot T_g^2 + 0,0067 \cdot T_g + 2,3898)/100, \\ - \mu_g &= (-10^{-5} \cdot T_g^2 + 0,0445 \cdot T_g + 17,367) \cdot 10^{-6}, \\ - cp_g &= 10^{-8} \cdot T_g^2 + 0,0001 \cdot T_g + 1,0109, \\ - cp_k &= 1,898 \cdot 10^{-15} \cdot T_k^4 + 2,062 \cdot 10^{-10} \cdot T_k^3 - 5,313 \cdot 10^{-7} \cdot T_k^2 + 5,923 \cdot 10^{-4} \cdot T_k + 0,7263 \end{aligned}$$

oraz

$$- w_g = V/\varepsilon, S = 6(1-\varepsilon)/d.$$

Posiłkując się powyższymi zależnościami, opracowano algorytm obliczeniowy wykorzystujący procedury iteracyjne. W pierwszym kroku wprowadzane są wielkości wejściowe. Następnie obliczane są właściwości mediów uczestniczących w procesie oraz konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła pomiędzy ciałem stałym a powietrzem. Znajomość tych parametrów pozwala na wyznaczenie strumienia ciepła odbieranego i przekazywanego przez media. Jeżeli nie uzyskuje się zbieżności wyników na określonym poziomie, wtedy jest obliczana nowa temperatura powietrza i klinkieru. W innym przypadku proces obliczeniowy zostaje zakończony, a uzyskaną temperaturę mediów traktuje się jako wynikową.

3. Wyniki obliczeń

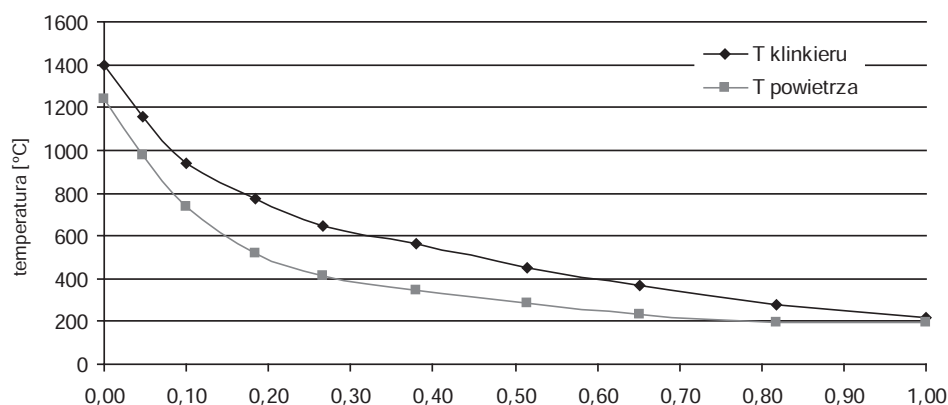
Obliczenia przeprowadzono dla chłodnika rusztowego o nadmuchu powietrza na poziomie 2,0 m³/kgkl. Chłodnik zasilany jest powietrzem o temperaturze otoczenia oraz gazami o temperaturze 70°C i wilgotności 8,5%. W celu sprawdzenia poprawności zastosowanego modelu matematycznego otrzymane wyniki obliczeniowe porównano z danymi pomiarowymi. Obliczenia wykazały dużą korelację z danymi pomiarowymi na rzeczywistym obiekcie (tab. 1). Rozkład temperatury na całej długości chłodnika przedstawiono na rycinie 3.

T a b e l a 1

Porównanie danych obliczeniowych z danymi pomiarowymi

Wyszczególnienie	Pomiar	Obliczenia	Różnica [%]
	temperatura [°C]		
Powietrze wtórne i trzecie	703	679	-3,42
Powietrze środkowe	292	284	-2,80
Powietrze nadmiarowe	230	224	-2,70
Klinkier	230	221	-3,90

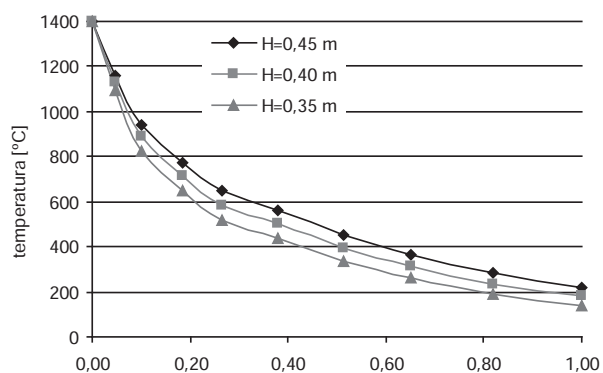
Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

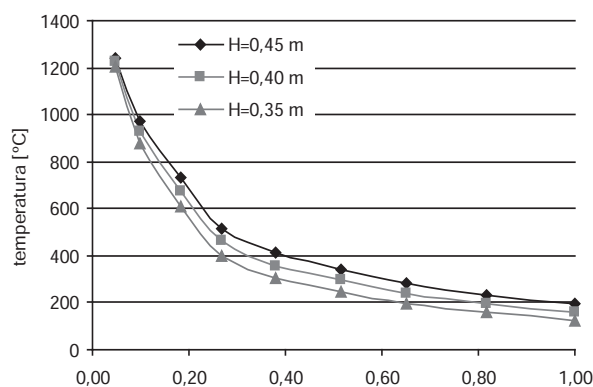
Ryc. 3. Rozkład temperatury na długości chłodnika

Przeprowadzono także obliczenia wpływu zmniejszenia wydajności produkcji klinkieru, o 11,2% (wariant 1) i 22,3% (wariant 2), na temperaturę gazów i klinkieru. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rycinach 4 i 5. Symulacje wykonano przy założeniu takiego samego strumienia nadmuchu w poszczególnych sekcjach oraz czasu przebywania klinkieru w chłodniku. Przyjęcie takich założeń wpływa na wysokość złoża klinkieru (układ odniesienia 0,45 m, wariant 1 – 0,40 m, wariant 2 – 0,35 m) oraz jednostkowy nadmuch na chłodnik (układ odniesienia 2,0 m³n/kgkl, wariant 1 – 2,25 m³n/kgkl, wariant 2 – 2,57 m³n/kgkl). Redukcja wydajności produkcji klinkieru przy przyjętych założeniach skutkuje zmniejszeniem temperatury klinkieru na wyjściu z chłodnika i powietrza w stosunku do układu odniesienia (tab. 2). Zmniejszenie temperatury klinkieru jest wynikiem wzrostu jednostkowego strumienia czynnika schładzającego, natomiast spadek temperatury gazów związany jest ze zmniejszeniem strumienia masowego klinkieru wprowadzanego do poszczególnych sekcji, a tym samym z ilością odbieranego ciepła.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 4. Temperatura klinkieru w funkcji wysokości warstwy klinkieru



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 5. Temperatura gazów w funkcji wysokości warstwy klinkieru

Tabela 2

Zmniejszenie temperatury powietrza i klinkieru przy obniżaniu wydajności chłodnika

Temperatura	Wariant 1		Wariant 2	
	[°C]	[%]	[°C]	[%]
Powietrze wtórne i trzecie	632	6,9	581	14,5
Powietrze środkowe	241	15,0	199	29,9
Powietrze nadmiarowe	189	15,7	152	31,9
Klinkier wylot	180	18,9	142	36,0

Źródło: Opracowanie własne.

4. Wnioski

Modelowanie matematyczne jest najczęściej stosowaną metodą analizy pracy układów technologicznych. Przedstawiony model matematyczny infiltracyjnej wymiany ciepła w ośrodkach porowatych wykorzystano w procesie chłodzenia w prądzie krzyżowym pomiędzy powietrzem (czynnik chłodzący) a klinkierem (czynnik schładzany). Poprawność zastosowanego modelu matematycznego zweryfikowano, porównując wyniki obliczeń z dostępnymi danymi pomiarowymi. Po pozytywnej weryfikacji kodu obliczeniowego przeprowadzono symulację pracy chłodnika.

Opracowany model umożliwia symulację pracy układu chłodzenia klinkieru w zmiennych warunkach, jak również jest dobrym narzędziem inżynierskim umożliwiającym ocenę pracy instalacji w warunkach rzeczywistych*.

* Praca została sfinansowana ze środków na działalność statutową Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych.

Opis oznaczeń

d – średnica klinkieru [m]

T – temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

cp – ciepło właściwe [kJ/kgK]

w – prędkość [m/s]

S – efektywna powierzchnia wymiany ciepła [-]

Re – liczba Reynoldsa [-]

J_H – zależność Chiltona-Colborna [-]

H – wysokość złoża klinkieru [m]

L – długość chłodnika [m]

m – strumień masowy [kg/s]

V – strumień [m^3/s]

ρ – gęstość [kg/m^3]

λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/mK]

ε – porowatość złoża [-]

μ – lepkość dynamiczna [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

φ – współczynnik kształtu ziarna [-]

α – współczynnik wnikania ciepła [$\text{W/m}^2\text{K}$]

Indeks dolny

k – klinkier

g – gaz

Literatura

[1] Cross Bar Cooler, http://www.flsmidth.com/~media/Brochures/Brochures%20for%20kilns%20and%20firing/FLSmidth_CrossBar_Cooler_v2.ashx (20.09.2014).

[2] Liu B., Wang M., Wen Y., Hao X., Fan X., *Research on Control Mechanism Model of Grate Cooler Based on Seepage Heat Transfer Theory*, „Journal of Computational Information Systems” 2013, Vol. 20, No. 9, s. 8281–8288.

[3] Ahmad R., Khan T.A., Agarwal V., *Mass and Energy Balance in Grate Cooler of Cement Plant*, „International Journal of Scientific Engineering and Technology” 2013, Vol. 2, Issue 7, s. 631–637.

- [4] T o u i l D., B e l a b e d H.F., F r a n c e s C., B e l a a d i S., *Heat exchange modeling of a grate clinker cooler and entropy production analysis*, „International Journal of Heat and Technology” 2005, Vol. 23, No. 1, s. 61–68.
- [5] L o c h e r G., *Mathematische Modelle zum Prozess des Brennens von Zementklinker*, „ZGK International” 2002, Vol. 55, No. 6, s. 46–57.
- [6] M u j u m d a r K.S., G a n e s h K.V., K u l k a r n i S.B., R a n a d e V.V., *Rotary Cement Kiln Simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler*, „Chemical Engineering Science” 2007, Vol. 62, Issue 9, s. 2590–2607.
- [7] M u n d h a r a P., S h a r m a S., *Modeling of clinker coolers: Applications to Reduction in Energy Consumption*, <http://greenid.ir/wpimages/11GREENID%20MODELING%20OF%20CLINKER%20COOLERS.pdf> (20.09.2014).

EWA GŁODEK-BUCYK
FRANCISZEK ŚLADECZEK
WOJCIECH KALINOWSKI

THE MATHEMATICAL MODEL OF GRATE CLINKER COOLER

Keywords: mathematical model, grate clinker cooler, heat exchange

The grate cooler is a part of the technological line for clinker burning used for cooling of clinker in the final stage of the process. Temperature distribution of clinker during the cooling process has a significant impact on the cement quality. Therefore it is important to know the clinker and cooling air temperature gradient in the specific zones of the device. The paper presents simulations of clinker cooler performance using a seepage heat transfer model based on the exchange of heat between the cooling air and the hot clinker.