

Zbigniew RUDNICKI

RADIACYJNY PRZEPŁYW CIEPŁA W DWUPOWIĘRZCHNIOWYM
UKŁADZIE ZAMKNIĘTYM PRZY ZASTOSOWANIU MODELU PASM SZARYCH

Streszczenie. Opracowano metodę obliczania strumieni ciepła pochłanianych przez wsad i ściany pieca wglębnego przy zastosowaniu modelu pasm szarych. Przy wyznaczaniu parametrów pasm wykorzystano metodę podaną przez EDWARDSA [1, 2]. Wyróżniono dziesięć pasm promieniowania H_2O oraz dziesięć pasm CO_2 . Wykonano przykładowe obliczenia dla zamkniętego układu dwupowierzchniowego wypełnionego izotermiczną bryłą gazową. Wyniki uzyskanych obliczeń porównano z modelem pasm czarnych [5, 7, 6], z modelem gazu szarego oraz z modelem gazu nieszarego¹⁾ [4].

Ważniejsze oznaczenia:

- $\bar{\epsilon}_{110}, \bar{\epsilon}_{210}, \bar{\epsilon}_{g10}$ - średnia, monochromatyczna gęstość emisji ciała doskonale czarnego o temperaturze wsadu, ścian pieca, gazu w paśmie 1, W/m,
- $\epsilon_{1\omega_0}, \epsilon_{2\omega_0}, \epsilon_{g\omega_0}$ - monochromatyczna gęstość emisji ciała doskonale czarnego o temperaturze wsadu, ścian pieca, gazu, W/m,
- $\bar{h}_{11}, \bar{h}_{21}$ - średnia monochromatyczna gęstość jasności wsadu i ścian pieca w i-tym paśmie, W/m,
- $\bar{h}_{1\omega}, \bar{h}_{2\omega}$ - monochromatyczna gęstość jasności wsadu i ścian pieca, W/m,
- $\dot{q}_{11}, \dot{q}_{21}$ - gęstość strumienia ciepła pochłanianego przez wsad i ścianę pieca w i-tym paśmie, W/m^2 ,
- ω'_1, ω''_1 - dolna i górna granica i-tego pasma, m^{-1} ,
- $\Delta\omega_1$ - szerokość i-tego pasma, m^{-1} ,
- A_1 - absorpcja i-tego pasma, m^{-1} ,
- α_1 - bezwymiarowa absorpcyjność i-tego pasma,
- τ_g - transmisyjność bryły gazowej,
- ϵ_g - emisyjność bryły gazowej,
- σ - stała Stefana-Boltzmana, $5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$,
- r_1, r_2 - refleksyjność wsadu oraz ścian pieca.

¹⁾ Przez gaz nieszary rozumie się gaz, którego uśredniona na widmo absorpcyjność jest zależna od temperatury ścianki i różni się od emisyjności gazu. Absorpcyjność takiego gazu wyznacza się według metody podanej przez Hottela [3].

Wstęp

Jednym z podstawowych problemów cieplnych obliczeń pieców przemysłowych jest analiza przepływu ciepła przez promieniowanie w układach zamkniętych wypełnionych ośrodkiem promieniująco-absorbującym. Bezpośrednim efektem procesu nagrzewania jest strumień ciepła netto pochłaniany przez materiał. Metody obliczeniowe zmierzające do obliczenia tego strumienia opierają się na pewnych założeniach, z których bardzo ważne założenie dotyczy ośrodka gazowego. Strumienie energii emitowanej lub pochłanianej przez gaz można rozpatrywać traktując gaz jako szary, nieszary lub uwzględnić zróżnicowane własności radiacyjne ośrodka w zależności od pasma.

Pasmowe promieniowanie gazów można rozpatrywać w oparciu o model pasm szarych lub model pasm czarnych.

Zagadnienie przepływu ciepła na drodze promieniowania w komorze pieca wgłębnego przy własnościach radiacyjnych ośrodka traktowanego jako gaz nieszary rozwiązano w pracy [4]. Z tego rozwiązania łatwo uzyskać równania dla modelu gazu szarego.

Zastosowanie modelu pasm czarnych do rozwiązania tego zagadnienia przedstawiono w pracach [5, 7, 6].

W niniejszej pracy podano sposób obliczania strumieni ciepła pochłanianych przez wsad i ściany pieca wgłębnego przy zastosowaniu modelu pasm szarych.

1. Założenia oraz dane liczbowe

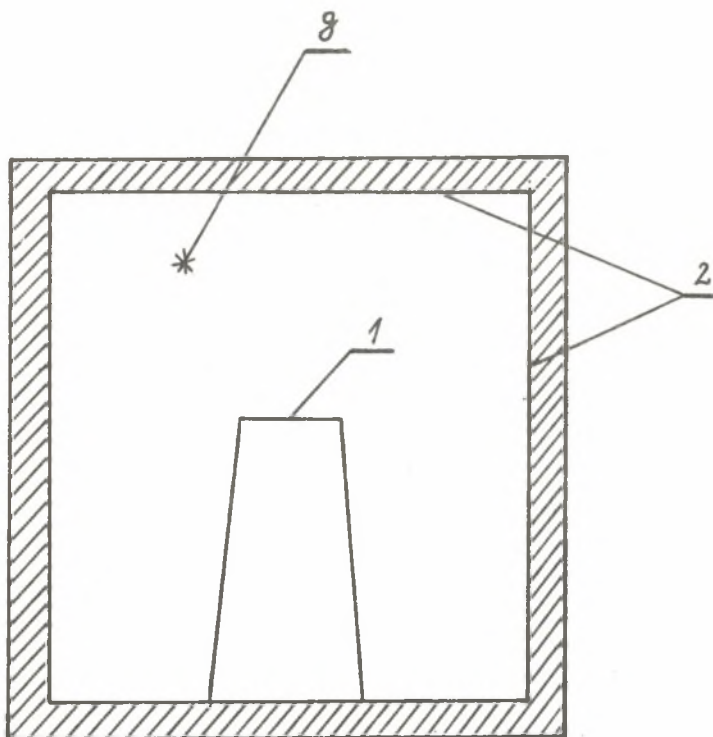
Na rys. 1 przedstawiono uproszczony schemat pieca wgłębnego, służącego do nagrzewania stalowych wlewków. W przedstawionych rozważaniach przyjęto następujące założenia:

- objętościowy element bryły gazowej, powierzchnia ścian pieca oraz powierzchnia wsadu tworzą układ trzech elementów izotermicznych,
- powierzchnia wsadu tworzy bryłę wypukłą o współczynniku konfiguracji $\varphi_{1-1} = 0$,
- powierzchnie wsadu oraz ścian pieca są szare,
- własności radiacyjne promieniującego gazu określono przyjmując model pasm szarych,
- pasmowa transmisyjność gazu jest funkcją T_g , p_{CO_2} , p_{H_2O} oraz średniej drogi promienia L w bryle gazowej.

W obliczeniach porównawczych wykorzystano model pasm czarnych [5, 6, 7], model gazu szarego oraz model gazu nieszarego [4, 6].

Obliczenia liczbowe przedstawione w niniejszej pracy wykonano dla następujących danych:

temperatura wsadu $T_1 = 1073 \text{ K}$,
 temperatura ścian pieca $T_2 = 1123 \text{ K}$,
 temperatura gazu $T_g = 1303 \text{ K}$,
 całkowite ciśnienie gazu $p_g = 1 \text{ bar}$,
 cząstkowe ciśnienie CO_2 $p_{\text{CO}_2} = 0,1517 \text{ bar}$,
 cząstkowe ciśnienie H_2O $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1365 \text{ bar}$,
 powierzchnia wsadu $F_1 = 97,82 \text{ m}^2$,
 powierzchnia ścian pieca $F_2 = 182,33 \text{ m}^2$,
 średnia droga promienia w bryle gazowej $L = 1,755 \text{ m}$,
 emisyjność wsadu $\epsilon_1 = 0,97$,
 emisyjność ścian pieca $\epsilon_2 = 0,63$.



Rys. 1. Uproszczony schemat komory pieca wgłębnego
 1 - powierzchnia wsadu, 2 - powierzchnia ścian pieca, g - element gazowy

Współczynniki konfiguracji pomiędzy elementami powierzchniowymi przyjmują wartości

$$\varphi_{2-1} = \frac{F_1}{F_2} = 0,536, \quad \varphi_{2-2} = 1 - \frac{F_1}{F_2} = 0,464.$$

2. Model pasm szarych

Znając temperatury elementów izotermicznych można wyróżnić w widmie pasma, w których aktywna jest para wodna, pasma promieniowania CO_2 , pasma promieniowania wspólnego oraz tzw. "okna", w których gaz jest przezroczysty.

Gęstości strumieni ciepła pochłanianego przez wsad oraz ścianę pieca określone są równaniami:

$$\dot{q}_1 = \sum_{i=1}^{i=n} \dot{q}_{1i}, \quad (1)$$

$$\dot{q}_2 = \sum_{i=1}^{i=n} \dot{q}_{2i}. \quad (2)$$

gdzie:

n = całkowita ilość rozróżnionych pasm widma łącznie z "oknami",

$$\dot{q}_{1i} = \frac{\epsilon_1(\bar{h}_{1i} - \bar{\epsilon}_{1i0})\Delta\omega_i}{r_1} \quad (3)$$

$$\dot{q}_{2i} = \frac{\epsilon_2(\bar{h}_{2i} - \bar{\epsilon}_{2i0})\Delta\omega_i}{r_2} \quad (4)$$

Wartości monochromatycznej średniej gęstości jasności wsadu i ścian pieca w i -tym paśmie

oblicza się z zależności:

$$\begin{aligned} \bar{h}_{1i} = \frac{1}{\Delta\omega_i} \int_{\omega_i}^{\omega_i'} h_{1\omega} d\omega = \frac{1}{M} [\epsilon_1 \bar{\epsilon}_{1i0} (1 - \varphi_{22} r_2 \tau_1) + \\ + \epsilon_2 r_1 \tau_1 \bar{\epsilon}_{2i0} + (1 - \tau_1) r_1 (1 + r_2 \tau_1 \varphi_{21}) \bar{\epsilon}_{g10}] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{h}_{2i} = \frac{1}{\Delta\omega_i} \int_{\omega_i}^{\omega_i'} h_{2\omega} d\omega = \frac{1}{M} [\epsilon_1 r_2 \varphi_{21} \tau_1 \bar{\epsilon}_{1i0} + \\ + \epsilon_2 \bar{\epsilon}_{2i0} + (1 - \tau_1) r_2 (1 + r_1 \tau_1 \varphi_{21}) \bar{\epsilon}_{g10}] \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:

$$M = 1 - \psi_{22} r_2 \tau_1 - r_2 \psi_{21} r_1 \tau_1^2 \quad (7)$$

Podobne równania, lecz dla modelu gazu nieszarego wyprowadzono w pracy [4]. Średnie monochromatyczne gęstości emisji własnej elementów izotermicznych dla 1-tych pasm obliczono z równań:

$$\bar{\epsilon}_{110} = \frac{1}{\Delta\omega_1} \int_{\omega_1'}^{\omega_1''} \epsilon_1 \omega_0 d\omega$$

$$\bar{\epsilon}_{210} = \frac{1}{\Delta\omega_1} \int_{\omega_1'}^{\omega_1''} \epsilon_2 \omega_0 d\omega$$

$$\bar{\epsilon}_{g10} = \frac{1}{\Delta\omega_1} \int_{\omega_1'}^{\omega_1''} \epsilon_g \omega_0 d\omega$$

3. Obliczenia liczbowe dla modelu pasm szarych

Granice poszczególnych pasm oraz transmisyjności pasmowe wyznacza się w oparciu o rekomendowane wartości [1] zawarte w tablicach 1 i 2.

Tablica 1

Zalecane parametry pasmowe dla H₂O

Numer pasma	Pasma μ	Dolna granica ω_1' cm ⁻¹	Środek cm ⁻¹	Górna granica ω_1'' cm ⁻¹	Transmisyjność τ_1
1	far infrared	0		500	0
2	18	500			0,2
3	14,5	625		770	
4	11,0	770		1100	
5	6,7			1610	0,2
6	5,7	1610			0,3
7	3,2	2650		3300	
8	2,7		3800		0,3
9	1,87	4620		6200	
10	1,38	6200		8100	

Tablica 2

Zalecane parametry pasmowe dla CO₂

Numer pasma	Pasma μ	Dolna granica ω ₁ cm ⁻¹	Środek cm ⁻¹	Górna granica ω ₂ cm ⁻¹	Transmisyjność τ ₁
1	far infrared	0			1,0
2	15		667		0,14
3	10,4	849		1013	
4	9,4	1013		1141	
5	7,5	1141		1485	
6	5,2	1830		1995	
7	4,8	1995		2169	
8	4,3			2460	0,11
9	2,7			3830	0,12
10	2,0	4400		6000	

Dla założonej temperatury gazu oraz znanych ciśnień składnikowych należy uzupełnić tablice 1 i 2 w brakujące transmisyjności oraz granice pasm.

Jeżeli znana jest jedna z granic pasma oraz jego transmisyjność, to szerokość pasma wyznacze się z zależności

$$\Delta\omega_1 = \frac{A_1}{\alpha_1} = \frac{b_1 \bar{\epsilon}_g}{a_1(T_g)\alpha_1}$$

gdzie:

$$b_1 = \frac{A_1 \bar{\epsilon}_{g10}}{\bar{\epsilon}_g}$$

$$a_1(T_g) = \frac{\bar{\epsilon}_{g10}}{6T_g^4}$$

$$\alpha_1 = 1 - \tau_1$$

Współczynniki b_1 dla H₂O oraz CO₂ w zależności od temperatury gazu oraz $\bar{\epsilon}_{g10}$ oraz $a_1(T_g)$ dla H₂O i CO₂ zaczerpnięto z prac Edwarda [1,2].

W przypadku znanych granic pasma, $a_1(T_g)$ oblicza się korzystając z zależności

$$a_1(T_g) = \frac{\frac{1}{\Delta\omega_1} \int_{\omega_1'}^{\omega_1''} \epsilon_{g\omega_0} d\omega}{\epsilon_{g\omega_0}} \quad (8)$$

Wprowadzając do równania (8) funkcję $\xi\left(\frac{T_g}{\omega_1}\right)$ przedstawioną w postaci tabelicy przez HOTTELA [3] otrzymujemy

$$a_1(T_g) = \frac{1}{\Delta\omega_1} \left| \xi\left(\frac{T_g}{\omega_1''}\right) - \xi\left(\frac{T_g}{\omega_1'}\right) \right| \quad (9)$$

W podobny sposób wyznaczono współczynniki $a_1(T_1)$, $a_1(T_2)$. Transmisyjność pasma wyznacza się w tym przypadku z zależności:

$$\tau_1 = 1 - \frac{A_1}{\Delta\omega_1},$$

przy czym wcześniej należy obliczyć absorpcję przedziałową A_1 z zależności

$$A_1 = \frac{b_1 \epsilon_g}{a_1(T_g)}$$

Pełny zbiór zalecanych oraz obliczanych parametrów pasm dla H_2O przedstawiono w tabelicy 3, natomiast dla CO_2 w tabelicy 4.

Kojarząc ze sobą parametry pasm H_2O oraz CO_2 utworzono nowy zbiór 26 pasm. Niektóre z tych pasm dotyczyć promieniowania jedynie CO_2 lub H_2O , inne stanowią pasmo równoczesnego promieniowania CO_2 i H_2O , pozostałe są "oknami". Współczynniki $a_1(T)$ dla tych pasm ustalono głównie w oparciu o równanie (9).

Transmisyjności ośrodka dla wspólnego promieniowania CO_2 i H_2O obliczono z zależności

$$\tau_1 = \tau_{1H_2O} \tau_{1CO_2} \quad (10)$$

Parametry utworzonych w ten sposób 26 pasm przedstawiono w tabelicy 5.

Na uwagę zasługuje ostatni wiersz tej tabelicy. Z powodu granic tego pasma $(8100, \infty) \text{cm}^{-1}$, do równań (3), (4), (5), (6) nie można było wprowadzić iloczynów $\bar{\epsilon} \Delta\omega$ lecz wartości całek

Tablica 3

Parametry pasm dla H_2O , $\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{L}} = 0.239$ m.bar $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0.165$.

Numer pasma i	Pasmo μ	ω_i cm^{-1}	Środek cm^{-1}	ω_i' cm^{-1}	$\Delta\omega_i$ cm^{-1}	$\tau_{\text{g}i}$ -	$\alpha_{\text{g}i}$ -	A_i cm^{-1}	$b_{\text{L}i}$ -	$10^4 \times$ $\alpha_i(\tau_{\text{g}})$ cm	$10^4 \times$ $\alpha_i(\tau_{\text{f}})$ cm	$10^4 \times$ $\alpha_i(\tau_{\text{z}})$ cm
1	far. I.R.	0		500	500	0	1	500	0,023	0,14	0,25	0,22
2	18	500		587	87	0,2	0,8	70	0,017	0,40	0,8	0,70
3	14,5	625		770	145	0,47	0,53	77	0,028	0,60	1,15	1,00
4	11,0	770		1100	330	0,8	0,20	66	0,046	1,15	1,70	1,40
5	6,7	1351		1610	259	0,2	0,8	207	0,201	1,60	2,50	2,20
6	5,7	1610		1867	257	0,3	0,7	180	0,224	2,05	2,90	2,70
7	3,2	2650		3300	650	0,92	0,08	54	0,074	2,25	2,30	2,30
8	2,7	3580	3800	4020	420	0,3	0,7	295	0,340	1,90	1,65	1,75
9	1,87	4620		6200	1580	0,96	0,04	58	0,035	1,0	0,60	0,70
10	1,38	6200		8100	1900	0,97	0,03	66	0,012	0,3	0,15	0,20

Tablica 4

Parametry pasm dla CO_2 . $P_{\text{CO}_2, L} = 0.266 \text{ m.bar}$ $\epsilon_{\text{CO}_2} = 0.137$

Numer pasma 1	Pasmo μ	ω_1' cm^{-1}	Środek cm^{-1}	ω_1'' cm^{-1}	$\Delta\omega_1$ cm^{-1}	τ_{g1} -	α_{g1} -	A_1 cm^{-1}	$b\epsilon_{11}$ -	$10^4 \times e_1(T_g)$ cm	$10^4 \times e_1(T_1)$ cm	$10^4 \times e_1(T_2)$ cm
1	far I, R.	0		539	539	1	0	0	0	0,152	0,267	0,244
2	15	539	667	795	256	0,110	0,890	228,33	0,100	0,60	0,80	0,75
3	10,4	849		1013	164	0,887	0,113	18,49	0,0135	1,00	1,70	1,50
4	9,4	1013		1141	128	0,884	0,116	14,80	0,0135	1,25	1,90	1,80
5	7,5	1141		1485	344	1	0	0	0	1,569	2,325	2,13
6	5,2	1830		1995	165	1	0	0	0	2,206	2,903	2,745
7	4,8	1995		2132	137	1	0	0	0	2,25	2,95	2,75
8	4,3	2132		2460	328	0,110	0,890	291,87	0,490	2,30	2,85	2,75
9	2,7	3530		3830	300	0,120	0,880	264,44	0,376	1,95	1,85	1,90
10	2,0	4400		6000	1600	0,995	0,005	8,22	0,0066	1,10	0,70	0,80

Tablica 5

Parametry pasm wspólnego promieniowania H_2O i CO_2

Numer prze- działu	ω_1'	ω_1''	$\Delta\omega_1$	τ_1	$\bar{\epsilon}(\tau_1)$	$\bar{\epsilon}(\tau_2)$	$\bar{\epsilon}(\tau_g)$	H_2O	CO_2
	cm^{-1}				$\times 10^4 Wcm^{-1}$				
1	0	500	500	0	1,879	2,019	2,320	X	
2	500	535	35	0,200	3,863	4,886	7,468	X	
3	535	587	52	0,022	6,207	6,067	8,791	X	X
4	587	625	38	0,110	7,117	6,635	7,729		X
5	625	770	145	0,0517	8,026	9,069	10,916	X	X
6	770	795	25	0,088	10,220	9,015	11,766	X	X
7	795	849	54	0,800	10,574	11,179	15,115	X	
8	849	1100	251	0,7088	12,813	13,928	17,763	X	X
9	1100	1141	41	0,884	14,842	16,488	22,305		X
10	1141	1350	209	1	16,713	18,282	0		
11	1350	1610	260	0,200	18,788	19,833	26,146	X	
12	1610	1867	257	0,300	21,793	24,340	33,499	X	
13	1867	2132	265	1	21,914	24,998	0		
14	2132	2460	328	0,110	21,418	24,791	37,584		X
15	2460	2650	190	1	20,922	24,476	0		
16	2650	3300	650	0,920	17,284	20,734	36,767	X	
17	3300	3530	230	1	15,323	19,004	0		
18	3530	3580	50	0,120	14,579	17,669	33,989		X
19	3580	3830	250	0,036	13,347	16,660	32,290	X	X
20	3830	4020	190	0,300	11,746	14,938	30,100	X	
21	4020	4400	380	1	9,882	12,738	0		
22	4400	4620	220	0,995	8,124	10,692	23,694		X
23	4620	6000	1380	0,9552	4,704	6,401	16,161	X	X
24	6000	6200	200	0,96	2,367	3,516	10,295	X	
25	6200	8100	1900	0,97	1,127	1,803	4,902	X	
26	8100	∞	∞	1	0,0391	0,0658			

$$\int_{8100}^{\infty} \bar{\epsilon}_{1\omega} d\omega \quad \text{i} \quad \int_{8100}^{\infty} \bar{\epsilon}_{2\omega} d\omega$$

Wartości liczbowe tych całek obliczone przy pomocy równania (9) i przedstawiono w ostatnim wierszu tabelicy 5.

W pracy zrezygnowano z obliczenia poprawek uwzględniających równoczesne promieniowanie H_2O i CO_2 , proponując uwzględnienie większej ilości pasm. Oprócz pasm samodzielnych promieniowania H_2O lub CO_2 wprowadzono pasma promieniowania wspólnego o transmisyjności określonej przy pomocy równania (10).

Biorąc pod uwagę dane liczbowe przedstawione w rozdziale 2 i wartości parametrów poszczególnych pasm zawarte w tabelicy 5 obliczono: gęstość strumienia ciepła pochłanianego przez ścianę pieca

$$\dot{q}_1 = 28,931 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

oraz gęstość strumienia ciepła pochłanianego przez wasad

$$\dot{q}_2 = 6,260 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

4. Model pasm szarych

Dysponując parametrami modelu pasm szarych można utworzyć model pasm czarnych. Przyjmuje się następujące założenie:

$$A_1 = \int_{\substack{\omega_1'' \\ \tau_1 \neq 0}}^{\omega_1''} (1 - e^{-k_\omega PL}) d\omega = \int_{\substack{\omega_1' \\ \tau_1 = 0}}^{\omega_1''} d\omega = \Delta\omega_{10} \quad (11)$$

Równanie (11) określa nową szerokość pasma $\Delta\omega_{10}$ dla pasma czarnego przy jego transmisyjności $\tau_1 = 0$ i przy stałej absorpcji pasmowej $A_1 = \text{idem}$. Zachowując stałe punkty pasm zgodnie z wartościami w tabelicach 1 i 2 wyznaczono nowe parametry pasm, które przedstawiono w tabelicach 6 i 7. Wstawiając do równań (5), (6), (7) $\tau_1 = 0$ otrzymujemy następujące zależności:

$$\dot{q}_{11} = \Delta\omega_{10} \epsilon_1 (\bar{\epsilon}_{g10} - \bar{\epsilon}_{110}) \quad (12)$$

$$\dot{q}_{21} = \Delta\omega_{10} \epsilon_2 (\bar{\epsilon}_{g10} - \bar{\epsilon}_{210}) \quad (13)$$

Tablica 6

Parametry CO₂ dla pasm czarnych

Numer pasma i	Pasmo	ω'_{10}	Środek	ω''_{10}	$A_{10} = \Delta\omega_{10}$	τ_1
		cm ⁻¹				
1	far I.R.				0	1
2	15,0	553	667	781	228	0
3	10,4	922	931	940	18	0
4	9,4	1070	1077	1084	14	0
5	7,5				0	1
6	5,2				0	1
7	4,8				0	1
8	4,3	2168		2460	292	0
9	2,7	3566		3830	264	0
10	2,0	5196	5200	5204	8	0

Tablica 7

Parametry H₂O dla pasm czarnych

Numer pasma i	Pasmo μ	ω'_{10}	Środek	ω''_{10}	$A_{10} = \Delta\omega_{10}$	τ_1
		cm ⁻¹				
1	far I.R.	0		500	500	0
2	18	500		570	70	0
3	14,5	609	647	686	77	0
4	11,0	902	935	968	66	0
5	6,7	1407		1610	203	0
6	5,7	1610		1790	180	0
7	3,2	2948	2975	3002	54	0
8	2,7	3652	3800	3947	295	0
9	1,87	5381	5410	5439	58	0
10	1,38	7117	7150	7138	66	0

Dla okien przy $\tau_1 = 1$ otrzymano równania:

$$\dot{q}_{11} = \frac{\Delta\omega_{10}\epsilon_1\epsilon_2}{M}(\bar{\epsilon}_{210} - \bar{\epsilon}_{110}), \quad (14)$$

$$\dot{q}_{21} = \frac{\Delta\omega_{10}\epsilon_1\epsilon_2\tau_{21}}{M}(\bar{\epsilon}_{110} - \bar{\epsilon}_{210}), \quad (15)$$

gdzie:

$$M = 1 - r_2(\varphi_{22} + \varphi_{21}r_1)$$

Równania (12), (13), (14) i (15) zostały również wyprowadzone w pracach [6] i [7].

Kojarząc ze sobą pasma promieniowania CO_2 i H_2O otrzymano podobnie jak dla modelu pasm szarych zbiór 29 pasm.

Z uwagi na to, że pasma są doskonale czarne, zmniejszono ich ilość kojarząc pasma leżące bezpośrednio obok siebie. W ten sposób z 28 pasm otrzymano 20.

Parametry nowo utworzonych 20 pasm przedstawiono w tabelicy 8. Parametry ostatniego pasma $(7183, \infty)\text{cm}^{-1}$ obliczono podobnie jak dla pasm szarych.

Wstawiając do równań (12), (13), (14), (15) wartości liczbowe z tabelicy 8, dane z rozdziału 2 oraz wykorzystując równania (1), (2) otrzymano:

$$\dot{q}_1 = 27,137 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$\dot{q}_2 = 5,897 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Tabelica 8

Parametry pasm czarnych wspólnego promieniowania H_2O i CO_2

Numer pasma i	ω_{10}^i	ω_{10}^i	$\Delta\omega_{10}$	τ_i	$\bar{\epsilon}(T_1)$	$\bar{\epsilon}(T_2)$	$\bar{\epsilon}(T_g)$
	cm^{-1}				$\times 10^4 \text{ W cm}^{-1}$		
1	0	781	781	0	3,765	4,039	4,968
2	781	902	121	1	10,679	11,539	0
3	902	968	66	0	12,182	13,378	16,341
4	968	1070	102	1	13,482	14,225	0
5	1070	1084	14	0	15,03	16,741	18,661
6	1084	1407	323	1	16,653	18,300	0
7	1407	1790	383	0	20,185	22,501	31,358

cd. tablicy 8

Numer pasma i	ω'_{10}	ω''_{10}	$\Delta\omega_{10}$	τ_1	$\bar{\epsilon}(T_1)$	$\bar{\epsilon}(T_2)$	$\bar{\epsilon}(T_g)$
	cm ⁻¹				x 10 ⁴ W cm ⁻¹		
8	1790	2168	378	1	21,869	24,872	0
9	2168	2460	292	0	21,846	25,161	38,990
10	2460	2948	488	1	20,125	23,790	0
11	2948	3002	54	0	18,787	22,366	38,418
12	3002	3566	564	1	16,383	19,959	0
13	3566	3947	381	0	12,896	16,272	31,898
14	3947	5196	1249	1	7,966	10,394	0
15	5196	5204	8	0	4,697	6,833	16,341
16	5204	5381	177	1	4,667	6,337	0
17	5381	5439	58	0	4,013	5,589	14,641
18	5439	7117	1678	1	2,209	3,173	0
19	7117	7183	66	0	0,909	1,496	5,441
20	7183	∞	∞	1	0,0939	0,1541	

5. Model gazu szarego

Traktując gaz jako ciało szare jego własności radiacyjne nie zależą od liczby falowej. W tym przypadku transmisyjność bryły gazowej nie zależy od temperatury ścianki i wyraża się zależnością

$$\tau_g = 1 - \epsilon_g(T_g, P_{CO_2}^L, P_{H_2O}^L, P_g)$$

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymano

$$\tau_g = 0,743$$

Gęstości strumienia ciepła pochłanianego przez wślad oraz ścianę pieca oblicza się z zależności:

$$\dot{q}_1 = \frac{1}{M} [\dot{\epsilon}_1 (\tau_g^2 \varphi_{2-1} r_2 + \tau_g r_2 \varphi_{22-1}) + \dot{\epsilon}_2 \epsilon_1 \tau_g + \dot{\epsilon}_g \epsilon_1 (1 + \tau_g r_2 \varphi_{2-1})] \quad (16)$$

$$\dot{q}_2 = \frac{1}{M} [\dot{\epsilon}_1 \epsilon_2 \tau_g \varphi_{21} + \dot{\epsilon}_2 \tau_g (\varphi_{22} + \tau_g \varphi_{21} r_1) - \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_g \epsilon_2 (1 + r_1 \tau_g \varphi_{21})] \quad (17)$$

gdzie:

$$M = 1 - \tau_g r_2 (\varphi_{22} + \tau_g \varphi_{21} r_1)$$

Po wprowadzeniu danych liczbowych do równań (16) i (17) otrzymano

$$\dot{q}_1 = 36,888 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}; \quad \dot{q}_2 = 9,614 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}.$$

6. Model gazu nieszarego

Gęstości strumieni ciepła pochłanianego przez wsad oraz ścianę pieca oblicza się w tym przypadku z równań [4, 6]:

$$\dot{q}_1 = \frac{1}{M} [e_1 (\tau_1 \tau_2 \varphi_{2-1} r_2 + \tau_2 r_2 \varphi_{22} - 1) + \dot{\epsilon}_2 \epsilon_1 \tau_2 + \dot{\epsilon}_g \epsilon_1 \cdot (1 + \tau_2 r_2 \varphi_{2-1})] \quad (18)$$

$$\dot{q}_2 = \frac{1}{M} [e_1 \epsilon_2 \tau_1 \varphi_{21} + \dot{\epsilon}_2 \tau_2 (\varphi_{22} + \tau_1 \varphi_{21} r_1) - \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_g \epsilon_2 (1 + r_1 \tau_1 \varphi_{21})] \quad (19)$$

gdzie:

$$M = 1 - \tau_2 r_2 (\varphi_{22} + \tau_1 \varphi_{21} r_1)$$

Transmisyjności gazu w zależności od emitera obliczono z zależności:

$$\tau_1 = 1 - a_1$$

$$\tau_2 = 1 - a_2$$

gdzie:

$$a_{1\text{CO}_2} = (T_g/T_1)^{0.65} \epsilon_g (T_1 \cdot p_{\text{CO}_2}^L \cdot T_1/T_g)$$

$$a_{1\text{H}_2\text{O}} = (T_g/T_1)^{0.45} \epsilon_g (T_1 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}^L \cdot T_1/T_g)$$

$$a_1 = a_{1\text{CO}_2} + a_{1\text{H}_2\text{O}} - \Delta a.$$

$\Delta a \approx \Delta \epsilon$ - poprawka uwzględniająca pokrywanie się pasm H_2O i CO_2 [3]. Podobnie obliczono a_2 z tym, że zamiast temperatury T_1 do ostatnich równań wprowadzono temperaturę T_2 .

Obliczone transmisyjności wynoszą:

$$\tau_1 = 0,704$$

$$\tau_2 = 0,712.$$

Po wprowadzeniu powyższych danych liczbowych do równań (18) i (19) otrzymano

$$\dot{q}_1 = 33,089 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$\dot{q}_2 = 7,445 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

7. Porównanie wyników obliczeń i wnioski

Tablica 9

Porównywanie wyników obliczeń

		Model paśm szarych	Model paśm czarnych	Model gazu szarego	Model gazu nieszarego
\dot{q}_1	Wartość strumienia ciepła kW/m^2	28,931	27,137	36,888	33,089
	Błąd w stosunku do modelu paśm szarych %	-	-6,0	+27,5	+14,4
\dot{q}_2	Wartość strumienia ciepła kW/m^2	6,260	5,897	9,614	7,445
	Błąd w stosunku do modelu paśm szarych %	-	-5,8	+53,6	+18,9

W tablicy 9 zestawiono wyniki obliczeń strumieni \dot{q}_1 i \dot{q}_2 . Przyjmując rozwiązanie modelu paśm szarych za podstawę, rozwiązanie paśm czarnych daje błąd rzędu -6%, rozwiązanie modelu szarego +(27-54)%, natomiast model gazu nieszarego błąd rzędu +(15-20)%.

W wyniku przeprowadzonych rozważań oraz wykonanych obliczeń można sformułować następujące wnioski:

1. Wyniki obliczeń strumienia ciepła przy użyciu różnych modeli gazu dają różne wartości liczbowe. Zasadniczym powodem powyższych odchyień są różne konwencje obliczania transmisyjności ośrodka gazowego. Odchyłki wartości liczbowych pozostałych modeli w stosunku do modelu paśm szarych przyjmują oczekiwane wartości.

Średnie błędy odchyień będzie można określić po przeprowadzeniu obliczeń dla szerokiego przedziału temperatur.

2. W prezentowanym modelu pasm szarych zastosowano sposób pozwalający uniknąć obliczenia poprawek uwzględniających równoczesne promieniowanie H_2O i CO_2 .

3. W niniejszej pracy uwzględniono dużą ilość przedziałów H_2O i CO_2 . Doprowadziło to do dość pracochłonnych obliczeń. W dalszych pracach przewiduje się zbadanie wpływu ilości uwzględnianych pasm na przepływ energii radiacyjnej w rozpatrywanym układzie.

LITERATURA

- [1] Edwards D.K., Nelson K.E.: Rapid calculation of Radiant Energy Transfer Between Nongray Walls and Isothermal H_2O or CO_2 Gas. Journal of Heat Transfer, ASME, Series C, vol. 84, 1962, pp. 273-278.
- [2] Edwards D.K.: Radiation Interchange in a Nongray Enclosure Containing an Isothermal Carbon-Dioxide-Nitrogen Gas Mixture. Journal of Heat Transfer, ASME, Series C, vol. 84, 1962, pp. 1-11.
- [3] Hottel H.C., Sarofim A.F.: Radiative Transfer 1967, Mc Graw Hill.
- [4] Szargut J.: Przepływ ciepła przez promieniowanie w piecu komorowym, Archiwum Hutnictwa nr 2, 1971.
- [5] Szargut J., Wandrasz J.: Obliczanie przepływu ciepła przez promieniowanie z uwzględnieniem pasmowej emisji gazów. Referat na IX Zjeździe Termodynamików, Rzeszów - Polańczyk 1975.
- [6] Szargut J.: Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych pieców przemysłowych. Katowice, Śląsk 1977.
- [7] Wandrasz J.: Pasmowy model matematyczny przepływu energii przez promieniowanie w piecu komorowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 426, Gliwice 1976.

РАДИАЦИОННОЕ ТЕЧЕНИЕ ТЕПЛА В ДВУПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКРЫТОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ МОДЕЛИ СЕРЫХ ПОЛОС

Резюме

В статье представлен разработанный метод расчёта потока тепла, поглощаемого садкой и стенами колодезной печи при применении модели серых полос. При определении параметров полос был использован метод Эдвардса [1], [2].

Были выделены десять полос излучения H_2O и десять полос для CO_2 . Выполнены примерные расчёты для закрытой двухповерхностной системы с изотермическим закрытым газом. Результаты полученных расчётов сравнены с моделью чёрных полос [5], [7], [6], с моделью серого газа и с моделью несерого газа [4].

APPLICATION OF GRAY BAND MODEL TO RADIANT
INTERCHANGE WITHIN THE TWO - SURFACES ENCLOSURE

S u m m a r y

The paper presents the application of gray band model to radiant interchange within an enclosure of pit furnace. The EDWARD'S method was applied [1], [2]. The radiant properties of gases were determined in ten bands of the spectrum for H_2O and in ten bands for CO_2 . Numerical calculations for an enclosure consisting of two surface and one volume - gas elements were made. Results of the calculation were compared with black band model [5], [7], [6] with gray gas and with nongray gas model [4].