

Edward KOSTOWSKI

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Śląskiej w Gliwicach

APROKSYMACJA WYKRESÓW OKREŚLAJĄCYCH EMISYJNOŚĆ CO_2 I H_2O
ZA POMOCĄ FUNKCJI ANALITYCZNYCH^{x)}

Streszczenie. Przedstawiono funkcje analityczne opisujące emisyjność pary wodnej i dwutlenku węgla. Zbadano zakres parametrów występujących w praktycznych obliczeniach pieców grzewczych. Dla tego zakresu podano zależności aproksymujące stosowane wykresy, co jest bardzo dogodne, szczególnie w obliczeniach komputerowych przepływu ciepła w piecach grzewczych.

1. WPROWADZENIE

Zasadniczą rolę w przepływie ciepła w piecach grzewczych odgrywa promieniowanie cieplne. Jego intensywność jest determinowana głównie przez emisyjność spalin, w których składnikami promieniującymi są CO_2 i H_2O , w mniejszym zaś zwykle stopniu płomień i inne składniki (np. CO , SO_2). Ze względu na selektywny charakter tego promieniowania gęstość emisji gazów nie spełnia prawa Stefana-Boltzmann'a, to znaczy nie jest ona proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej. Początkowo określano ją doświadczalnie i przedstawiano za pomocą wykresów lub bardzo złożonych funkcji [16], [2], [19], później A. Schack [17] wprowadził zależność typu:

$$\dot{q}_{gi} = f_i(p, L) \cdot T_g^n \quad (1)$$

w której czynnik f_i ujmuje wpływ ciśnienia p i grubości L warstwy promieniującego gazu, niekiedy wprost ich iloczynu (pL) - zwanego gęstością optyczną, zaś wykładnik n , mniejszy od 4, jest (np. dla H_2O) dość złożoną funkcją (pL) i temperatury gazu [17]. Nowsze podręczniki [8], [20] zamieszczają uproszczone wzory typu (1).

^{x)} Pracę wykonano w ramach Problemu MR.I.10 pt.: "Optymalizacja procesów termodynamicznych i przepływowych" koordynowanego przez Instytut Techniki Ciepłej i Silników Spalinowych Politechniki Poznańskiej.

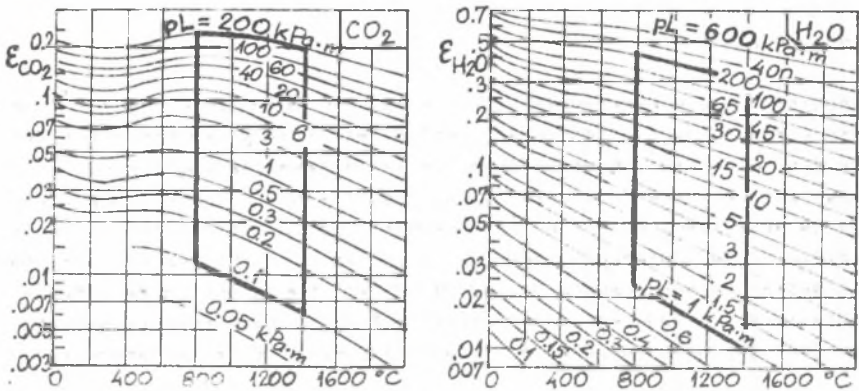
Ułatwienie obliczeń radiacyjnej wymiany ciepła stało się możliwe po wprowadzeniu przez Hottela [5] jednolitej z ciałami stałymi zależności gęstości emisji gazu od T^4

$$e_{gi} = \epsilon_{gi} \sigma T_g^4 \tag{2}$$

gdzie σ oznacza stałą promieniowania ciała doskonale czarnego - $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. Występujące w tym wzorze emisyjności ϵ_{gi} gazu zależą od temperatury i od (pL)

$$\epsilon_{gi} = \epsilon_{gi}(p_i L, T_g) \tag{2a}$$

odpowiednie wykresy emisyjność CO_2 i H_2O (rys. 1) zostały opracowane przez Hottela i Egberta [6]. Dodać należy, że na rys. 1 przedstawiono wykresy wtórne za [20], [21], na których parametry podano w [at.cm] lub [kPa.m] i [°C], podczas gdy na wykresie oryginalnym [5] użyto innych jednostek - odpowiednio [atm.stopa] i stopni Rankina ($1^\circ\text{R} = 5/9 \text{ K}$).



Rys. 1. Emisyjność CO_2 i H_2O
 Fig. 1. Carbon dioxide and water vapour emissivity

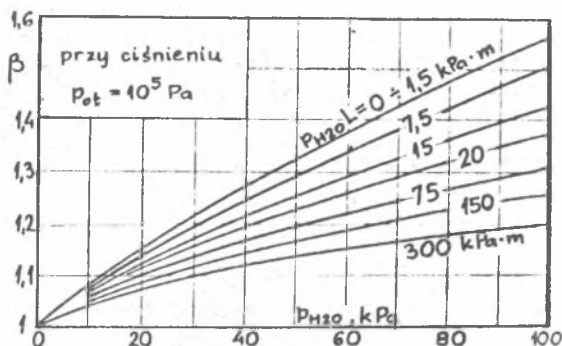
Emisyjność spalin, w których składnikami promieniującymi są CO_2 i H_2O , określa się z zależności:

$$\epsilon_g = C_{\text{CO}_2} \epsilon_{\text{CO}_2} + C_{\text{H}_2\text{O}} \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta \epsilon_g \tag{3}$$

gdzie czynniki C_i uwzględniają ciśnienie gazów - odpowiednie wykresy można znaleźć w literaturze [5, 9, 11, 26], a poprawka $\Delta \epsilon_g$ uwzględnia wzajemne przesłanianie się pasm emisji CO_2 i H_2O . Ciśnienie spalin zwy-

kle ma wartość zbliżoną do ciśnienia atmosferycznego, tj. ok. 100 kPa. Wówczas $C_C = 1$, a zamiast C_H stosuje się poprawkę β (rys. 2), [15], [20]. Ponadto można przyjąć:

$$\Delta \varepsilon_g \approx \varepsilon_{\text{CO}_2} \cdot \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}; \quad C_H = \beta \quad (4)$$



Rys. 2. Poprawka β do emisyjności pary wodnej
Fig. 2. Correction factor β for H_2O emissivity

Taki sposób określania emisyjności spalin jest szeroko stosowany w obliczeniach technicznych. Jednakże wyznaczanie składowych wzoru (3) z wykresów, wystarczające przy tradycyjnych obliczeniach wykonywanych za pomocą suwaka lub kalkulatora, nie jest dogodne w powszechnych obecnie obliczeniach komputerowych. W najlepszym przypadku sposób ten wymaga wczytywania obszernych ta-

bllic i stosowania podwójnej interpolacji, co znacznie rozbudowuje programy obliczeniowe.

2. FUNKCJE ANALITYCZNE OKREŚLAJĄCE EMISYJNOŚĆ GAZU

Wymienioną niedogodność można ominąć, jeżeli zastosuje się funkcje analityczne określające emisyjności promieniujących składników spalin. Funkcje te mogą np. wynikać z odpowiedniego przekształcenia wzorów A. Schacka (1) do postaci (2). Jeżeli wykorzystana się wzory podane w [17], to np. dla emisyjności CO_2 otrzymuje się zależność:

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 11,46 \frac{(pL)^{0,4}}{T^{0,8}} \quad (5)$$

którą można stosować w zakresie parametrów:

$$T = 773 - 2073 \text{ K } (500 - 800^\circ\text{C}), \quad p_{\text{CO}_2} L = 0,3 - 40,5 \text{ kPa}\cdot\text{m}$$

Podobny, choć zależnie od przyjętego pierwowzoru bardziej rozbudowany wzór, można ustalić dla H_2O . Wzory typu (5) są jednak stosunkowo mało dokładne [18]. Wynika to głównie stąd, że za pomocą jednej zależności starają się objąć cały zakres parametrów podanych na wykresach.

W literaturze znane są głównie trzy zestawy wzorów aproksymujących wykresy emisyjności CO_2 i H_2O . Pierwszy z nich, stosowany powszechnie w obliczeniach kotłów parowych [22], a opracowany przede wszystkim dla spalin powstałych z węgla kamiennego, został podany przez Gurwicza i Mitora [4]. Emisyjność spalin wyznacza się z zależności:

$$\epsilon_g = 1 - \exp(-k_g \sqrt{pL}), \quad (6)$$

gdzie współczynnik k_g wynosi:

$$k_g = (0,78 + 1,6 r_{H_2O} - 0,1 \sqrt{pL})(1 - 0,37 T/1000) \quad (7)$$

Do wzorów (6) i (7) należy podstawić pL w 10^5 Pa.m (w oryginalnej wersji podano at.m, ale różnica jest nieistotna), temperaturę T w kelwinach; r_{H_2O} oznacza udział (ułamek) H_2O w spalinach, gęstość optyczna (pL) dotyczy obu składników promieniujących

$$pL = p_{\Sigma} L, \quad p_{\Sigma} = p_{CO_2} + p_{H_2O} \quad (7a)$$

Podana zależność może według [1] być stosowana w następującym zakresie parametrów:

$$p_{\Sigma} L = 1,2 - 200 \text{ kPa.m}, \quad T = 700 - 1800 \text{ K}$$

$$p_{CO_2}/p_{H_2O} = 0,2 - 2$$

Wzór (6) można łatwo uzupełnić o człony uwzględniające promieniowania częściek stałych (popiołu i sadzy) zawartych w spalinach, jednak jego budowa uniemożliwia zróżnicowanie emisyjności i absorpcyjności spalin.

Drugi sposób analitycznego określania emisyjności CO_2 i H_2O podał K. Schack [18]. Podany przez niego algorytm jest dość złożony i niejednoznaczny, to znaczy funkcje dla emisyjności pary wodnej są innego typu niż dla emisyjności dwutlenku węgla. Metodę K. Schacka, zalecaną między innymi przez VDI [23], przedstawiają Mańka i Bandrowski [14], którzy przy okazji proponują własny, trzeba przyznać nie najprostszy, sposób określania emisyjności gazu i w dalszej konsekwencji radiacyjnego współczynnika wnikania ciepła.

Inne wzory aproksymujące dane Hottela podaje Leckner [13]. Sposób ten przedstawiają Wandrasz i Łuckoś [25]. Ze względu na swoją złożoność i małą przejrzystość jest on stosunkowo słabo rozpowszechniony.

Dla promieniowania pochodzącego od ciała stałego (ścianki) o temperaturze T_w , istotnie różniącej się od temperatury gazu T_g , absorpcyjność A_g zgodnie ze wzorami podanymi przez Hottela [5], [7] może znacznie odbiegać od emisyjności. Jak wiadomo, stosuje się wówczas zależność:

$$A_g(pL, T_g, T_w) = \epsilon_g(pL, T_w/T_g, T_w) \cdot (T_g/T_w)^n, \quad (8)$$

gdzie $n = 0,65$ dla CO_2 oraz $0,45$ dla H_2O .

Wzór (6) nawiązuje w swojej strukturze do postaci:

$$\xi_g = 1 - \exp[-k(t) \cdot (pL)], \quad (9)$$

przy czym, jak pokazują [7] i [3], ze względu na selektywność promieniowania emisyjność gazu jest ograniczona (tj. mniejsza od 1) nawet dla nieskończenie grubej warstwy gazu. Z tego powodu dla szerokiego przedziału wartości (pL) lepsze wyniki daje aproksymacja za pomocą sumy takich funkcji

$$\xi_g = \sum_{i=1}^n a_i [1 - \exp(-k_i \cdot pL)], \quad (10)$$

przy czym

$$a_0 + \sum a_i = 1; \quad a_0, a_i > 0, \quad (10a)$$

wielkość zaś $(1 - a_0)$ jest emisyjnością nieskończenie grubej warstwy gazu. W praktyce wystarczy suma dwóch lub najwyżej trzech wyrazów we wzorze (10), aby otrzymać zadowalająco dobrą przybliżenie. Jeżeli jednak aproksymacja dotyczy małego zakresu wartości (pL) i temperatury, to wystarczający może być jeden wyraz, pod warunkiem skorygowania wpływu (pL) . Takie właśnie rozwiązanie przyjęto w niniejszej pracy, mianowicie założono funkcję o postaci:

$$\xi_{gi} = 1 - \exp[-k_i(t) \cdot (pL)^n], \quad (11)$$

która w swej formie stanowi kompromis pomiędzy równaniami (6) i (9).

3. ZAKRES PARAMETRÓW (pL) I TEMPERATURY WYSTĘPUJĄCY W OBLICZENIACH PIECÓW GRZEWCZYCH

Cytowane wykresy [5], [21] podają emisyjności CO_2 i H_2O w bardzo szerokim zakresie parametrów. Wynosi on dla gęstości optycznej (pL) od ok. 0,03 do 200 kPa·m (dla CO_2) względnie od ok. 0,15 do 150, a nawet 600 kPa·m (dla H_2O), dla temperatury zaś od ok. 300 K (lub $0^\circ C$) do ok. 2800 K (lub $2500^\circ C$). Sama emisyjność gazu mieści się w przedziale 0,003 - ok. 0,25 (dla CO_2) oraz 0,007 - ok. 0,7 dla H_2O .

W obliczeniach pieców grzewczych tak duża zmienność parametrów nie występuje. Z reguły można przyjąć ciśnienie spalin na poziomie ciśnienia atmosferycznego, tj. ok. 100 kPa. Zawartość składników promieniujących (CO_2 i H_2O) zależy od rodzaju spalanej paliwa. Przyjmując nadmiar powietrza spalania $\lambda = 1,1$, otrzymuje się następujące udziały CO_2 i H_2O w spalinach wilgotnych (tabl. 1):

Tablica 1

Udziały CO_2 i H_2O w spalinach wilgotnych dla różnych paliw gazowych przy nadmiarze powietrza $\lambda = 1,1$. (udziały w %)

Rodzaj gazu	Udziały głównych składników w gazie						Udziały w spalinach	
	CH_4	H_2	CO	CO_2	N_2	inne	CO_2	H_2O
koksowniczy	22,3	51,8	12,2	4,8	5,9	3,0	8,6	20,9
ziemny	98,4	-	-	0,2	1,2	0,2	8,7	18,2
wielkopiecowy	0,3	2,0	28,5	11,0	58,0	0,2	23,4	3,3
mieszankowy (30% koks + 70% wkp)	6,9	16,9	23,6	9,1	42,4	1,1	14,9	13,5

Przyjęto zawilżenie molowe powietrza średnio 1% oraz zawilżenie gazów wielkopiecowego i mieszankowego 2%.

Z wyjątkiem czystego gazu wielkopiecowego, spalane go bez wzbogacania wyjątkowo rzadko, udziały te wahają się w przedziale 10 - 20%. Tyle również liczbowo, tj. 10 - 20 kPa, wynosi ciśnienie składnikowe tych gazów w spalinach. Jedynie dla spalin czystego gazu wielkopiecowego udział H_2O spada do ok. 3,5%, co w decydującym stopniu wpływa na osłabienie ich emisyjności i zmniejszenie radiacyjnej wymiany ciepła. Najczęściej jednak spalane są różne mieszanki i wówczas udziały CO_2 i H_2O mieszczą się w przedziale 10 do 16%.

Drugim czynnikiem jest średnia grubość warstwy promieniujących spalin. W obliczeniach technicznych wyznacza się ją w sposób przybliżony [5]

$$L = 3,6 \frac{V}{F}, \quad (12)$$

gdzie V oznacza objętość spalin w komorze pieca, zaś F łączną powierzchnię ścian i wsadu zawartego w tej komorze. Jeżeli przyjmuje się stosunkowo dużą komorę pieca wgłębnego o rozmiarach 10x4x3 m, to dla pustej komory daje to objętość $V_1 = 120 \text{ m}^3$ i powierzchnię ścian $F_1 = 164 \text{ m}^2$; ze wzoru (12) otrzymuje się $L_1 \approx 2,63 \text{ m}$. Umieszczenie w tej komorze 10 wlewków o rozmiarach 0,8 x 0,8 x 2 m zmienia objętość do $V'_1 = 107,2 \text{ m}^3$ i powierzchnię do $F'_1 = 228 \text{ m}^2$, co daje $L'_1 = 1,69 \text{ m}$.

Podobny szacunek dla innych komór pieców, głównie wgłębnych i przepychowych, pokazuje, że średnia grubość promieniującej warstwy spalin mieści się najczęściej w granicach 1 - 3 m. Nader rzadko jest większa (do ok. 4 m) i jedynie w bardzo małych piecach jest mniejsza od 1 m (w granicach do 0,5 m). Tak więc jako typową dla większości pieców można przyjąć grubość warstwy spalin w granicach $L = 1 - 3 \text{ m}$. Ta wartość daje gęstość optyczną w przedziale $(pL) = 10 - 60 \text{ kPa}\cdot\text{m}$, z małym prawdopodobieństwem przekroczenia tych wartości do ok. 5 względnie 70 - 80 $\text{kPa}\cdot\text{m}$; skrajne wartości mogą dotyczyć głównie pary wodnej. W wyniku powyższej analizy

przyjęto, że istotne jest aproksymowanie wykresów w zakresie:

$$(pL) = (5) - 10 - 80 \text{ kPa.m}$$

dla obu rozpatrywanych gazów. Dla większej przydatności zdecydowano się rozszerzyć ten zakres i wykorzystać podane na wykresach wartości (pL) w granicach 1 - 200 kPa.m.

Zakres temperatury spalin w piecach grzewczych wynika z samej ich natury. Praktycznie temperatura spalin mieści się najczęściej w przedziale 1000 - 1300°C, rzadko osiąga wartość wyższą (do ok. 1400°C) i jedynie podczas nagrzewania wsadu zimnego jest ona w początkowym okresie niższa. Niższa temperatura spalin (rzędu 800°C) występuje również w konwekcyjnych strefach pieców przepychowych i pokrocznych. Z tego powodu do aproksymacji przyjęto zakres temperatury spalin:

$$t = 800 - 1400^{\circ}\text{C} \quad (1073 - 1673 \text{ K})$$

O przyjęciu dolnej granicy (tj. 800°C) zadecydował również fakt, że poniżej tej temperatury emisyjność CO_2 dla dużych wartości (pL) maleje i zmienia się w sposób nieregularny (patrz rys. 1). Przedstawiona analiza pozwoliła określić aproksymowany obszar wykresów z rys. 1, został on na nim zaznaczony.

4. SPOSÓB APROKSYMACJI WYKRESÓW

Z odpowiednio powiększonych wykresów (wziętych z [21] i częściowo z [5]) odczytano dla podanego zakresu parametrów emisyjność CO_2 i H_2O dla temperatur 800 ÷ 1400°C (co sto stopni) oraz podanych na wykresach gęstości optycznych $(pL = 1, 2, \dots, 4, 5 \dots, 10, 15, 20, 30 \dots, 100, 150 \text{ i } 200 \text{ kPa.m})$.

Następnie z przekształconej zależności (11) wyznaczano najpierw współczynnik $k(t)$

$$k(t) = \frac{\ln[1/(1 - \varepsilon)]}{(pL)^n} \quad (13)$$

dla danych wartości $\varepsilon(pL, t)$ i przyjętego wykładnika n . Wstępna analiza [12] pokazała, że dla CO_2 współczynnik ten dla $n = 1/3$ mało zależy od wartości (pL) . Podobny wynik dla H_2O dał wykładnik $n = 0,5$; w każdym z tych przypadków występowała wyraźna zależność k od temperatury. Zależność ta jest prawie liniowa, zdecydowano się więc na przybliżenie współczynnika $k(t)$ funkcją:

$$k(t) = ka + kb' \cdot t \quad (14)$$

Jako końcowe rozwiązanie przyjęto zależności dla takiego wykładnika n , dla którego suma kwadratów odchyłek wartości obliczonych za pomocą wzoru (11) i odczytanych z wykresów (wprowadzonych do obliczeń) jest najmniejsza.

Pełna aproksymacja wymagała również analitycznego przybliżenia czynnika β z rys. 2. Dla ciśnienia składnikowego p_{H_2O} w zakresie od 20 - 25 kPa jest to w przybliżeniu pęk prostych o zmiennym nachyleniu, wychodzących z punktu o wartości $\beta(0) = 1$. Przyjęto więc funkcję:

$$\beta = 1 + a(pL) \cdot p_{H_2O} \quad (15)$$

przy czym współczynnik nachylenia $a(pL)$ można ująć następująco:

$$a(pL) = a_1 - a_2 \sqrt{p_{H_2O} L} \quad (a)$$

Ostatecznie przyjęto zależność [10]:

$$\beta = 1 + (0,76 - 0,0328 \sqrt{p_{H_2O} L}) \cdot p_{H_2O} / 100, \quad (15a)$$

która może być stosowana w zakresie:

$$p_{H_2O} = 0 - 20 \text{ (25) kPa}, \quad p_{H_2O} L = 0 - 100 \text{ kPa.m}$$

Do wzoru (15) podstawią się ciśnienie p_i oraz gęstość optyczną $p_i \cdot L$ w wymienionych jednostkach, tj. kPa oraz kPa.m. Zdecydowano się na to ze względów praktycznych: jednostki te dominują obecnie na wykresach, ponadto dla ciśnienia spalin 100 kPa udział pary wodnej (względnie CO_2) w spalinach wyrażony w % jest liczbowo równy ciśnieniu składnikowemu wyrażonemu w kPa. Te same jednostki dla (pL) , tj. kPa.m, są również używane we wzorach na emisyjność CO_2 i H_2O .

5. REZULTATY - ZALEŻNOŚCI APROKSIMUJĄCE EMISYJNOŚĆ DWUTLENKU WĘGLA I PARY WODNEJ

Obliczenia wykonano zgodnie z podanym schematem. Ze względu na dużą zmienność parametrów i samej emisyjności zdecydowano się wyznaczyć poszukiwane funkcje w zawężonych, niekiedy zachodzących na siebie przedziałach wartości (pL) , dzięki czemu dokładność przybliżenia jest większa. Wykładnik n , dla którego średnie odchylenie kwadratowe jest najmniejsze, potraktowano jako rozwiązanie. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 2. Wszystkie wartości obowiązują w zakresie $t = 800 \div 1400^\circ C$.

Tablica 2

Współczynniki funkcji aproksymacyjnej (11) i (14)
dla zakresu temperatury 800 - 1400°C

Zakres (pL) kPa.m	n	Współczynniki wzoru (14)		Średnia względ- na odchyłka w %
		ka	kb	
		a) dwutlenek węgla - CO ₂		
70 - 200	0,310	0,07350	- 0,02081	1,7
10 - 80	0,314	0,07791	- 0,02573	2,1
4 - 10	0,374	0,07613	- 0,03038	1,3
0,93 - 5	0,391	0,07814	- 0,03321	1,5
0,1 - 1	0,614	0,08697	- 0,04108	3,6
		b) para wodna		
70 - 200	0,395	0,09700	- 0,03809	1,1
10 - 80	0,530	0,05729	- 0,02375	2,5
4 - 10	0,692	0,04210	- 0,01979	2,5
1 - 5	0,805	0,03944	- 0,02048	3,8
4 - 100	0,554	0,05274	- 0,02289	4,8

Do wzorów

$$\xi = 1 - \exp \left[- k(t) \cdot (pL)^n \right], \quad (11)$$

gdzie

$$k(t) = k_a + k_b \cdot (t/1000), \quad (14)$$

należy podstawiać temperaturę t w °C oraz (pL) w kPa.m, aby wyznaczyć emisyjność gazu. Podane w tablicy 2 wartości różnią się liozbwo nieznacznie od wyznaczonych wcześniej [10]. Różnice wynikają ze skorygowania kilku odczytów i ujednocnienia zakresów aproksymacji.

Dokładność otrzymanych formuł można uznać za dobrą. Średnie odchyłki pomiędzy wielkościami odczytanymi z wykresów (rys. 1) i wprowadzonymi do programu obliczeniowego jako dane oraz obliczonymi za pomocą wzorów (11), (14) nie przekraczają 2 - 2,5%. Największe lokalne odchyłki występują dla CO₂ w pobliżu temperatury 800°C dla $pL \geq 100$ kPa.m. Dochodzą one do $\Delta \xi = 0,01$, co stanowi około 4% emisyjności mającej tu wartość rzędu 0,24.

Dla oceny dokładności proponowanej aproksymacji wykonano dodatkowo obliczenia emisyjności spalin, scharakteryzowanych w tablicy 3. Obliczono emisyjności dla temperatur: 800, 1100 i 1400°C

- 1) na podstawie bezpośrednich odczytów z wykresów i wzorów (3), (4),
- 2) na podstawie proponowanej aproksymacji i wzorów (3), (4),
- 3) według wzoru Gurwicza (6), (7).

Dla 15 w ten sposób analizowanych punktów średnia odchyłka w stosunku do wartości wynikających z bezpośredniego odczytu (sposób 1) wynosi: w sposobie 2 - 0,0029, zaś w sposobie 3 - 0,0173, co stanowi odpowiednio ok. 1 i 6% przeciętnej emisyjności. Odchyłki emisyjności składników (CO_2 i H_2O) są nieco większe i wynoszą przeciętnie ok. 1,7%; widać, że przy obliczaniu emisyjności spalin błędy częściowo się znoszą (ta uwaga dotyczy tylko sposobu 2). Wzór Gurwicza daje przeważnie wartości zawyżone. Są one zbliżone do wartości wynikających ze wzoru (3) dla $\Delta \varepsilon_g = 0$.

Tablica 3

Charakterystyczne parametry analizowanych spalin

Spaliny	a	b	c	d	e	
P_{CO_2} L	10	40	5	5	80	kPa.m
$P_{\text{H}_2\text{O}}$ L	15	40	8	8	200	kPa.m
$P_{\text{H}_2\text{O}}$	20	20	10	20	20	kPa

Uwaga: Założono $p_{\text{sp}} = 100$ kPa, czyli $r_{\text{H}_2\text{O}} = p_{\text{H}_2\text{O}}/100$.

6. UWAGI KOŃCOWE

Proponowana aproksymacja umożliwia analityczne wyznaczanie emisyjności spalin z dokładnością zadowalającą w obliczeniach technicznych (przeciętna odchyłka ok. 1% w zakresie temperatury 800 - 1400°C, maksymalna odchyłka ok. 4%). Dokładność ta jest wyraźnie lepsza niż osiągnięta za pomocą wzoru Gurwicza, ponadto umożliwia wyznaczanie emisyjności każdego z promieniujących składników. Wszystko to jednak dotyczy modelu gazu szarego lub co najwyżej tzw. "szarego - nieszarego" (dla $\varepsilon_g \neq A_g$), który stosuje się dla bardzo zróżnicowanego pola temperatury. Jeżeli model gazu szarego jest niewystarczający, to emisyjność gazu wyznacza się za pomocą modelu pasmowego (np. [24]). Jest to jednak podejście wymagające znacznie obszerniejszej procedury obliczeniowej.

LITERATURA

- [1] Błoch A.G.: *Tiepłobmien w topkach parowych kotłów*, Energoatomizdat, Leningrad 1984.
- [2] Eckert E.: *Messung der Gesamtstrahlung von Wasserdampf und Kohlensäure in Mischung mit nichtstrahlenden Gasen bei Temperaturen bis zu 1300°C*. VDI-Vorschungsheft 387, 1937.
- [3] Gray W.A., Müller R.: *Engineering Calculations in Radiative Heat Transfer*, Pergamon Press, Oxford 1974.

- [4] Gurwicz A.M., Mitor W.W.: Izłuczenije dymownych gazow, Tieploenergetika, 1955, nr 12, s. 28.
- [5] Hottel H.C.: Radiant-Heat Transmission, in Mc. Adams W.: Heat Transmission Mc Graw-Hill New York 1954.
- [6] Hottel H.C., Egbert R.B.: The Radiation of Furnace Gases Trans. ASME, 1941, s. 297.
- [7] Hottel H.C., Sarofim A.F.: Radiative Transfer, Mc-Graw-Hill, New York 1967.
- [8] Isaczenko W.P., Osipowa W.A., Sukomieł A.S.: Heat Transfer. Mir Publishers, Moskwa 1977.
- [9] Jakob M.: Heat Transfer, vol. 2, J. Wiley, New York 1956.
- [10] Kostowski E., Fic A., Stefanik J.: Określenie modelu matematycznego nagrzewania wsadu w piecach węglanych. Praca NB-427/RME-3/74/75, ITC Pol. Śl. 1975 (niepublikowana).
- [11] Kostowski E.: Przepływ ciepła. Skrypt Pol. Śl., Gliwice 1986.
- [12] Kuś J. (1971); Goncerz A., Hamerlak H. (1973): Aproksymacje emisyjności CO_2 i H_2O za pomocą funkcji analitycznych - prace przejściowe wykonane pod kierunkiem autora (niepublikowane).
- [13] Leckner B.: Spectral and total emissivity of water vapour and carbon dioxide, Combustion and Flame v. 19, 1972.
- [14] Mańka H., Bandrowski J.: Zastępczy współczynnik wnikania ciepła gazów promieniujących, Inż. i Aparatura Chem., 1973, Nr 3, s. 6.
- [15] Michiejew M.A.: Zasady wymiany ciepła. PWN, Warszawa 1953
- [16] Schack A.: Über die Strahlung der Feuergase und ihre praktische Berechnung, Z. techn. Phys., 1924, s. 267.
- [17] Schack A.: Der Industrielle Wärmeübergang, Stahleisen, Düsseldorf 1957.
- [18] Schack K.: Berechnung der Strahlung von Wasserdampf und Kohlendioxid, Chemie-Ing.-Technik, Bd. 42, 1970 Nr 2, s. 53.
- [19] Schmidt E.: Messung der Gesamtstrahlung des Wasserdampfes bei Temperaturen bis 1000°C, Forsch. Gebiete Ingenieurwes., 1932, s. 57.
- [20] Staniszewski B.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1979.
- [21] Tieplotechniczeskij sprawocznik t. II, Energia, Moskwa 1976.
- [22] Tieplowyj rasczet kotielnych agregatow - normatiwnyj metod. Energia, Moskwa 1973.
- [23] VDI - Warmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, VDI-Verlag, Düsseldorf 1984.
- [24] Wandrasz J.: Pasmowy model matematyczny przepływu energii przez promieniowanie w piecu komorowym, ZN Pol. Śl., s. Energetyka z. 58, Gliwice 1976.
- [25] Wandrasz J., Łuckoś A.: Wpływ poprawki uwzględniającej nakładanie się pasm emisji na obliczenia wymiany energii promieniowaniem. ZN Pol. Śl., s. Energetyka z. 82, Gliwice 1983, s. 5.
- [26] Wiśniewski S.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1979.

Recenzent: Doc. dr inż. Antoni Guzik

Wpłynęło do redakcji w kwietniu 1985 r.

АПРОКСИМАЦИЯ ДИАГРАММОВ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СТЕПЕНЬ ЧЕРНОТЫ CO_2 И H_2O
ПРИ ПОМОЩИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Р е з ю м е

Представлены аналитические функции, которыми описывается степень черноты CO_2 , H_2O и дымовых газов. Анализирован предел параметров выступающих в практических расчётах нагревательных печей. Предложена функция формулы 11 и 14, которой можно аппроксимировать степень черноты этих газов и в таблице 2 для предела температуры 800 до 1400°C даны её коэффициенты. Предлагаемые формулы удобны для компьютерных тепловых расчётов нагревательных печей.

ANALYTICAL APPROXIMATION OF THE CO_2 AND H_2O
EMISSIVITY DIAGRAMS

S u m m a r y

The analytical functions describing the emissivity of CO_2 , H_2O and furnace gases are discussed. The range of parameter values occurring in the thermal calculations of the heating furnaces is analysed. For approximation of the emissivity diagrams a function (formulae 11 and 14) is proposed with coefficients (given in table 2) valid in the temperature range of 800 to 1400°C. The proposed approximation is useful in the heat transfer computer calculations of heating furnaces.