

Marek PRONOBIS

DOKŁADNOŚĆ OBLICZEŃ RADIACYJNEJ WYMIANY CIEPŁA OD SPALIN DO POWIERZCHNI RUR KOTŁOWYCH PĘCZKÓW KONWEKCYJNYCH

Streszczenie. Przeanalizowano dokładność istniejących metod obliczania radiacyjnej wymiany ciepła między zapyłonymi spalinami i powierzchnią rur w części konwekcyjnej kotłów. Zaproponowano modyfikacje sposobu obliczeń prowadzące do uzyskania większej dokładności wyników. Przedstawiono ponadto dokładniejszy sposób obliczania grubości promieniującej warstwy spalin w kotłowych pęczkach konwekcyjnych.

EXACTITUDE OF CALCULATION OF THE RADIATION HEAT TRANSFER BETWEEN FURNACE GASES AND BOILER SURFACES

Summary. The exactitude of existing calculation methods for the thermal radiation heat transfer in boiler convective surfaces has been analysed. The analysis has been carried out for the furnace gases with and without fly ash content. The modification of the calculation method has been described. New correlations for the equivalent radius calculation have been presented.

ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТОВ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ В КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

Резюме. В статье представлен анализ точности методов расчета теплообмена излучением между запыленным или незапыленным потоком дымовых газов и стенками пучков конвективной части парогенераторов. Показан способ улучшения метода расчета. Представлены новые соотношения для расчета средней длины пути луча для котельных пучков различной формы.

1. MAKSYMALNY BŁĄD WZGLĘDNY OBLICZEŃ RADIACYJNEGO WSPÓŁCZYNNIKA WNIKANIA CIEPŁA

Intensywność radiacyjnego przepływu ciepła w konwekcyjnej części kotła jest determinowana przez emisyjność i absorpcyjność spalin zawierających CO_2 i H_2O oraz cząstki lotnego popiołu, jak również przez emisyjność zewnętrznych powierzchni rur. Stosując model gazu nieszarego można radiacyjny współczynnik wnikania ciepła wyznaczyć z zależności:

$$\alpha_{1r} = C_s a_{\dot{s}c} \epsilon_{sp} T_{sp}^3 \frac{1 - \frac{A_{sp}}{\epsilon_{sp}} \left(\frac{T_{\dot{s}c}}{T_{sp}} \right)^4}{1 - T_{\dot{s}c}/T_{sp}} \quad (1)$$

Wykorzystując do określenia dokładności wzoru (1) zależność, zgodnie z którą błąd względny wielkości $y = f(x_1, x_2, \dots)$ można obliczyć jako [1]:

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{x_1}{f(x_1, x_2, \dots)} \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \left(\frac{\Delta x_1}{x_1} \right) + \frac{x_2}{f(x_1, x_2, \dots)} \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \left(\frac{\Delta x_2}{x_2} \right) + \dots \quad (2)$$

uzyskano:

$$\frac{\Delta \alpha_{1r}}{\alpha_{1r}} = \frac{\Delta a_{\dot{s}c}}{a_{\dot{s}c}} + \frac{\Delta \epsilon_{sp}}{\epsilon_{sp}} + X_{A_{sp}/\epsilon_{sp}} \frac{\Delta(A_{sp}/\epsilon_{sp})}{A_{sp}/\epsilon_{sp}}, \quad (3)$$

gdzie

$$X_{A_{sp}/\epsilon_{sp}} = \frac{(A_{sp}/\epsilon_{sp}) (T_{\dot{s}c}/T_{sp})^4}{1 - (A_{sp}/\epsilon_{sp}) (T_{\dot{s}c}/T_{sp})^4} \quad (4)$$

W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że maksymalna wartość wagi błędu $X_{A_{sp}/\epsilon_{sp}}$ wynosi około 0,1 dla $T_{\dot{s}c}/T_{sp} = 0,5$ i $A_{sp}/\epsilon_{sp} = 1,7$ oraz około 0,7 dla $T_{\dot{s}c}/T_{sp} = 0,8$ i $A_{sp}/\epsilon_{sp} = 1,02$.

2. MAKSYMALNY BŁĄD WYZNACZANIA ZASTĘPCZEJ EMISYJNOŚCI ŚCIANKI

Zastępcza emisyjność ścianki opisana jest wzorem [2]:

$$a_{\dot{c}} = \frac{\epsilon_{\dot{c}}}{A_{sp} + \epsilon_{\dot{c}} - A_{sp} \epsilon_{\dot{c}}} \quad (5)$$

Wzór ten można przekształcić do postaci:

$$a_{\dot{c}} = \frac{1}{A_{sp}/\epsilon_{\dot{c}} + 1 - A_{sp}} \quad (6)$$

dla której błąd względny zgodnie z zależnością (2) opisany jest równaniem:

$$\frac{\Delta a_{\dot{c}}}{a_{\dot{c}}} = X_{A_{sp}/\epsilon_{\dot{c}}} \frac{\Delta(A_{sp}/\epsilon_{\dot{c}})}{A_{sp}/\epsilon_{\dot{c}}} + X_{A_{sp}} \frac{\Delta A_{sp}}{A_{sp}} \quad (7)$$

gdzie

$$X_{A_{sp}/\epsilon_{\dot{c}}} = \frac{A_{sp}/\epsilon_{\dot{c}}}{A_{sp}/\epsilon_{\dot{c}} + 1 - A_{sp}} \quad (8)$$

oraz

$$X_{A_{sp}} = \frac{A_{sp}}{A_{sp}/\epsilon_{\dot{c}} + 1 - A_{sp}} \quad (9)$$

Z obliczeń autora wynika, że dla warunków kotłowych maksymalne wartości wag błędów wynoszą: $X_{A_{sp}/\epsilon_{\dot{c}}} \approx 0,7$ i $X_{A_{sp}} \approx 0,4$. Błąd względny $\Delta A_{sp}/A_{sp}$ jest sumą

błędu wykresów Hottela oraz błędu ich aproksymacji. W pracy [8] określono błąd wykresów jako $\pm 5\%$, natomiast błędy aproksymacji wynoszą: 20% dla [3], 7% dla [7] i 4% dla metody [9].

Błąd stosunku ($A_{sp}/\epsilon_{\dot{c}}$)

$$\frac{\Delta(A_{sp}/\epsilon_{śc})}{A_{sp}/\epsilon_{śc}} = \frac{\Delta A_{sp}}{A_{sp}} + \frac{\Delta \epsilon_{śc}}{\epsilon_{śc}} \quad (10)$$

Jako błąd $\epsilon_{śc}$ przyjmując można sumę błędów pomiaru tej wielkości, jakimi obarczone są dane tablicowe oraz zakresu naturalnej zmienności emisyjności powierzchni rur w trakcie pracy kotła. Obie te wielkości są trudne do ustalenia, w związku z czym założono orientacyjnie, że $\Delta \epsilon_{śc}/\epsilon_{śc} = 5\%$. Podstawiając podane wielkości do wzoru (7) uzyskano wyniki zamieszczone w tabelicy 1.

Tablica 1
Porównanie dokładności obliczeń zastępczej emisyjności ścianki

Nr	$\Delta A_{sp}/A_{sp}$	$\frac{\Delta(A_{sp}/\epsilon_{śc})}{A_{sp}/\epsilon_{śc}}$	$\Delta a_{śc}/a_{śc}$	Źródło A_{sp}
a	0,05	0,1	0,09	Hottel
b	0,12	0,17	0,167	[7]
c	0,25	0,3	0,31	[3]
d	0,09	0,14	0,134	[9]

Wzór (5) można przybliżyć uproszczoną zależnością (zalecaną w [3])

$$a_{śc} = \frac{\epsilon_{śc} + 1}{2} \quad (11)$$

Jednak dokładność tego przybliżenia w warunkach kotłowych jest niezadowalająca, powoduje bowiem powstanie dodatkowego błędu sięgającego 8%.

3. DOKŁADNOŚĆ OKREŚLENIA EMISYJNOŚCI I ABSORPCYJNOŚCI SPALIN NIEZAPYLONYCH

W przypadku niezapylonych spalin kotłowych gazami promieniującymi są CO_2 i H_2O . Znikomą ilość SO_2 dodaje się na ogół do CO_2 . W szczególnych przypadkach (np. kotły odzysknicowe zainstalowane w ciągu technologicznym produkcji kwasu siarkowego) skład spalin może być inny, np. z przewagą SO_2 .

Podstawą stosowanych w technice kotłowej metod obliczania emisyjności i absorpcyjności spalin są wyniki badań Hottela i Egberta, przedstawione w formie wykresów [4,5]

$$\epsilon = f(T_{\text{sp}}, p, s) \quad (12)$$

dla H_2O i CO_2 . Odpowiednie wykresy istnieją również dla innych gazów (SO_2 , CH_4 , NH_3 [6]). Dokładność tych badań określa się na $\pm 5\%$ [8].

Absorpcyjność gazów wyznacza się z tych samych wykresów jako:

$$A = \epsilon \left(T_{\text{śc}}, p, s \frac{T_{\text{śc}}}{T_{\text{sp}}} \right) \left(\frac{T_{\text{sp}}}{T_{\text{śc}}} \right)^n \quad (13)$$

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

Emisyjność i absorpcyjność pary wodnej odczytaną z wykresu mnoży się przez związany z ciśnieniem czynnik β , zaś dla wyznaczenia ϵ i A dla mieszaniny obu gazów należy uwzględnić nakładanie się pasm CO_2 i H_2O , tzn.:

$$\epsilon_{\text{sp}} = \beta \epsilon_{\text{H}} + \epsilon_{\text{C}} - \beta \epsilon_{\text{H}} \epsilon_{\text{C}} \quad (14)$$

$$A_{\text{sp}} = \beta A_{\text{H}} + A_{\text{C}} - \beta A_{\text{H}} A_{\text{C}} \quad (15)$$

Wyniki badań w wersji graficznej nie nadają się do obliczeń maszynowych w związku z czym w literaturze znaleźć można szereg aproksymacji, które z mniejszą lub większą dokładnością przybliżają wykresy Hottela. Największe rozpowszechnienie znalazły: aproksymacja Schacka [7], zalecana przez normy [6] oraz aproksymacja Gurwicza i Mitora [8], propagowana w normach [3] - załącznik 3.

Aproksymacja [7] pozwala określić absorpcyjność i emisyjność dwutlenku węgla i pary wodnej z dokładnością rzędu $\pm 7\%$, wymagając przy tym stosowania dość skomplikowanych wzorów - załącznik 1.

Rozpowszechniona w kraju metoda [8] stosuje do wyznaczania α_{1r} model gazu nieszarego, przy czym dla uproszczenia zakłada, że

$$A_{sp}/\epsilon_{sp} = (T_{\dot{sc}}/T_{sp})^{-0,4} \quad (16)$$

W związku z tym wzór (1) przyjmuje postać:

$$\alpha_{1r} = C_s a_{\dot{sc}} \epsilon_{sp} T_{sp}^3 \frac{1 - (T_{\dot{sc}}/T_{sp})^{3,6}}{1 - T_{\dot{sc}}/T_{sp}} \quad (17)$$

Z obliczeń przeprowadzonych przez autora dla następujących zakresów zmiennych, typowych dla techniki kotłowej: $T_{sp} = 700$ do 1350 K, $T_{\dot{sc}} = 500$ do 850 K, $r_H = 0,11$ do $0,22$, $r_R = 0,08$ do $0,15$ oraz $s = 0,1$ do $1,25$ m wynika, że błąd takiego przybliżenia w stosunku do obliczeń wykonanych metodą Hottela sięga 20% . Biorąc pod uwagę, że zarówno emisyjność, jak i absorpcyjność wyznaczone metodą Hottela, obarczone są błędem rzędu 5% : przybliżenie (16) może dawać łączny błąd sięgający:

$$\frac{\Delta(A_{sp}/\epsilon_{sp})}{A_{sp}/\epsilon_{sp}} = 30\%$$

Z zestawienia podanego w [7] wynika, że aproksymacja [8] daje wyniki różniące się od danych Hottela i Eckerta od -7% do $+20\%$ dla parametrów spalin występujących w konwekcyjnej części kotła. W efekcie maksymalny błąd względny przy zastosowaniu aproksymacji Gurwicza i Mitora, z uwzględnieniem niedokładności danych Hottela wynosi:

$$\Delta\epsilon_{sp}/\epsilon_{sp} = 0,25$$

Dość znaczne niedokładności omawianych aproksymacji skłaniają do poszukiwania nowych zależności o większej dokładności. Aproksymacja Sharana [2] daje

wyniki o dokładności podobnej jak w metodzie Schacka, jest jednak prostsza obliczeniowo. Na uwagę zasługuje natomiast aproksymacja Kostowskiego [9] o błędzie nie przekraczającym 4% - załącznik 2.

4. OSZACOWANIE BŁĘDÓW OBLICZANIA α_{1r} DLA SPALIN NIEZAPYLONYCH

Porównano dokładność trzech podanych niżej metod wykorzystując wzory (3) i (4). Wyniki zestawiono w tabelicy 2. Porównywane metody to:

- metoda Hottela dla określenia emisyjności i absorpcyjności spalin, wartość $a_{śc}$ wg wzoru (5),
- emisyjność i absorpcyjność spalin aproksymowana metodą Schacka, $a_{śc}$ wg wzoru (5),
- emisyjność i absorpcyjność spalin aproksymowana metodą Gurwicza i Mitora, wartość $a_{śc}$ wg wzoru [11].

Tabela 2

Porównanie dokładności obliczeń radiacyjnego współczynnika wnikania ciepła dla spalin niezapylonych

Nr	$\frac{\Delta a_{śc}}{a_{śc}}$	$\frac{\Delta \epsilon_{sp}}{\epsilon_{sp}} = \frac{\Delta A_{sp}}{A_{sp}}$	$X_{A_{sp}/\epsilon_{sp}}$	$\frac{\Delta(A_{sp}/\epsilon_{sp})}{A_{sp}/\epsilon_{sp}}$	$\frac{\Delta(A/\epsilon)}{A/\epsilon}$	$\frac{\Delta \alpha_{1r}}{\alpha_{1r}}$
a	0,09	0,05	0,7	0,1	0,07	0,21
b	0,167	0,12	0,7	0,24	0,168	0,455
c	0,31	0,25	0,7	0,3	0,21	0,77
d	0,134	0,09	0,7	0,18	0,126	0,35

W obliczeniach uwzględniono, że błąd względny stosunku A_{sp}/ϵ_{sp} jest sumą błędów względnych obu występujących w nim wielkości.

Z podanego zestawienia wynika, że maksymalne błędy względne przy obliczaniu radiacyjnego współczynnika wnikania ciepła są znaczne, sięgające kilkudziesięciu procent, przy czym najmniej dokładna jest metoda stosowana dotąd powszechnie w krajowej technice kotłowej [3].

Najwyższą dokładność można uzyskać posługując się przy obliczaniu emisyjności i absorpcyjności spalin aproksymacją Kostowskiego oraz wzorem (5) przy wyznaczaniu $a_{\dot{s}c}$ - tablica 2, metoda "d".

5. DOKŁADNOŚĆ OKREŚLENIA EMISYJNOŚCI PYŁU

Obecność pyłu podwyższa emisyjność i absorpcyjność spalin. Promieniowanie mieszanin pyłowo-gazowych jest zjawiskiem na tyle skomplikowanym, że obliczenie intensywności radiacyjnego przepływu ciepła przy obecnym stanie wiedzy możliwe jest jedynie przy założeniu gazu szarego, tzn. równości emisyjności i absorpcyjności. Wzór (1) dla takiego przypadku ma postać:

$$\alpha_{1r} = C_s a_{\dot{s}c} \epsilon_{sp} T_{sp}^3 \frac{1 - (T_{\dot{s}c}/T_{sp})^4}{1 - T_{\dot{s}c}/T_{sp}} \quad (18)$$

Emisyjność zapyłonej strugi, zgodnie z prawem Beera, opisuje wzór:

$$\epsilon_{sp} = 1 - \exp(-k_r p s) \quad , \quad (19)$$

w którym k_r jest współczynnikiem osłabienia promieniowania będącym sumą odpowiednich współczynników dla promieniujących składników gazowych i pyłu

$$k_r = k_g + k_p \quad (20)$$

Przy założeniu gazu szarego emisyjność spalin wyznaczyć można również z zależności:

$$\epsilon_{sp} = \epsilon_p + \epsilon_g - \epsilon_p \epsilon_g \quad (21)$$

Emisyjność składników gazowych wyznacza się w sposób opisany w poprzednim rozdziale, wykorzystując odpowiednie wykresy lub ich aproksymacje. Dla określenia emisyjności pyłu w technice kotłowej stosowane są dwie metody: radziecka, zalecana przez [3] i metoda VDI [6] oparta na badaniach [10].

Metoda [3] posługuje się bezpośrednio wzorem (19), przy czym współczynnik k_p opisuje zależność:

$$k_p = \frac{43000 \mu_p}{\sqrt[3]{T_{sp}^2 d_p^2}} \quad 1/(m \text{ MPa}) \quad (22)$$

Występująca we wzorze koncentracja pyłu μ_p podawana jest w kg/m_n^3 . Średnią (po jednostkowej powierzchni) średnicę cząstek pyłu zaleca się przyjmować dla palenisk pyłowych wyposażonych w młyny średnio-i szybkobieżne jako $16 \mu m$, zaś dla rusztowych $20 \mu m$. Metody nie stosujące do obliczania emisyjności gazów wzoru Beera (Hottel, [6]) wymagają zastosowania zależności (21).

Zalecenia norm [6] opierają się na wynikach badań podanych w [10].

Autorzy tej pracy dla określenia emisyjności pyłu posługują się wzorem Beera o postaci:

$$\epsilon_p = 1 - \exp(-a_v A B s), \quad (23)$$

gdzie:

a_v - współczynnik emisji pyłu,

A - jednostkowa powierzchnia pyłu, m^2/kg ,

B - rzeczywista koncentracja pyłu, kg/m^3 ,

$a_v A$ - jednostkowa powierzchnia emisji, m^2/kg .

Wartości $a_v A$ podawane są w odpowiedniej tablicy i dla palenisk granulacyjnych zmieniają się od 9,3 do 24,5 m^2/kg (wartość średnia 19 m^2/kg). W wyniku badań stwierdzono, że jednostkowa powierzchnia emisji nie zależy od temperatury spalin, co jest w sprzeczności ze wzorem (22), natomiast podobnie jak w badaniach radzieckich stwierdzono zależność $a_v A = f(d_p^{-2/3})$. Dokładność wyznaczenia emisyjności pyłu metodą [10] określono na $\pm 10\%$.

Analizując wyniki obliczeń przeprowadzonych za pomocą obu metod stwierdza się znaczne rozbieżności. Wynikają one już z danych wyjściowych: średnie średnice ziaren pyłu uzyskane w badaniach [10] dla kilkudziesięciu przypadków są bardzo różne (zmiennosc d_p od 6 do 29 μm tylko dla palenisk granulacyjnych), co jest w sprzeczności z zalecaną w [3] wartością $16 \mu m$ dla węgla kamiennych i brunatnych. Podobnie dla kotłów rusztowych [3] zaleca się $d_p = 20 \mu m$, podczas gdy w [10] podaje się $d_p = 12 \mu m$. Przeprowadzone przez autora badania wstępne również potwierdzają silne zróżnicowanie granulacji

pyłu w kotłach pyłowych na węgiel kamienny i brunatny oraz w kotłach fluidyzacyjnych. W efekcie wyniki [3] są znacznie zawyżone w stosunku do uzyskanych metodą [10], a różnice mogą sięgać 50%. Ze względu na brak krajowych badań w tej dziedzinie trudno jest ocenić błąd popełniony przy obliczaniu emisyjności pyłu z polskich węgla kamiennych i brunatnych za pomocą metody [3].

Przyjmując, że wartości $a_v A$ nie będą wykraczały poza uzyskane w badaniach [10] dla węgla niemieckich, amerykańskich i węgierskich, można oszacować ten błąd jako 50% (względna różnica wyników metody [3] i [10] + 10%) (dokładność metody [10]), tzn.

$$\Delta \epsilon_p / \epsilon_p = 0,6$$

Istotne zmniejszenie tak znacznego błędu można byłoby uzyskać dopiero po przeprowadzeniu odpowiednich badań dla krajowych węgla i palenisk.

6. OSZACOWANIE BŁĘDÓW OBLICZANIA α_{1r} DLA SPALIN ZAPYLONYCH

Błąd wyznaczenia emisyjności spalin zapylnych określono na podstawie wzorów (2) i (21) jako:

$$\frac{\Delta \epsilon_{sp}}{\epsilon_{sp}} = \frac{(1 - \epsilon_g) \epsilon_p}{\epsilon_p + \epsilon_g - \epsilon_p \epsilon_g} \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p} + \frac{(1 - \epsilon_p) \epsilon_g}{\epsilon_p + \epsilon_g - \epsilon_p \epsilon_g} \frac{\Delta \epsilon_g}{\epsilon_g} \quad (24)$$

Dla spalin kotłowych maksymalne wartości wag błędów wynoszą w przybliżeniu: $X_{\epsilon_p} = 0,35$ i $X_{\epsilon_g} = 0,7$.

Podobnie jak poprzednio, porównano 3 metody obliczeń - tablica 3:

- emisyjność gazów wyznaczona z wykresów Hottela, emisyjność pyłu obliczona metodą [10], $a_{\dot{s}c}$ wg wzoru (5),
- emisyjność gazów aproksymowana metodą Schacka, $a_{\dot{s}c}$ wg wzoru (5), emisyjność pyłu obliczona metodą [10],
- emisyjność zapylnych spalin obliczona metodą [3], $a_{\dot{s}c}$ wg wzoru (11).

Tablica 3

Porównanie dokładności obliczeń radiacyjnego współczynnika wnikania ciepła dla spalin zapylnych

Nr	$\Delta a_{\dot{s}c}/a_{\dot{s}c}$	$\Delta \epsilon_{sp}/\epsilon_{sp}$	$\Delta \alpha_{1r}/\alpha_{1r}$
a	0,09	0,07	0,16
b	0,167	0,119	0,285
c	0,31	0,385	0,695
d	0,134	0,098	0,232

Zgodnie ze wzorem (24), uwzględniając wyniki uzyskane w rozdz.4, otrzymano dla metody "a"

$$\Delta \epsilon_{sp}/\epsilon_{sp} = 0,35 \cdot 0,1 + 0,7 \cdot 0,05 = 0,07 ,$$

zaś dla metody "b"

$$\Delta \epsilon_{sp}/\epsilon_{sp} = 0,35 \cdot 0,1 + 0,7 \cdot 0,12 = 0,119$$

Ten sam błąd dla metody "c" wynosi:

$$\Delta \epsilon_{sp}/\epsilon_{sp} = 0,35 \cdot 0,6 + 0,7 \cdot 0,25 = 0,385$$

Według wzoru (3), przy założeniu gazu szarego, maksymalny błąd względny obliczeń radiacyjnego współczynnika wnikania ciepła przedstawia zależność:

$$\frac{\Delta \alpha_{1r}}{\alpha_{1r}} = \frac{\Delta a_{\dot{s}c}}{a_{\dot{s}c}} + \frac{\Delta \epsilon_{sp}}{\epsilon_{sp}} , \quad (25)$$

którą wykorzystano do obliczenia wartości zamieszczonych w tablicy 3.

Z zestawienia podanego w tablicy 3 wynika, że korzystanie z metody [3] do obliczania radiacyjnego współczynnika wnikania ciepła prowadzić może do

znacznych błędów, większych niż w metodzie zalecanej przez [6]. Pewną poprawę dokładności uzyskać można stosując do obliczania emisyjności gazów 3-atomowych aproksymację [9] - punkt "d" tabl.3.

Nieco niższe wartości błędu obliczania α_{1r} dla spalin zapyłonych niż dla niezapyłonych spowodowane są nieuwzględnieniem w tabl.3 trudnego do określenia błędu powstającego w wyniku założenia szarości gazu zapyłonego. Należy nadmienić, że powyższa ocena błędów została przeprowadzona przy założeniu, że grubość promieniującej warstwy spalin s jest obliczona bezbłędnie. Analizę wpływu błędności s podano poniżej.

7. DOKŁADNOŚĆ OBLICZEŃ ŚREDNIEJ DROGI PROMIENI

Średnia droga promieni (grubość promieniującej warstwy spalin) s ma podstawowe znaczenie przy wyznaczaniu emisyjności i absorpcyjności spalin. Błąd względny emisyjności wywołany błędem wartości s wyznaczyć można ze wzoru (2) i prawa Beera (19):

$$\Delta c_{sp}/c_{sp} = \frac{k_{r,ps} \exp(-k_{r,ps})}{1 - \exp(-k_{r,ps})} \frac{\Delta s}{s} = X_s \frac{\Delta s}{s} \quad (26)$$

Wartość wagi błędu X_s dla warunków panujących w pęczkach konwekcyjnych kotłów zmienia się w zakresie ok. 0,75 - 1. Można więc przyjąć, że błąd wielkości s przenosi się bezpośrednio na emisyjność względnie absorpcyjność spalin. Dotychczasowe metody obliczeń [3] [6] podają wartości s dla pęczków o nieskończonych wymiarach, tzn. pomijają wpływ ścian otaczających wymiennik. Uproszczenie takie może pociągnąć za sobą znaczne błędy, co wykazano poniżej. Zależność ogólna opisująca grubość promieniującej warstwy spalin ma postać:

$$s = c \frac{4V}{H}, \quad (27)$$

gdzie V jest objętością przestrzeni promieniującej na powierzchnię H . Stała c uwzględnia zmniejszenie emisji w ośrodkach optycznie grubych i wynosi od 0,8 do 1.

W przypadku typowych pęczków $c = 0,85 - 0,88$, zaś dla prostopadłościanu $c = 0,91$ [5].

Dla pęczka o podziałkach s_1 i s_2 wykonanego z rur o średnicy D i umieszczonego w kanale o wymiarach $a \times b \times c$ objętość gazu promieniującego wynosi:

$$V = abc \left(1 - \frac{F}{s_1 s_2} \right) \quad (28)$$

gdzie

F - powierzchnia przekroju rury.

Powierzchnię przejmującą ciepło na drodze promieniowania wyznaczyć można jako:

$$H = 2(ab + bc + ac) + \frac{Labc}{s_1 s_2} \quad (29)$$

gdzie

L - długość obwodu zewnętrznej rury.

Po podstawieniu do wzoru (27)

$$s = c \frac{4 s_1 s_2 - 4F}{2s_1 s_2 (1/a + 1/b + 1/c) + L} \quad (30)$$

Dysponując literaturowymi zależnościami do obliczeń średniej drogi promieni w pęczkach o nieskończonych wymiarach [11] można wyznaczyć prawidłową wartość s dla pęczka ograniczonego jako

$$s = \frac{s_\infty}{2s_1 s_2 (1/a + 1/b + 1/c)/L + 1} = \frac{s_\infty}{x+1} \quad (31)$$

Błąd względny wynikający z zastąpienia wartości s przez s_∞ wyraża wzór:

$$\Delta s/s = x \quad (32)$$

Wielkość ta dla pęczków kotłowych może sięgać 25%, wprowadzając analogiczny błąd (zawyżenie) emisyjności spalin. Błąd ten rośnie w przypadku małych kotłów, jednak nawet dla pęczka o wymiarach $10 \times 6 \times 4$ m wynosi jeszcze ok. 8%.

Z uwagi na fakt, że błąd s zawsze powoduje zawyżenie wartości emisyjności i absorpcyjności nie można go dodawać do błędów maksymalnych omawianych w

poprzednich punktach rozdziału. Błędy te bowiem mogą być zarówno dodatnie, jak i ujemne. W niektórych przypadkach błędny sposób obliczania s może nawet na skutek tego poprawić wyniki obliczeń radiacyjnego współczynnika wnikania ciepła. W sytuacji, kiedy jednak wystąpią błędy dodatnie, łączny błąd obliczeń α_{ir} może ulec, na skutek przyjęcia s_{ω} , znacznemu podwyższeniu (o błąd względny emisyjności spalin spowodowany błędem s).

8. WNIOSKI

1. Zarówno w przypadku spalin niezapylnych, jak i zapylnych metoda [3], stosowana dotąd w kraju, daje wyniki obarczone znacznymi błędami.
2. Poprawę dokładności obliczeń emisyjności spalin można uzyskać stosując aproksymację [9] do wyznaczania emisyjności gazów 3-atomowych.
3. Brak krajowych badań własności fizykochemicznych pyłów kotłowych uniemożliwia stosowanie dokładniejszych metod obliczania emisyjności pyłu. W związku tym konieczne jest przeprowadzenie odpowiednich badań w tym zakresie.
4. Dodatkowym źródłem błędów jest posługiwanie się w obliczeniach średniej drogi promieni wzorami wyprowadzonymi dla nieskończonego pęczka.

Ważniejsze oznaczenia

- a, b, c - wymiary kanału spalin, m
- $a_{śc}$ - zastępcza emisyjność ścianki,
- A - absorpcyjność,
- C_s - stała promieniowania ciała doskonale czarnego, $W/(m^2 K^4)$.
- D - średnica zewnętrzna rur, m,
- d_p - średnia średnica ziaren pyłu w spalinach, μm ,
- H - powierzchnia ogrzewana, m^2 ,
- k_g - współczynnik osłabienia promieniowania gazami 3-atomowymi, $1/(m, MPa)$,
- k_p - współczynnik osłabienia promieniowania na skutek obecności pyłu w spalinach, $1/(m MPa)$,
- k_r - sumaryczny współczynnik osłabienia promieniowania, $1/(m MPa)$,
- L - długość obwodu zewnętrznego rury, m,
- p - ciśnienie spalin, MPa,
- s - grubość promieniującej warstwy spalin, m,

s_1	- podziałka poprzeczna rur w pęczku, m,
s_2	- podziałka wzdłużna rur w pęczku, m,
T	- temperatura, K,
V	- objętość przestrzeni międzyrurowej pęczka, m^3 ,
α_{1r}	- współczynnik wnikania ciepła przez promieniowanie, $W/(m^2K)$,
β	- współczynnik poprawkowy,
ϵ	- emisyjność,
μ_p	- koncentracja pyłu, kg/m_n^3 ,

Indeksy

p	- dla pyłu,
sp	- dla spalin,
H	- dla pary wodnej,
R	- dla $CO_2 + SO_2$,
$\acute{s}c$	- dla ścianki,
g	- dla gazu.

LITERATURA

- [1] Haensel H.: Podstawy rachunku błędów. WNT, Warszawa 1968.
- [2] Sharan H.: Berechnung des Wärmeüberganges durch Gasstrahlung zwischen Rauchgasen und grauen Rohrwänden. Sulzer - Forschungsheft 1968.
- [3] Tepłowej rasczot kotelnych agregatow - normatiwnyj metod. Energiya, Moskwa 1973.
- [4] Staniszewski S.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1963.
- [5] Wiśniewski S.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1979.
- [6] VDI - WÄRMEATLAS - VDI - Verlag, Düsseldorf 1984.
- [7] Schack K.: Berechnung der Strahlung von Wasserdampf und Kohlendioxid. Chemie - Ing. Technik. Bd. 42, 1970, Nr 2 s.53.
- [8] Mitor V.V.: Tepłooobmen w topkach parowych kotłow. Maszgiz, Moskwa 1963.
- [9] Kostowski E.: Aproksymacja wykresów określających emisyjność CO_2 i H_2O za pomocą funkcji analitycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Energetyka z.92, Gliwice
- [10] Bierman P., Vortmayer D.: Wärmestrahlung staubhaltiger Gase. Wärme - und Stoffübertragung Bd. 2, 1969 H.4.
- [11] Pronobis M.: Grubość promieniującej warstwy spalin w kotłowych pęczkach konwekcyjnych. Gospodarka Paliwami i Energią 1/84.

- [12] Kostowski E.: Przepływ ciepła w piecach i procesach przemysłowych. Praca NB-95/RME-3/81, ITC Politechniki Śląskiej, Gliwice 1985.
- [13] Schack K.: Zur Berechnung der Wasserdampfstrahlung. Chemie - Ing. Techn. Bd. 34, 1971 s. 1151 - 1153.

Recenzent: Doc.dr hab. inż Zbigniew Rudnicki

Wpłynęło do Redakcji 10.12.1991

Załącznik 1

Aproksymacja Schacka [7]

Dla CO₂ przy ciśnieniu całkowitym 0,1 MPa

$$\epsilon_C = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \quad (a)$$

$$x = (1273 - T_{sp})/1000 \quad (b)$$

$$a_i = \frac{b_i (p_C s)^{n_i}}{c_i + (p_C s)^{n_i}} + (a_{\infty i} - b_i) \frac{(p_C s)^{m_i}}{d_i + (p_C s)^{m_i}} \quad (c)$$

Tablica 4

Współczynniki funkcji aproksymacyjnej wg [7]

i	a_{∞}	b	c	d	m	n
0	0,252	0,1166	0,04	0,477	1,542	0,802
1	0,01	0,0658	0,0245	1,712	0,25	0,715
2	-0,0955	-0,0535	0,013	0,115	2,45	1,076
3	-0,0303	-0,0806	0,0816	0,691	0,13	0,495

Wartości współczynników równania (c) podano w tabelicy 4. Dla H_2O przy ciśnieniu całkowitym 0,1 MPa i grubości promieniującej warstwy spalin równej 0,5 m

$$\epsilon_H = \epsilon_\infty \{1 - \exp[-f(p_H s) g(p_H s, T_{sp})]\} \quad (d)$$

$$\epsilon_\infty = 0,747 - 0,168 \cdot 10^{-3} T_{sp} \quad (e)$$

Tablica wartości funkcji f i g oraz dodatkowe poprawki dla $s \neq 0,5$ m znaleźć można w pracach [13] i [12]. Absorpcyjność składników spalin wyznacza się za pomocą równania (13).

Załącznik 2

Aproksymacja Kostowskiego [12], [9]

$$\epsilon_C = 1 - \exp[-k_{tC} (p_C s)^{n_C}] \quad (a)$$

$$\epsilon_H = 1 - \exp[-k_{tH} (p_H s)^{n_H}] \quad (b)$$

Współczynniki k_{tC} i k_{tH} obliczać należy z zależności:

$$k_t = a + b (t_{sp}/1000) \quad (c)$$

Wartości współczynników funkcji aproksymacyjnej zamieszczono w tabelicy 5. Absorpcyjność składników spalin wyznacza się ze wzoru (13).

Tablica 5

Współczynniki funkcji aproksymacyjnej wg [12]

Dwutlenek węgla - CO ₂				Para wodna - H ₂ O			
zakres p _C s kPa · m	a	b	n	zakres p _H s kPa · m	a	b	n
a/temperatura t = 200 - 800°C							
70-200	0,05070	+0,03051	0,244	70-200	0,11039	-0,03959	0,367
10-80	0,05	+0,02277	0,262	10-80	0,07526	-0,03358	0,47
4-10	0,04608	+0,01707	0,308	4,6-10	0,06151	-0,03602	0,58
0,93-5	0,04596	+0,0122	0,345	0,93-5	0,05772	-0,04022	0,672
0,093-1	0,0532	-0,00168	0,527	0,1-1	0,06421	-0,05438	0,797
b/temperatura t = 800 - 1400°C							
70-200	0,0735	-0,02081	0,31	70-200	0,097	-0,03809	0,395
10-80	0,07791	-0,02573	0,314	10-80	0,05729	-0,02375	0,53
4-10	0,07613	-0,03038	0,374	4-10	0,0421	-0,01979	0,692
0,93-5	0,07814	-0,03321	0,391	0,93-5	0,03892	-0,02027	0,814
0,1-1	0,08697	-0,4108	0,614	0,1-1	0,04433	-0,02552	0,945
c/temperatura t = 1400 - 2000°C							
70-200	0,06707	-0,02193	0,346	70-200	0,07379	-0,02274	0,405
10-80	0,06579	-0,02228	0,362	10-80	0,03677	-0,01211	0,588
4-10	0,06099	-0,02146	0,414	4,6-10	0,02273	-0,00828	0,831
0,93-5	0,06136	-0,02245	0,449	0,93-5	0,02197	-0,0087	0,947
0,093-1	0,06787	-0,2619	0,672	0,3-1	0,0251	-0,01066	1,117

Załącznik 3

Aproksymacja Gurwicza i Mitora [8]

Emisyjność nazywaną tu stopniem czerni spalin wyznaczyć należy ze wzoru Beera:

$$\epsilon_{sp} = 1 - \exp(-k_g p s), \quad (a)$$

w którym współczynnik osłabienia promieniowania gazami 3 - atomowymi

$$k_g = \left(\frac{7,8 + 16 r_H}{\sqrt{10 p_p s}} - 1 \right) \left(1 - 0,37 T_{sp}/1000 \right) r_p \quad [1/m \text{ MPa}], \quad (b)$$

gdzie:

$p_p = r_p p$ - ciśnienie składnikowe gazów 3-atomowych, MPa,

$r_p = r_R + r_H$ - udział objętościowy gazów 3-atomowych.

EXACTITUDE OF CALCULATION OF THE RADIATION HEAT TRANSFER
BETWEEN FLUE GAS AND BOILER SURFACES

Abstract

The radiation heat transfer in steam generator tube banks is determined by emission and absorption coefficients of the flue gas containing CO_2 , H_2O and fly ash particles, as well as the radiation properties of external tube surfaces.

Calculation of radiation properties of flue gases bases on the experimental results presented by Hottel and Egbert in form of diagrams.

Emissivity diagrams have been approximated in analytical form by several authors with different precision.

The exactitude of the approximations has been analysed. The analysis has been carried out for the flue gases with and without fly ash content. A modification of the calculation method has been described. Another problem of importance is the correct calculation of the equivalent radius of flue gas layer in the tube bank. The calculation methods applied so far assume infinite dimensions of the tube bank. The assumption result in considerable error increasing the value of the radius.

In this position new correlations for the equivalent radius calculation, taking into account the influence of channel walls, have been presented.