

P.A. CHAWANOW, J.M. IWANOW, W.A. PAWLENKO  
Moskiewski Inżyniersko-Budowlany Instytut  
im. W.W. Kujbyszewa

BADANIA WŁASNOŚCI OPTYCZNYCH OŚRODKA PROMIENIUJĄCEGO  
W CHŁODZONYCH KOMORACH SPALANIA MAŁEJ OBJĘTOŚCI

Streszczenie. Autorzy na podstawie przeprowadzonych badań analizują dokładność stosowanych w metodyce obliczenia współczynników absorpcji założeń Plancka-Rosselanda lub podanych w pracy [5]. Wykazują na drodze eksperymentalnej, że założenia Rosselanda stosowane w obliczeniach komór spalania o małej objętości są bliższe rzeczywistości.

1. Wprowadzenie

Badaniom własności optycznych ośrodków promieniująco-pochłaniających, w różnych typach urządzeń opalanych paliwem i generujących energię, a w szczególności w chłodzonych komorach spalania, w ostatnim okresie poświęca się coraz większą uwagę.

Rozwiązania analityczne komplikuje nieliniowość procesu, wymiany energii promienistej spowodowana współdziałaniem promieniowania i konwekcji, procesami spalania paliwa, itd. W związku z tym, powstaje konieczność przeprowadzenia badań eksperymentalnych dla wprowadzenia szeregu założeń upraszczających, eliminujących z równania transportu energii, człony całkowe i uśrednienia optycznych własności ośrodka.

W licznych pracach, przy opisie transportu energii promienistej wykorzystuje się przybliżenia optycznie cienkiej lub optycznie grubej warstwy gazu, a także ich modyfikacje z często stosowanym założeniem modelu gazu "szarego" [1, 2, 3].

Obecnie przyjmuje się, że dla założonych modeli optycznie cienkiej lub optycznie grubej warstwy można uzyskać dobre wyniki zbliżone do rzeczywistości stosując współczynniki absorpcji uśrednione według Rosselanda i Plancka zgodnie z [1, 4].

Dla optycznie cienkiej warstwy ( $\tau \ll 1$ ) gęstość strumienia energii promienistej można zapisać w postaci:

$$\dot{q}_r = 2 \bar{k}_p l E^0(T) \quad (1)$$

Autorzy dziękują doc. dr hab. inż. Januszowi Wandraszowi za pomoc okazaną przy tłumaczeniu i opracowaniu niniejszego artykułu.

materiał przy wykorzystaniu założenia warstwy optycznie grubej ( $\tau \gg 1$ ) opisany jest równaniem:

$$\dot{q}_r = -\frac{4}{3} \frac{1}{k_R} \frac{dE^0(T)}{dl} \quad (2)$$

Uśrednienie współczynnika absorpcji według Plancka uzyskuje się z zależności:

$$\bar{k}_p = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} k_{\lambda} I_{\lambda}^0(T) d\lambda}{I^0(T)} \quad (3)$$

a dla uśrednienia Rosselanda z równania:

$$\frac{1}{k_R} = \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{1}{k_{\lambda}} \frac{dI_{\lambda}^0(T)}{dI^0(T)} d\lambda \quad (4)$$

W przypadku granicznym dla  $\tau = 0$  udział promieniowania w procesie transportu energii jest niewielki w porównaniu z przewodzeniem i konwekcją. Dla  $\tau \gg 1$  transport energii promienistej w ośrodku można rozpatrywać jako proces dyfuzyjny, a jego rola w łącznym strumieniu energii znacznie wzrasta.

Analiza dokładności przybliżenia Rosselanda dla technicznych obliczeń wymiany energii promieniowaniem w chłodzonych komorach spalania wskazuje na zgodność założeń w szerokim zakresie zmienności grubości optycznych warstwy promieniującej [1, 4, 6, 7].

W zagadnieniach praktycznych spotyka się często przypadki pośrednich grubości optycznych warstwy. Zastosowanie podanych uśrednień współczynników absorpcji ośrodka w tych zagadnieniach winno opierać się na analizie charakteru procesu, jak i jego własnościach fizycznych. Wybór modelu opisującego zjawisko fizyczne i metoda rozwiązywania konkretnego zagadnienia winny być oparte na wcześniejszej ocenie grubości warstwy optycznej produktów spalania. W przypadku tym wartość średniego współczynnika absorpcji zależna jest od zastosowanej metody uśrednienia.

## 2. Metoda badań i wyniki pomiarów

Niniejsza praca przedstawia wyniki badań konkretnego zagadnienia z zakresu pośrednich grubości optycznych promieniującej warstwy gazów w chłodzonej komorze spalania. Badania prowadzone były na stanowisku badawczym opisanym w pracy [8], z wykorzystaniem czterech cylindrycznych komór spalania całkowicie chłodzonych o średnicach od 0,18 m do 0,36 m.

Oprócz zmian parametrów geometrycznych komór, zmienny był skład spalin. Zmienność tę realizowano zachowując stały stosunek  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ , poprzez zmianę ilości doprowadzonego powietrza, w zakresie zmian współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda = 1,04 \div 1,20$ . W procesie spalania stosowano gaz ziemny i ciekły olej opałowy typu A, spalając je w palnikach ze wstępną komorą mieszania.

Udziały chemiczne gazów warstwy promieniującej w objętości komory ulegały zmianom z zakresie:

$$r_{\text{CO}_2} = 0,005 \pm 0,11$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1 \pm 0,192$$

Obliczenia współczynnika absorpcji gazu oparto na uśrednieniach Rosse-landa i Plancka wyznaczając współczynniki absorpcji  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$  w zakresie temperatur 556-2780 K przy różnych ciśnieniach [1].

Równocześnie prowadzone były obliczenia uzupełniające wartości współczynnika absorpcji produktów spalania  $\bar{k}_s$ , oparte na empirycznym równaniu [5].

$$\bar{k}_s = \left( \frac{0,78 + 1,6 r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{p_1}} - 0,1 \right) (1 - 0,37 \frac{T_2}{1000}) r_{\text{H}_2\text{O}} + \text{CO}_2 \quad (5)$$

W równaniu (5) wykorzystano eksperymentalnie wyznaczone temperatury spalin  $T_2$  na wylocie z komory.

Przy zachowaniu w procesie spalania stałego rodzaju paliwa ciśnienia cząstkowe składników  $p_{\text{CO}_2}$  i  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  oraz teoretyczną temperaturę spalania określono warunkami spalania poprzez zmiany stosunku nadmiaru powietrza  $\lambda$ . Przypadek ten można rozwiązać stosując uproszczoną metodę wyznaczania współczynników absorpcji według zależności:

- dla optycznie cienkiej warstwy gazu

$$\bar{k}_p = \bar{k}_{p\text{CO}_2} \cdot p_{\text{CO}_2} + \bar{k}_{p\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}} \quad (6)$$

- dla optycznie grubej warstwy

$$\frac{1}{\bar{k}_R} = \frac{1}{\bar{k}_{R\text{CO}_2} \cdot p_{\text{CO}_2}} + \frac{1}{\bar{k}_{R\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (7)$$

Wszystkie obliczenia dotyczą modelu gazu szarego, bez uwzględnienia wzajemnego wpływu promieniujących składników roztworu ( $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ ), co może - zdaniem autorów - stanowić błąd nie większy od 10%.



Uśrednienie Plancka pozwoliło określić na drodze obliczeniowej wartości optycznej grubość warstwy produktów spalania i tak:

- dla gazu ziemnego:

$$\tau = \bar{k}_p l = 0,093 \pm 0,326$$

- dla paliwa ciekłego:

$$\tau = \bar{k}_p l = 0,11 \pm 0,384$$

Wykorzystując uśrednienie Rosselanda otrzymuje się wartości:

- gaz ziemny  $\tau = \bar{k}_R \cdot l = 0,30 \pm 1,14$

- paliwo ciekłe  $\tau = \bar{k}_R \cdot l = 0,35 \pm 1,33$ .

Zastosowanie w obliczeniach zależności, zawartych w pozycji [5], daje wyniki następujące:

- gaz ziemny  $\tau = \bar{k}_s \cdot l = 0,081 - 0,28$

- paliwo ciekłe  $\tau = \bar{k}_s \cdot l = 0,09 - 0,30$ .

Uzyskane wartości wykazują, że niezależnie od zastosowanej metody uśredniania współczynnika absorpcji warstwa promieniujących spalin ma grubość optyczną niewiele odbiegającą od wartości średniej.

Badania eksperymentalne pozwoliły przeprowadzić analizę uzupełniającą, w wyniku której oszacować można wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na promienistą wymianę ciepła w komorze spalania.

Na drodze analizy matematycznej z wykorzystaniem uśrednienia Plancka otrzymano przybliżoną zależność pozwalającą obliczać współczynnik absorpcji (rys. 1)

$$\bar{k}_p \approx 0,5 \lambda^{0,85} \quad (8)$$

W pracy [6] przedstawiono uśrednienie według Rosselanda:

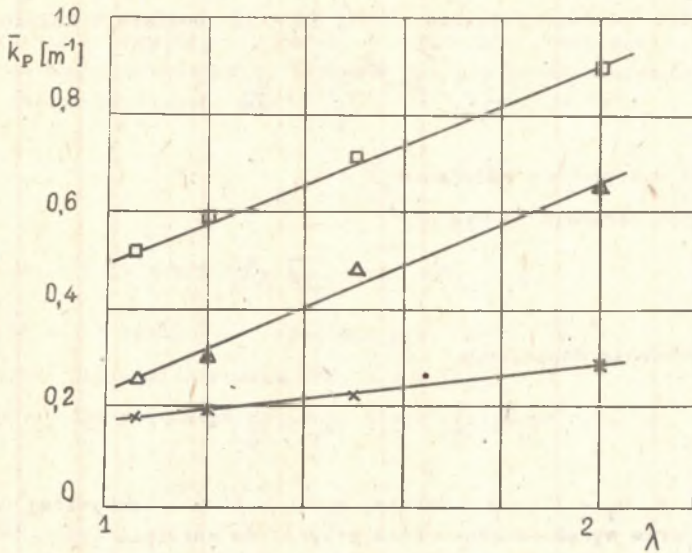
$$\bar{k}_R \approx \bar{k}_{R0} \lambda \quad (9)$$

gdzie  $\bar{k}_{R0}$  jest średnim współczynnikiem absorpcji określonym według metody Rosselanda dla spalin przy  $\lambda = 1$ .

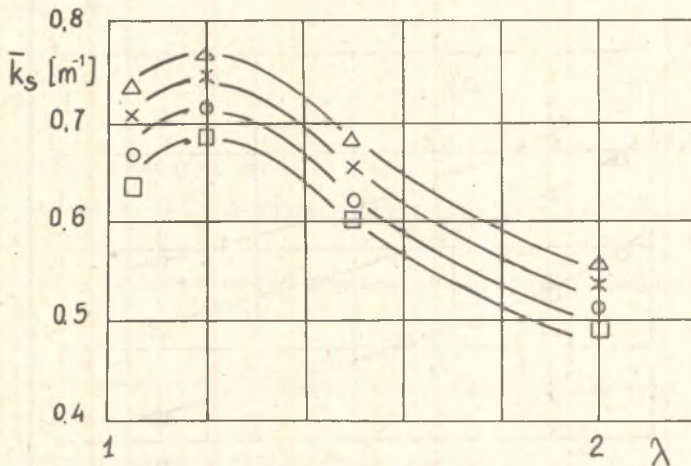
Przeprowadzone obliczenia współczynnika absorpcji  $\bar{k}_s$  wykazują nieliniowy przebieg jego zależności od  $\lambda$  (rys. 2).

Uwzględniając, że strumień energii promienistej w optycznie cienkiej warstwie może być liczony z równania:

$$\dot{q}_r = 2 \bar{k}_p l n^2 \sigma_0 T^4 \quad (10)$$



Rys. 1. Wyniki obliczeń współczynników absorpcji według Plancka [1] dla produktów spalania gazu ziemnego w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ .  $\Delta - \bar{k}_P^{CO_2} = \bar{k}_P^{CO_2} \cdot p_{CO_2}$ ,  $\circ - \bar{k}_P^{H_2O} = \bar{k}_P^{H_2O} \cdot p_{H_2O}$   $\square - \bar{k}_P = \bar{k}_P^{CO_2} + \bar{k}_P^{H_2O}$



Rys. 2. Wyniki obliczeń współczynników absorpcji  $\bar{k}_s$  produktów spalania gazu ziemnego [5] w zależności od  $\lambda$  przy różnych obciążeniach cieplnych komory  $\Delta - \dot{q}_V = 762 \text{ kW/m}^3$ ,  $x - \dot{q}_V = 922 \text{ kW/m}^3$ ;  $\circ - \dot{q}_V = 1462 \text{ kW/m}^3$ ;  $\square - \dot{q}_V = 1724 \text{ kW/m}^3$

podczas gdy dla warstwy optycznie grubej ( $\tau \gg 1$ ) obowiązuje zależność:

$$\dot{q}_r = -\frac{16}{3} \frac{n^2 \epsilon_0 T^3}{\bar{k}_R} \cdot \frac{dT}{dx}$$

można przyjąć następujące założenia:

- wykorzystując uśrednienie Plancka

$$\dot{q}_r \sim \lambda^m \quad \text{i} \quad K_T \sim \lambda^{m_1} \quad (11)$$

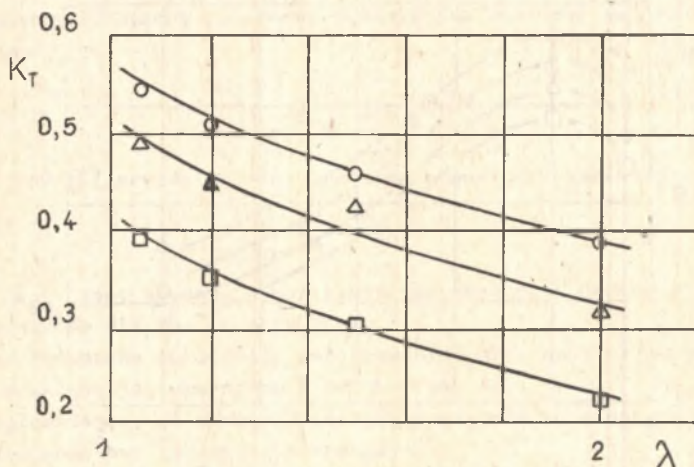
- a dla uśrednienia Rosselanda

$$\dot{q}_r \sim \left(\frac{1}{\lambda}\right)^n \quad \text{i} \quad K_T \sim \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{n_1} \quad (12)$$

gdzie  $m, m_1, n, n_1$  - liczby dodatnie, a  $K_T$  - liczba całkowitej wymiany energii w komorze wyrażona stosunkiem przyrostów entalpii [8].

Dla określenia zależności  $K_T = f(\lambda)$  przeprowadzono serię badań zachowując w komorze podobieństwo geometryczne ( $D_k = \text{const}, 1/D_k = \text{const}$ ), hydrodynamiczne ( $Re = \text{const}$ ) oraz ten sam system zasilania komory i warunki spalania mieszanki. W ich wyniku otrzymano zależność pokazaną na rys.3 i opisaną równaniem:

$$K_T = A \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{0,47} \quad (13)$$



Rys. 3. Zależność liczby całkowitej wymiany ciepła w komorze  $K_T$  funkcją  $\lambda$  dla spalania gazu ziemnego  $\circ - 1/D_k = 2,33, Re_n = 101 \pm 15\%$ ;  $\Delta - 1/D_k = 2,33, Re_n = 148 \pm 10\%$ ;  $\square - 1/D_k = 1,33, Re_n = 145 \pm 12\%$



które zgodnie z przyjętymi założeniami odpowiada przybliżeniu (12). Dodatkowa seria badań potwierdziła zgodność z eksperymentem otrzymanego równania dla chłodzonych komór spalania o różnej średnicy [8].

$$K_T = A \left( \frac{\bar{k}_R \cdot D}{\lambda} \right)^{0,47} \quad (14)$$

gdzie zgodnie z (9) wartości  $\bar{k}_{RO}$  wynoszą:

$$\bar{k}_{RO} = 3,34 - \text{dla spalin gazu ziemnego przy } \lambda = 1 \quad [6]$$

$$\bar{k}_{RO} = 3,92 - \text{dla spalin rusztu przy } \lambda = 1 \quad [6]$$

$$\bar{k}_{RO} = 3,89 - \text{dla produktów spalania oleju opałowego typu A.}$$

### 3. Wnioski

Porównanie otrzymanych zależności z eksperymentem wskazuje, że zarówno stosowanie uśrednienia Plancka, jak i podanych założeń z pracy [5] prowadzi do błędnych wyników niezgodnych z rzeczywistością.

W związku z tym dla komór spalania małej objętości model fizyczny procesu w badanym zakresie grubości optycznych warstw utworzonych z produktów spalania paliw węglowodorowych daje znacznie lepsze rezultaty po zastosowaniu w obliczeniach metody obliczania współczynników absorpcji według Rosselanda.

### OZNACZENIA

$D$  - średnica komory, m,

$E^0(T)$  - gęstość strumienia energii promienistej ciała doskonale czarnego,  $W/m^2$ ,

$I^0(T)$  - całkowita intensywność promieniowania ciała doskonale czarnego,  $\frac{W}{m^2}$ ,

$I_{\lambda}^0(T)$  - intensywność promieniowania ciała doskonale czarnego w zakresie długości fali ,  $W/m^2$ ,

$k$  - manochromatyczny współczynnik absorpcji,  $m^{-1}$ ,

$\bar{k}_p$  - średni współczynnik absorpcji według Plancka,  $m^{-1}$ ,

$\bar{k}_R$  - średni współczynnik absorpcji według Rosselanda,  $m^{-1}$ ,

$l$  - wymiar charakterystyczny, m,

- $l_k$  - długość komory, m,  
 $n$  - współczynnik załamania ośrodka,  
 $p_i$  - ciśnienie składnikowe, Pa,  
 $r_i$  - udział objętościowy składnika,  
 $T$  - temperatura, K,  
 $\lambda$  - współczynnik nadmiaru powietrza,  
 $\dot{q}$  - gęstość strumienia energii  $W/m^2$ ,  
 $\tau$  - optyczna grubość warstwy.

## LITERATURA

- [1] Абу-Комиа М.М., Тьен К.Л.: Средние коэффициенты поглощения инфракрасного излучений газов. Труды АСИЭ, серия С, "Теплопередача" № 4 46, 1967.
- [2] Висканта Р.: Взаимодействие между теплоотдачей теплопроводностью конвекцией и излучением в излучающей жидкости. Труды АСИЭ, серия С, "Теплопередача" № 4, 1963.
- [3] Viskanta R.: Radiation Trauster and Interaction of Couvection with Radiation Heat Transter" in "Advances in Heat Transter", vol. 3, Academic Press, New York, 1966.
- [4] Оцисик М.Н.: Сложный теплообмен. "Мир", Москва, 1967.
- [5] Тепловогой расчет котельных агрегатов. "Энергия", Москва 1973.
- [6] Коновалова Н.М., Шорин С.Н., Шурип Р.М.: Расчет теплопередачи в камерах сгорания трубчатых печей при высокой температуре поверхности нагрева., Спорник "Химическое машиностроение", Москва 1974.
- [7] Сперроу Э.И., Сесс Р.Д.: Теплообмен Излучением. "Энергия", Москва 1971.
- [8] Хаванов П., Павленко В.: Влияние коэффициента избытка воздуха на теплообмен в охлаждаемых камерах сгорания малого объема. "Zeszyty Naukowe Pol. Śl. "Energetyka" Nr 73, Gliwice 1970.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Janusz WANDRASZ

Praca wpłynęła do Redakcji w dniu 17 września 1980 r.

Исследование оптических свойств излучающей среды в охлаждаемых камерах сгорания малого объема

## R e z u m e

Представлены результаты исследования оптических свойств излучающе-поглощающей среды в охлаждаемых камерах сгорания малого объема, в сравнении с приближениями по Росселанду и Планку и рекомендациями работы [5]. Доказано, что для камер сгорания малого объема физическая модель процесса переноса в исследованной области оптических толщин продуктов сгорания углеводородного



топлива дает значительно лучшие результаты при использовании коэффициентов поглощения, усредненных по Росселанду.

The investigations of optical properties concerning a radiant medium in cooled combustion chambers of small volume

#### S u m m a r y

On the ground of investigations the authors analyse the accuracy of Planck Rosseland assumptions or those given in paper [5]. These assumptions are used in the methodology of calculating absorption coefficients. They prove by way of experiments that Rosseland's assumptions used in calculating combustion chambers of small volume are closer to reality.