

Władysław Komornicki

Instytut Energetyki i Urządzeń Hutniczych  
Politechnika Śląska

## MODELOWANIE POWSTAWANIA I WYPALANIA SADZY W PŁOMIENIU DYFUZYJNYM

**Streszczenie.** Przedstawiono model matematyczny turbulentnego płomienia dyfuzyjnego z uwzględnieniem zjawiska powstawania i wypalania sadzy. Zaproponowano nową stałą w modelu spalania cząstek sadzy, która pozwala uzyskać lepszą zgodność wyników obliczeń i eksperymentów. Przeprowadzono obliczenia koncentracji sadzy w dużym płomieniu przemysłowym, które zweryfikowano doświadczalnie.

## 1. WSTĘP

W modelowaniu matematycznym płomieni konieczna jest znajomość jego własności radiacyjnych. W przypadku gazowych płomieni świecących istotny wpływ na własności radiacyjne ma sadza, przede wszystkim jej koncentracja. Sadza wydzielana w płomieniach ma jeszcze drugi aspekt.

Wydalona do atmosfery ze spalinami stanowi zagrożenie ekologiczne, ponieważ jest nośnikiem rakotwórczych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych. Dlatego proces spalania powinien być tak prowadzony, aby wydzielająca się w płomieniu sadza została całkowicie wypalona przed opuszczeniem komory spalania. Sprzyja temu wysoka reaktywność cząstek sadzy powstających w wyniku pirolizy paliwa, jednak gdy znajdują się one poza strefą płomienia, ich reaktywność gwałtownie maleje i proces ich dezintegracji jest znacznie utrudniony.

Zjawisko powstawania i spalania cząstek sadzy jest ekstremalnie złożone i nie w pełni jeszcze wyjaśnione [1]. Tworzenie sadzy może być podzielone na trzy stadia: zarodkowanie i formowanie kryształitów, powstawanie elementarnych cząstek sadzy oraz tworzenie się struktur łańcuchowych. Uwzględnienie wszystkich tych etapów w modelu matematycznym nie doczekało się dotychczas realizacji. Modele procesu formowania cząstek sadzy bazują na hipotezach, z których najbardziej prawdopodobne - to: jonowa [2], polimeryzacji wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych [3], kondensacji molekuł  $C_2$  [4]. Fakt istnienia wielu równoprawnych hipotez wskazuje na trudność matematycznego sformułowania modelu.

Tworzone są więc modele uproszczone o ograniczonym zakresie zastosowań i dokładności. Nieco prostszym, acz również złożonym, zagadnieniem jest proces spalania cząstek sadzy w przepływie turbulentnym. Średnica cząstek sadzy występujących w płomieniach gazowych waha się w granicach 10-100 nm i jest porównywalna z drogą swobodną molekuł gazowych w warunkach płomienia. Magnussen [5] postuluje w związku z tym, że istotny wpływ na szybkość spalania cząstek sadzy mają mikrowiry i proponuje formułę pozwalającą uwzględnić wpływ mikrowirów w przepływie turbulentnym na przyspieszenie procesu wypalania cząstek sadzy. W niniejszej pracy oparto się na formule Magnussena w zastosowaniu do dużego dyfuzyjnego płomienia gazu ziemnego. Konfrontacja wyników obliczeń z wynikami pomiarów wskazuje, że dla warunków panujących w takim płomieniu proces wypalania cząstek sadzy jest znacznie szybszy, aniżeli wynikałoby to z danych zaproponowanych w modelu Magnussen. Stąd zaproponowano inną stałą występującą w tym modelu, która lepiej oddaje proces wypalania w modelowanym płomieniu.

## 2. PROCEDURA OBLICZENIOWA

Obliczenia przeprowadzono przy założeniu przepływu osłowsymetrycznego, ustalonego i eliptycznego. Oto ogólna postać równania zachowania, przy powyższych założeniach:

$$\rho u \frac{\partial \phi}{\partial z} + \rho v \frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_{\phi} \quad (1)$$

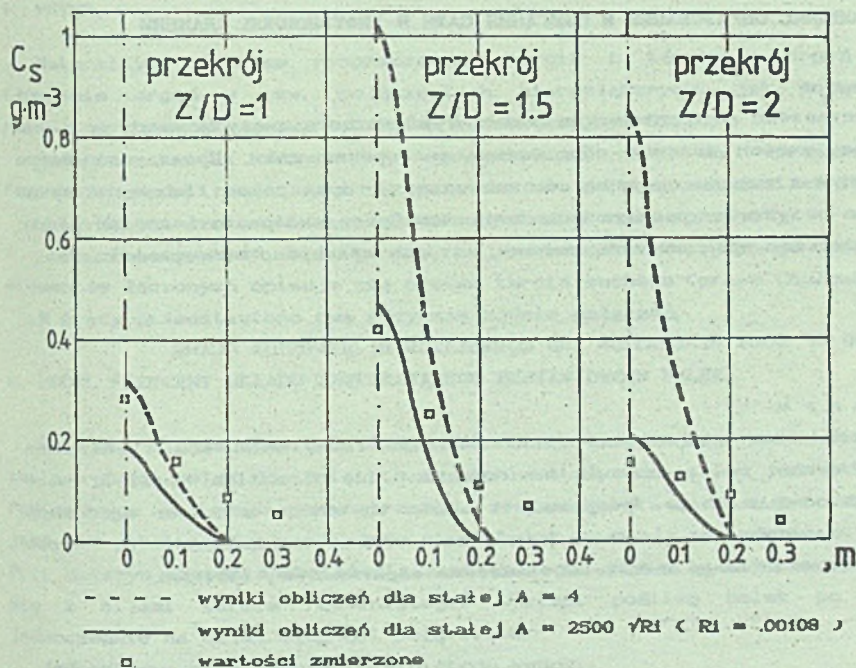
gdzie  $u$  i  $v$  to składowe osiowa i promieniowa wektora prędkości, a wielkość  $\phi$  oznacza kolejne zmienne: prędkość osiową  $u$  i promieniową  $v$ , kinetyczną energię turbulencji  $k$ , szybkość dysypacji energii turbulencji  $\epsilon$ , koncentracje paliwa  $m_{fu}$  i utleniacza  $m_{ox}$ , fluktuacje koncentracji paliwa  $\epsilon_{fu}$  i utleniacza  $\epsilon_{ox}$ , koncentracje zarodków sadzy  $n$  i cząstek sadzy  $N$  oraz całkowitą energię strumienia  $h$ . Wielkość  $S_{\phi}$  to człon źródłowy, a  $\Gamma_{\phi}$  współczynnik wymiany. Ciśnienie i rozkład prędkości wyznaczano posługując się procedurą SIMPLE [5]. Przyjęto do obliczeń model Tesnera [2] tworzenia sadzy uzupełniony o model Magnussena [6] wypalania cząstek sadzy. Człon źródłowy w równaniu koncentracji cząstek sadzy  $N$  zostaje uzupełniony zgodnie z sugestią Magnussena o wyrażenie

$$S_{N,t} = A \sqrt{\epsilon_{ox}} \sqrt{\epsilon_{fu}} / (\sqrt{\epsilon_{fu}} + \sqrt{\epsilon_{ox}}) N \epsilon / k \quad (2)$$

gdzie wielkość  $A$  jest stałą modelu Magnussen, do obliczeń prostego płomienia powstającego w wyniku wypływu metanu z kołowego otworu do otoczenia, proponuje przyjęcie wartości  $A = 4$ . Dla przypadków bardziej skomplikowanych geometrii wypływu, z jakimi mamy do czynienia w palnikach przemysłowych, wartość ta powinna być znacznie większa.

## 3. WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia wykonano dla geometrii odpowiadającej wymiarom komory badawczej o średnicy  $D=1$  m i długości 3.3 m, podziału obszaru obliczeniowego dokonano na  $20 \times 30$  elementów. Komora badawcza opalana była palnikiem przemysłowym o mocy 750 kW, w którym spalano gaz ziemny o strumieniu  $0.136$  kg/s i strumieniu powietrza  $2.26$  kg/s. Stałe modelu powstawania sadzy przejęto wiodług Magnussena, przy czym rozmiar elementarnych cząstek sadzy wyznaczono eksperymentalnie. W wyniku obliczeń uzyskano rozkład poszczególnych zmiennych, ograniczono się tutaj do prezentacji koncentracji sadzy w trzech przekrojach płomienia - rysunek 1. Wyniki uzyskane dla stałej modelu wypalania cząstek sadzy proponowanej przez Magnussena ( $A=4$ ) wskazują, że proces wypalania jest zbyt powolny dla warunków panujących w prezentowanym przypadku. W wyniku wariantowych obliczeń proponuję uzależnienie stałej modelu wypalania sadzy w przepływie turbulentnym od liczby kryterialnej Richardsona  $Ri = \zeta d / u^2$  ( $\zeta$  - przyspieszenie ziemskie,  $d$  - wymiar charakterystyczny), charakteryzującej przepływ w strudze, w postaci  $A = 2500\sqrt{Ri}$ . W tej postaci stała  $A$  obejmuje zarówno przepływ tu rozpatrywany, jak i przepływ obliczony przez Magnussena.



Rys. 1. Promieniowy rozkład koncentracji sadzy

Fig. 1. Radial variation of soot concentration

## LITERATURA

- [1] Haynes B.S., Wagner H.G.G.: Soot formation, Prog Energy Combust Sci, Vol.7, 229-273, 1981.
- [2] Теснер П.А.: Образование углерода из углеводородов газовой фазы. Изд. Химия, Москва 1972.
- [3] Bittner J.D., Howard J.B.: Pre-particle chemistry in soot formation, in "Particulate carbon: Formation during combustion" (D.C.Siegle, G.W.Smith, eds), 109-132, Plenum Press, New York-London 1981.
- [4] Weissman M., Benson S.W.: Mechanism of soot initiation in methane systems, Prog Energy Combust Sci, Vol. 15, 273-283, 1989.
- [5] Patankar S.V.: Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corporation, Washington 1980.
- [6] Magnussen B.F.: Modelling of reaction processes in turbulent flames with special emphasis on soot formation and combustion, in "Particulate carbon: Formation during combustion" (D.C.Siegle, G.W.Smith, eds), 321-335, Plenum Press, New York-London 1981.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И СЖИГАНИЯ САЖИ В ДИФУЗИОННОМ ПЛАМЕНИ

## Резюме

Представлена математическую модель турбулентного диффузионного пламени с особым учетом явления образования и горения сажи. Предложено новую постоянную в модели сжигания частиц сажи, которая решает получить лучшее согласие результатов расчета и эксперимента. Проведено расчета концентрации сажи в большом промышленном пламени, которые проверено экспериментально.

## MODELLING OF SOOT GENERATION AND COMBUSTION IN DIFFUSION FLAME

## Summary

Mathematical model of turbulent diffusion flame with soot generation and combustion are presented. New constant in calculation model of soot turbulent combustion are proposed, it allows to obtain a better agreement between calculation and experiments. The calculations of soot concentration in large industrial flame was experimentally verified.