ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: TRANSPORT z. 46 Nr kol.1571

Piotr GUSTOF

MODELOWANIE PROCESU TWORZENIA SIĘ SADZY W SILNIKU ZS

Streszczenie. W pracy wyznaczono koncentrację sadzy w cylindrze doładowanego silnika wysokoprężnego z wtryskiem bezpośrednim paliwa do komory spalania. Ilość sadzy obliczono za pomocą modelu opracowanego przez T.Morela i R.Keribara [4], skorzystano także z danych obliczonych za pomocą modelu dwustrefowego [6].

MODELING OF CREATES PROCESS SOOT IN ENGINE ZS

Summary. The aim of this work was to concentration soot in a cylinder of charged engine with direct fuel injection to combustion chamber. The value of the soot was counted up by using of model created by T. Morel and R. Keribar [4], it was used also from counted data's behind help of two-zonal model [6].

1. MODELOWANIE SADZY W SILNIKU ZS

Powstawanie sadzy jest charakterystycznym zjawiskiem towarzyszącym spalaniu we wszystkich silnikach wysokoprężnych, pracujących w pobliżu pełnego obciążenia (maksymalnej mocy).

Większe stężenie sadzy powoduje nadmierne zanieczyszczenie atmosfery (także składnikami toksycznymi towarzyszącymi wywiązywaniu się sadzy) oraz zmniejszenie widoczności niebezpieczne dla ruchu pojazdów drogowych [1],[2],[3].

Sama sadza, jako czysty chemicznie węgiel, nie stanowi zagrożenia dla organizmu człowieka, niebezpieczne są związki znajdujące się na jej powierzchni - wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne PAH oraz węglowodory pochodzące z niespalonego paliwa i oleju smarującego.

Szkodliwość oddziaływania sadzy na środowisko naturalne i organizmy żywe wynika też z faktu, że ze względu na małe wymiary cząstki sadzy utrzymują się długo w atmosferze i są łatwo wchłaniane przez układ oddechowy. W ten sposób umożliwia się wniknięcie do organizmu węglowodorów, związków siarki i azotu.

Celem pracy było udowodnienie, iż można zamodelować proces tworzenia się sadzy w silniku ZS z dość dużą dokładnością w stosunku do wyników uzyskanych na stanowisku badawczym. W pracy określono także przydatność zastosowanego modelu w fazie projektowania nowych silników ZS.

W modelu T.Morela i R.Keribara są zawarte wielkości, które bywają wyznaczane przy konwencjonalnym badaniu procesu spalania w silniku, wykorzystującym termodynamiczną analizę doświadczalnie wyznaczonego wykresu indykatorowego.

T.Morel i R.Keribar założyli [4], że w komorze spalania można wyróżnić trzy strefy:
- strefę niespalonego paliwa,
- cienką strefę spalania,
- strefę produktów spalania.

Przyjmuje się, że ilość paliwa spalona w strefie spalania w każdym przedziale czasowym wytwarza sadzę, która przedostaje się do strefy produktów spalania. Założenia modelu dwustrefowego są bardzo podobne do przedstawionych powyżej założeń.

T.Morel i R.Keribar zaproponowali, aby koncentrację cząstek sadzy c_s [4] w komorze spalania wyznaczyć za pomocą formuły:

$$c_s = \frac{m_{sf} - m_{sb}}{V} \; [g/m^3] \tag{1}$$

gdzie:

m_{sf} – masa sadzy wytworzonej do chwili τ [g],
m_{sb} – masa sadzy wypalonej do chwili τ [g],
V – chwilowa objętość cylindra [m^3].

Chwilową objętość cylindra [6] obliczono za pomocą przedstawionej zależności:

$$V = 0{,}24865 \cdot 10^{-4} + [(\frac{\Pi \cdot D_{tl}^{2}}{4}) \cdot r \cdot (1 - \cos\alpha + 0{,}5\lambda_k \cdot \sin^2\alpha)] \; [m^3] \tag{2}$$

gdzie:

D_{tl} – średnica tłoka (w przypadku silnika 2,4TDI wynosi 0,082)[m],
r – promień wykorbienia (0,0452) [m],
α – kąt obrotu wału korbowego [°OWK],
λ_k – współczynnik korbowodowy – stosunek promienia wykorbienia do długości korbowodu (0,3117).

Wartości masy wytworzonej sadzy m_{sf} oraz masy wypalonej sadzy m_{sb} [4] uzyskano dzięki poniższym formułom:

$$m_{sf} = A_1 \cdot q_o \cdot \left[\left(\frac{dx}{d\alpha} \cdot \exp\left(-\frac{A_2}{T_f} \right) \right) / (1 + 4{,}76 \cdot Yo_2)^3 \right] \; [g] \tag{3}$$

gdzie:

A_1, A_2 – współczynniki o wartościach 100 i 2000,
q_o – całkowita dawka paliwa na cykl [g],
$\frac{dx}{d\alpha}$ – szybkość wypalenia ładunku x [1/°OWK],
T_f – temperatura płomienia [K],
Yo_2 – udział molowy niespalonego tlenu w spalinach [%].

$$m_{sb} = \frac{B_1}{6n} \left[\frac{m_{sf}}{\rho_s \cdot d_s} \cdot \exp\left(-\frac{B_2}{T_f} \right) \cdot Po_2^{\frac{1}{2}} \right] \; [g] \tag{4}$$

gdzie:

B_1,B_2 – współczynniki o wartościach 10 i 2000,

n – prędkość obrotowa silnika [obr/min],
m_{sf} – masa sadzy wytworzonej do chwili τ [g],
ρ_s – gęstość sadzy [kg/m^3],
d_s – średnica cząstki sadzy [μm],
T_f – temperatura płomienia [K],
Po_2 – ciśnienie cząstkowe tlenu [bar].

Formuły (3) oraz (4) uzyskano poprzez scałkowanie równania na masową szybkość formowania się sadzy (5) oraz na masową szybkość wypalania się sadzy (6):

$$\frac{dm_{sf}}{d\tau} = \frac{A_1 \cdot \frac{dm_d}{d\tau} \cdot \exp\left(-\frac{A_2}{T_f}\right)}{(1 + 4{,}76 \cdot Yo_2)^3} \quad [g/s] \tag{5}$$

gdzie:

A_1, A_2 – współczynniki o wartościach odpowiednio: 100 i 2000,
$\frac{dm_d}{d\tau}$ – masowa szybkość dyfuzyjnego spalania paliwa w silniku [g/s],
T_f – temperatura płomienia [K],
Yo_2 – udział molowy niespalonego tlenu w spalinach [%].

$$\frac{dm_{sb}}{d\tau} = -B_1 \cdot \frac{m_{sf}}{\rho_s \cdot d_s} \cdot \exp\left(-\frac{B_2}{T_f}\right) \cdot Po_2^{\frac{1}{2}} \quad [g/s] \tag{6}$$

gdzie:

B_1, B_2 – współczynniki, które wynoszą odpowiednio 10 i 2000,
m_{sf} – masa sadzy wytworzonej do chwili τ [g],
ρ_s – gęstość sadzy [kg/m^3],
Po_2 – ciśnienie cząstkowe tlenu [bar],
d_s – średnica cząstki sadzy [μm],
T_f – temperatura płomienia [K].

Masową szybkość dyfuzyjnego spalania paliwa w silniku wyznaczono zgodnie z przedstawioną zależnością:

$$\frac{dm_d}{d\tau} = \frac{dx}{d\tau} \cdot q_o \quad [g/s] \tag{7}$$

gdzie:

$\frac{dx}{d\tau}$ – względna szybkość spalania [1/s],
q_o – całkowita dawka paliwa na cykl [g].

Średnicę cząstek sadzy d_s [4] obliczono z równania:

$$d_s = \frac{0{,}04}{\lambda} \quad [\mu m] \tag{8}$$

gdzie:

λ - współczynnik nadmiaru powietrza.

Aby porównać dane doświadczalne z danymi wyliczonymi za pomocą modelu Morela i Keribara, masowe stężenie sadzy c_s zamieniono na stężenie objętościowe c_{sv} [5]. Skorzystano więc ze wzoru:

$$c_{sv} = \frac{62{,}36 \cdot T}{M_{cz} \cdot P_a} \cdot c_s \quad [\text{ppm}] \tag{9}$$

gdzie:

T – temperatura bezwzględna powietrza [K],
M_{cz} – masa cząsteczkowa węgla [kg/kmol],
P_a – ciśnienie atmosferyczne [mmHg],
c_s – koncentracja sadzy w m^3 spalin [g/m^3].

2. OBIEKT ANALIZY I WYNIKI BADAŃ

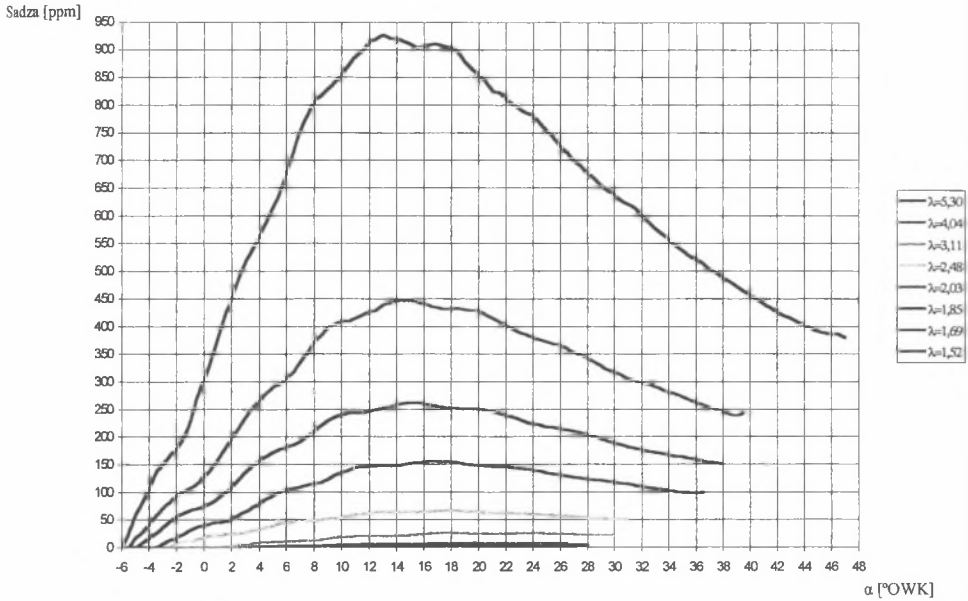
Wyniki obliczeń przeprowadzono dla wysokoprężnego silnika z wtryskiem bezpośrednim o pojemności skokowej 2390 cm^3, mocy nominalnej 85 kW dla prędkości obrotowej 4250 min^{-1} i różnych współczynników nadmiaru powietrza λ.

Obliczenia obejmowały wyznaczenie ilości tworzącej się sadzy, a następnie ilości wypalanej sadzy w czasie trwania spalania w cylindrze silnika ZS.

Końcową koncentrację sadzy uzyskano poprzez różnicę pomiędzy sadzą wytworzoną a wypaloną. Jako temperaturę płomienia T_f przyjęto temperaturę spalin T_b [6], jako udział molowy niespalonego tlenu w spalinach Yo_2 oraz współczynnik wypalenia ładunku x przyjęto dane wyliczone za pomocą modelu dwustrefowego [6] dla poszczególnych współczynników λ. We wzorze (6) jako gęstość sadzy ρ_s przyjęto wartość proponowaną przez Morela i Keribara [4], a wynoszącą 900 kg/m^3, ponieważ silnik jest silnikiem doładowanym, więc ciśnienie cząstkowe tlenu Po_2 przyjęto równe 10 barów [1,2,3].

Oceny stopnia przydatności modelu T.Morela i R.Keribara dokonano poprzez porównanie danych otrzymanych doświadczalnie z wynikami obliczeń przeprowadzonych za pomocą ww. modelu na tym samym obiekcie.

Wykres 1 przedstawiający koncentrację sadzy w cylindrze silnika ZS został wykonany w funkcji kąta obrotu wału korbowego, wykres 2 porównujący wyniki obliczeń z danymi doświadczalnymi i danymi uzyskanymi za pomocą modelu dwustrefowego został wykonany w funkcji obciążenia silnika.

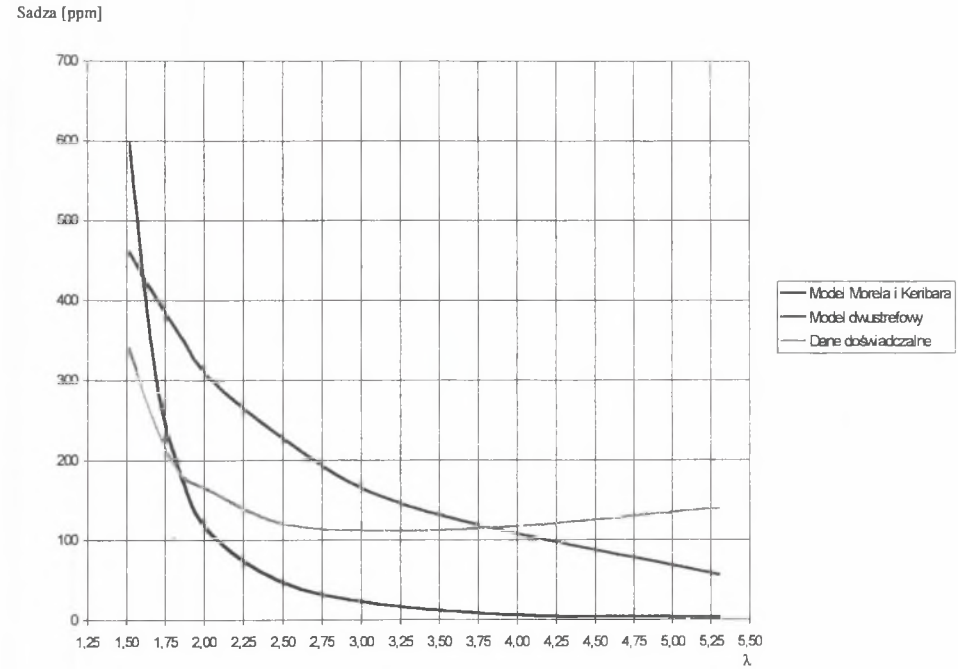


Rys.1. Przebieg obliczonego końcowego stężenia sadzy c_{sv} dla różnych stanów obciążenia silnika

Fig.1. Course of counted final concentration of soot c_{sv} for different conditions weight of engine

Porównując przebiegi na rysunku 1, można zaobserwować, iż koncentracja sadzy w cylindrze rośnie wraz z kątem obrotu wału korbowego do pewnej wartości maksymalnej, następnie następuje spadek koncentracji sadzy. Dzieje się tak, ponieważ proces tworzenia i wypalania sadzy rozpoczyna się wraz z początkiem spalania mieszanki w cylindrze. W trakcie tego spalania następuje gwałtowny przyrost ilości wytwarzanej sadzy oraz wolniejszy przyrost ilości wypalanej sadzy. Po osiągnięciu maksymalnej wartości ilość formującej się sadzy maleje, ilość wypalanej sadzy nadal rośnie do pewnego maksimum. Końcowa koncentracja sadzy ustala się na pewnym stałym poziomie w momencie zakończenia wypalania się sadzy. Duży wpływ na wzrost ilości sadzy ma także szybkość wypalenia ładunku w cylindrze. W przypadku gdy ta szybkość jest duża, następuje gwałtowny przyrost ilości powstałej sadzy. Ilość wypalonej sadzy jest niewielka, ponieważ w cylindrze panuje zbyt niska temperatura, niepozwalająca na spalenie dużych ilości sadzy. Przy małych obciążeniach silnika wykresy są znacznie pofalowane. Związane jest to z dużymi zmianami szybkości wypalenia ładunku w cylindrze. Zmiany te są spowodowane dużym nadmiarem powietrza, który to nie sprzyja łatwemu zapaleniu się mieszanki i jej późniejszemu równomiernemu wypaleniu.

Na rysunku 2 przedstawiono obliczoną średnią zawartość sadzy w komorze spalania silnika ZS za pomocą modelu T.Morela i R.Keribara, a także obliczoną za pomocą modelu dwustrefowego z bilansu pierwiastkowego węgla oraz otrzymany doświadczalnie na podstawie pomiaru stopnia zadymienia spalin udział sadzy w spalinach w zależności od obciążenia silnika ZS.



Rys.2. Przebieg stężenia sadzy obliczony za pomocą modelu Morela i Keribara, a także obliczony za pomocą modelu dwustrefowego oraz doświadczalnie zarejestrowany w firmie AVL

Fig.2. Counted of concentration of soot course behind help of model Morel and Keribar, also counted behind help of two-zonal model and registered testing in AVL

Otrzymany na podstawie obliczeń przebieg średniego stężenia sadzy w spalinach jest bardzo zbliżony do przebiegu doświadczalnego (współczynnik korelacji wynosi około 99%). Na podstawie rysunku 2 zaobserwowano duży wzrost ilości sadzy w cylindrze przy zwiększeniu obciążenia silnika (małe wartości λ).

Przy maksymalnym obciążeniu silnika λ=1,52 średnia ilość sadzy wynosi około 600 ppm. Jest to związane ze zwiększaniem dawki paliwa przy dużych obciążeniach silnika.

Przy zmniejszaniu obciążenia stwierdzono znaczny spadek ilości sadzy. Przy minimalnym obciążeniu silnika λ=5,3 średnia ilość sadzy mieści się w granicach 3 ppm.

3. PODSUMOWANIE

Procesy tworzenia się i wypalania sadzy są na tyle skomplikowane, iż ich modelowanie jest bardzo trudne przy dzisiejszym stanie wiedzy.

W modelu Morela i Keribara uwzględniono tylko dawkę paliwa na obieg silnika q_o, szybkość wypalenia ładunku $\frac{dx}{d\alpha}$, udział molowy niespalonego tlenu O_2 w spalinach,

ciśnienie cząstkowe tlenu Po_2 oraz temperaturę spalin T_b dla silnika doładowanego o bezpośrednim wtrysku paliwa do komory spalania.

Można stwierdzić, że zastosowany model T.Morela i R.Keribara [4] w połączeniu z modelem dwustrefowym [6] dał bardzo zadowalające wyniki zbliżone do doświadczalnych. Tak więc może być z powodzeniem stosowany do modelowania procesów powstawania sadzy w cylindrze silnika ZS na etapie projektowania wysokoprężnych jednostek napędowych.

Literatura

1. Merkisz J.: Wpływ motoryzacji na skażenie środowiska naturalnego. WPP, Poznań 1998.
2. Merkisz J.: Ekologiczne aspekty stosowania silników spalinowych. WPP, Poznań 1999.
3. Merkisz J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych. WPP, Poznań 2001.
4. Kowalczyk M.: Promienne właściwości płomieni silników wysokoprężnych. WPP, Poznań 1995.
5. Bernhardt M.: Motoryzacyjne skażenia powietrza. WKiŁ, Warszawa 1976.
6. Gustof P., Wilk K.: Model dwustrefowy w zastosowaniu do analizy procesu spalania w doładowanym silniku ZS. Materiały konferencyjne Ostrawa-Katowice 29.04-06.05.1997.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Jaskólski

Abstract

Soot creating and burning process are too complicated at present condition of knowledge.

In both models just only a dose of fuel for engine circulation q_o was considered, the speed of burning fuel $\frac{dx}{d\alpha}$, part of unburned molar oxygen O_2 in emission, and the exhaust gas temperature T_b of the engine. It was been possible to affirm, that applied model T.Morel and R.Keribar [4] in joint with two-zonal model [6] he gave satisfactory approximate results to experimental. So it can be applied with success to modeling of creates process of soot in cylinder of engine ZS on stage of projecting.