ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996
Seria: TRANSPORT z. 28 Nr kol.1310

Piotr GUSTOF
Jacek MAĆKOWSKI
Krystian WILK

OBLICZANIE PARAMETRÓW CIEPLNYCH I SKIADU SPALIN DLA SILNIKA ZI ZASILANEGO PALIWEM CIEKIYM I GAZOWYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono obliczenia parametrów cieplnych substancji w cylindrze silnika ZI oraz skład chemiczny spalin podczas spalania mieszanki uzyskane za pomocą modelu dwustrefowego. W modelu przyjęto założenie, że spaliny zawierają dziesięć składników: CO_2, CO, H_2O, H_2, O_2, N_2, NO, H, O i OH oraz że są one w stanie równowagi chemicznej. Wyniki obliczeń zostały przeprowadzone dla silnika ZI zasilanego paliwem ciekłym oraz gazowym.

THE CALCULATIONS OF THE THERMAL PARAMETERS AND COMBUSTION GASES COMPOSITION IN THE SPARK IGNITION ENGINE FEEDED WITH LIQUID AND GAS FUEL

Summary. In this work the two - zone model of combustion process to calculations of the thermal parameters and chemical composition of products during the combustion of mixture in the spark ignition engine was used. In the model it was assumed that the combustion products contained ten components: CO_2, CO, H_2O, H_2, O_2, N_2, NO, H, O and OH and that it was the equilibrium chemical composition. As an example are presented the results of calculations carried out for the engine feeded with liquid and then with gas fuel.

1. Dwustrefowy model procesu spalania mieszanki w silniku

Wykorzystany model dwustrefowy składa się z następujących równań bilansów energii stref dla elementarnego kąta obrotu wału korbowego i równań pomocniczych:

- bilansu energii mieszanki (strefy niespalonej),
- bilansu energii frontu spalania,
- bilansu energii spalin (strefy spalonej),
- termicznego równania stanu mieszanki i spalin,
- równania sumy objętości i ilości substancji w strefach,
- definicji stopnia wypalenia ładunku.

Równania te były prezentowane wcześniej [1]. Ponieważ startowe wartości temperatur stref trzeba szacować, więc ich ostateczne wartości weryfikuje się za pomocą kryterium wynikającego z bilansu energii frontu spalania:

$$dI_U = dI_B + dQ, \tag{1}$$

gdzie:

dIU , dIB - elementarne porcje pełnej (fizycznej i chemicznej) entalpii mieszanki i spalin,

dQ - porcja ciepła przepływającego od frontu spalania do mieszanki.

Kryterium sformułowane na podstawie równania (1) wymaga, aby zsumowane ciepło przepływające z frontu spalania do mieszanki podczas rozważanej fazy (okres spalania) pracy silnika miało najmniejszą wartość:

$$\sum dQ \Rightarrow \min \tag{1a}$$

i zawsze nie było ujemne.

2. Równowagowy skład spalin

Jak podano wcześniej, spaliny stanowią roztwór równowagowy zawierający 10 składników: CO_2, CO, H_2O, H_2, O_2, NO, N_2, H, O i OH, których udziały molowe oznaczono za pomocą nawiasów okrągłych, np. (CO_2), (OH) itd. Mając do dyspozycji ciśnienie "p" i temperaturę "T_b" spalin wyznaczone z modelu dwustrefowego można obliczyć wartości udziałów wymienionych 10 składników w każdym kroku obliczeniowym.

W tym celu wykorzystano:

- 4 równania bilansów pierwiastków:

$$n'_C = n''_S \{(CO_2)+(CO)\} \tag{2}$$

$$n'_H = n''_S \{ 2(H_2)+2(H_2O)+(OH)+(H) \} \tag{3}$$

$$n'_O = n''_S \{(CO)+2(CO_2)+2(O_2)+(H_2O)+(OH)+(O)+(NO)\} \tag{4}$$

$$n'_N = n''_S \{ 2(N_2)+(NO) \} \tag{5}$$

- równanie sumy udziałów (prawo Daltona):

$$(CO_2) + (H_2O) + (O_2) + (N_2) + (CO) + (H_2) + (OH) + (H) + (O) + (NO) = 1 \tag{6}$$

- 6 równań określających stałe równowagi K wybranych reakcji:

$$CO_2 \Leftrightarrow CO + 1/2\, O_2 \qquad K_1 = \frac{(CO)\,(O_2)^{1/2}}{(CO_2)}\, p^{1/2} \tag{7}$$

$$H_2O \Leftrightarrow H_2 + 1/2\, O_2 \qquad K_2 = \frac{(H_2)\,(O_2)^{1/2}}{(H_2O)}\, p^{1/2} \tag{8}$$

$$H_2O \Leftrightarrow OH + 1/2 H_2 \qquad K_3 = \frac{(OH)\,(H_2)^{1/2}}{(H_2O)}\, p^{1/2} \tag{9}$$

$$1/2\, H_2 \Leftrightarrow H \qquad K_4 = \frac{(H)}{(H_2)^{1/2}}\, p^{1/2} \tag{10}$$

$$1/2\, O_2 \Leftrightarrow O \qquad K_5 = \frac{(O)}{(O_2)^{1/2}}\, p^{1/2} \tag{11}$$

$$1/2 N_2 + 1/2 O_2 \Leftrightarrow NO \qquad K_6 = \frac{(NO)}{(N_2)^{1/2}\,(O_2} \tag{12}$$

Ilości kmoli pierwiastków n'_C - węgla, n'_H - wodoru, n'_O - tlenu, n'_N - azotu zawarte w ładunku (mieszance) i odniesione do 1 kg paliwa wynoszą:

$$n'_C = (n'_C)_P \tag{13}$$

$$n'_H = (n'_H)_P + 2\,(H_2O)_a\, \lambda\, n_{a\,min} \tag{14}$$

$$n'_O = (n'_O)_P + (2\,(O_2)_a + (H_2O)_a)\, \lambda\, n_{a\,min} \tag{15}$$

$$n'_N = (n'_N)_P + 2\,(N_2)_a\, \lambda\, n_{a\,min} \tag{16}$$

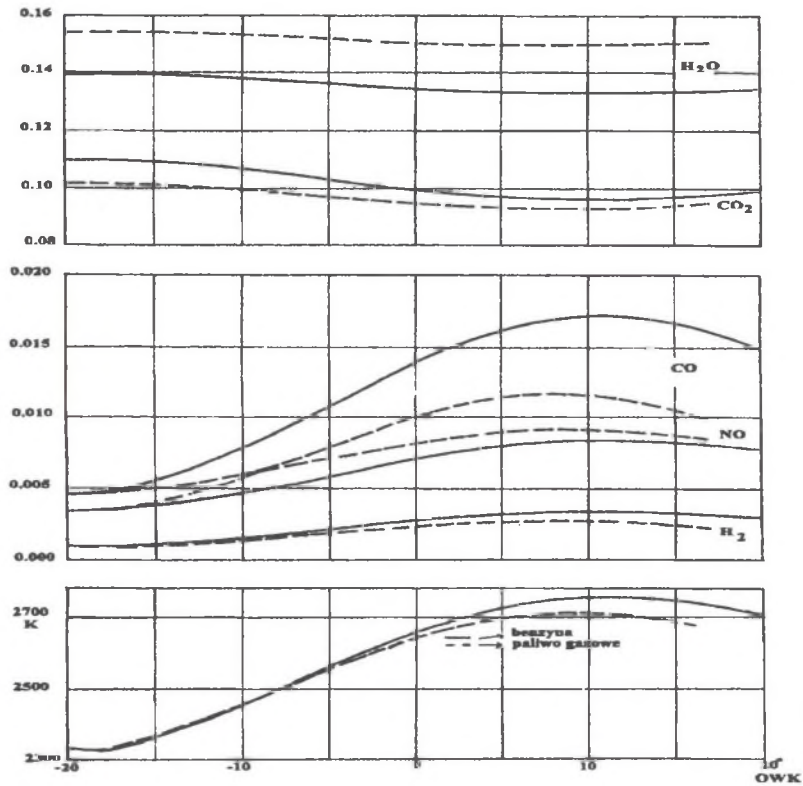
gdzie indeksem "p" oznaczono udziały pierwiastków w paliwie, zaś indeksem "a" udziały składników w powietrzu do spalania.
Ponadto oznaczono:

$n_{a\,min}$ - teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania,
λ - stosunek nadmiaru powietrza do spalin,
n''_S - ilość spalin wilgotnych.

Zależność stałych równowagi $K_1, \ldots, K_6$ od temperatury określano w postaci funkcji na podstawie danych zawartych w pracy [2]:

$$\begin{aligned} K_1 &= 21035 \exp(-33165/T) \\ K_2 &= 1061 \exp(-30269/T) \\ K_3 &= 5402 \exp(-34620/T) \\ K_4 &= 1468 \exp(-27443/T) \\ K_5 &= 3217 \exp(-30790/T) \\ K_6 &= 4.5 \exp(-10844/T) \end{aligned} \tag{17}$$

Jeżeli spaliny zawierają palne składniki, to ich wartość opałową określono za pomocą wartości opałowych składników lub za pomocą entalpii dewaluacji.



Rys.1. Skład chemiczny i temperatura spalin w funkcji kąta OWK dla stosunku nadmiaru powietrza $\lambda = 1.10$

Fig.1. Value of the flame gases composition and flame temperature as a function of crank angle for air excess ratio $\lambda = 1.10$

3. Przykład wykorzystania prezentowanego modelu

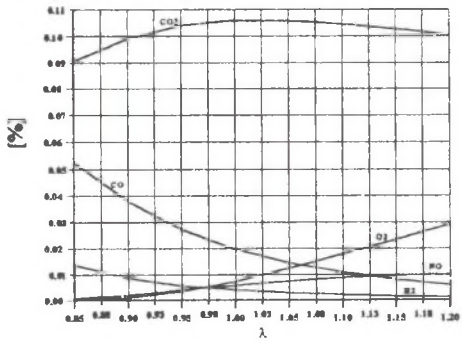
Przedstawiony sposób obliczeń wykorzystano dla określenia stosunku nadmiaru powietrza w mieszance oraz dla porównania przebiegu spalania dla dwóch różnych paliw. Dany był wykres indykatorowy, którego część dla procesu spalania opisano równaniem:

$$p = \exp(14{,}83183 + 4{,}809741 \cdot 10^{-2} \cdot \varphi_i - 1{,}259719 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi_i^2 + -4{,}930669 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi_i^3 + 1{,}444449 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi_i^4 + 1{,}479523 \cdot 10^{-8} \cdot \varphi_i^5 + - 8{,}114539 \cdot 10^{-10} \cdot \varphi_i^6 + 6{,}935525 \cdot 10^{-12} \cdot \varphi_i^7) \quad (18)$$

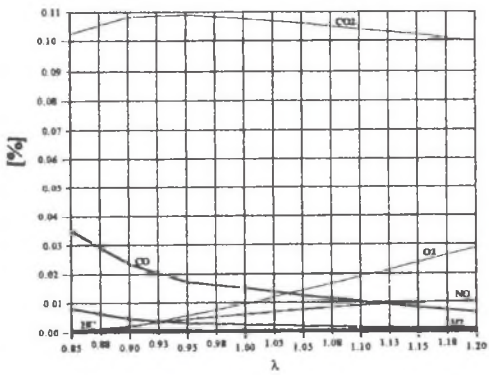
gdzie: ϕ_i - kąt obrotu wału korbowego.

Przy obliczaniu ciepła przekazywanego do ścianek zastępczy współczynnik wnikania określono według pracy [3]. Wartości innych wielkości przyjęto zgodnie z posiadanymi danymi. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 1 w postaci zależności składu chemicznego i temperatury spalin od kąta OWK dla przypadku zasilania silnika benzyną i paliwem gazowym przy określonej wartości stosunku λ.

Drugi przykład na rysunku 2 przedstawia zależność składu spalin od stosunku nadmiaru powietrza λ podczas spalania paliwa ciekłego. Przykład ten analizowano też uwzględniając obecność w spalinach węglowodorów oznaczonych umownie symbolem HC , a traktowanych w obliczeniach jako heksan. Wykorzystano przy tym formułę opracowaną przez firmę Bosch. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 3.



Rys.2.Zależność składu spalin od stosunku nadmiaru powietrza
Fig.2.Combustion products composition dependence on air excess ratio



Rys.3.Skład spalin uwzględniający HC
Fig.3. Combustion products composition considering HC

Uwzględnienie w obliczeniach heksanu pociągnęło za sobą obniżenie wartości tlenku węgla oraz wodoru w spalinach.

4. Podsumowanie

Przedstawiona metoda może być wykorzystana do diagnozowania silnika na podstawie wykresu indykatorowego.

Literatura

1. Maćkowski J., Wilk K.: The Effect of the Mixture and Flame Front InitialTemperature on the Heat Amount Flowing Between Zones in the Combustion Engine. 12 - th International Symposium on Combustion Process , Bielsko - Biała 1991.
2. Gaydon A.G., Wolfhard H.G.: Flames, their Structure Radiation and Temperature. Chapman and Hall Ltd , London 1970.
3. Woschni G., Fieger J. : Experimentele Untersuchnugen zum Wärmenbergang bei Normaler und Klopfender Verbrennung in Ottomotor MTZ , 2 , 1982.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Jaskólski

Wpłynęło do Redakcji 14.11.1995 r.

Abstract

In this work the two - zone model of combustion process to calculations of the thermal parameters and chemical composition of products during the combustion of mixture in the spark ignition engine was used. The presented method can be utilized to the engine diagnostics based on the indicator diagram. In the model was assumed that the combustion products contained ten components: CO_2, CO, H_2O, H_2, O_2, N_2, NO, H, O and OH and that it was the equilibrium chemical composition. The presented model permits to determination the real air excess ratio in the mixture and the chemical part of toxic components at the end of combustion process.

As an example are presented the theresults of calculations carried out for engine feeded with liquid and then with gas fuel.