ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1999
Seria: TRANSPORT z.38 Nr kol. 1433

Piotr GUSTOF
Krystian WILK

ANALIZA PRZEBIEGU WYWIĄZYWANIA SIĘ CIEPŁA W DOŁADOWANYM SILNIKU ZS NA PODSTAWIE MODELU DWUSTREFOWEGO ORAZ FUNKCJI WIBEGO

Streszczenie. W pracy wyznaczono przebieg wywiązywania się ciepła w doładowanym silniku o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa do komory spalania na podstawie dwustrefowego modelu procesu spalania [1]. Jako jedno z wielu kryteriów poprawności przeprowadzonych obliczeń wykorzystano funkcję Wibego.

ANALYSIS OF THE COURSE OF RELEASED HEAT IN TURBO DIESEL ENGINE ON BASE OF THE TWO-ZONAL MODEL AND WIBE'S FUNCTION

Summary. In this work the course of released heat during of combustion process in turbo Diesel engine was determined. The calculations were carried out by means of the two-zonal model. As one from many criterions of correctness of executed computations Wibe's function was used.

1. OPIS PRZEBIEGU WYWIĄZYWANIA SIĘ CIEPŁA W KOMORZE SPALANIA SILNIKA

W przypadku spalin zawierających składniki palne, tj. posiadających energię chemiczną wyrażoną za pomocą wartości opałowej spalin W_{db}, stopień wypalenia ładunku x nie zawiera pełnej informacji o wyzwolonej energii chemicznej, określa on bowiem ilość ładunku, która przeszła przez front spalania.

W celu lepszej oceny zagadnienia zaproponowano nową definicję stopnia wypalenia ładunku y jako stosunek energii chemicznej wyzwolonej w trakcie spalania do energii chemicznej zawartej w ładunku na początku spalania:

$$y = \frac{GW_{du} - (G_u W_{du} + G_b W_{db})}{GW_{du}} \tag{1.1}$$

lub po przekształceniu:

$$y = x\left(1 - \frac{W_{db}}{W_{du}}\right), \tag{1.2}$$

gdzie: W_{du} - wartość opałowa ładunku (mieszanki), kJ/kg ,
W_{db} - wartość opałowa spalin, kJ/kg ,
G - masa ładunku, kg ,
G_u - masa ładunku w strefie nie spalonej, kg ,
G_b - masa ładunku w strefie spalonej, kg.

Jeżeli spaliny zawierają składniki palne ($W_{db}>0$), wówczas $y < x$, jeżeli spaliny nie zawierają palnych składników ($W_{db}=0$), to $y = x$.

Jednym z najważniejszych czynników charakteryzujących spalanie rozpylonego paliwa w silniku jest przebieg wywiązywania się energii chemicznej zawartej w paliwie. Decyduje on o zmianach ciśnienia i temperatury w cylindrze oraz o dynamicznych wskaźnikach przebiegu spalania, a tym samym o wartości pracy indykowanej, przekazanej na tłok, ekonomiczności wykorzystania energii, poziomie obciążeń cieplnych i mechanicznych, a także o głośności pracy silnika.

Parametrem charakteryzującym przebieg spalania jest ilość ciepła $Q_{s\varphi}$, jaka wywiązała się w okresie czasu mierzonym od chwili samozapłonu. Często określa się ją w stosunku do całkowitej ilości Q_s energii doprowadzonej na jeden obieg silnika jako współczynnik δ wyzwolenia energii chemicznej:

$$\delta = \frac{Q_{s\varphi}}{Q_s} = \frac{W_d G_{ps}}{W_d G_p} = \frac{G_{ps}}{G_p}, \tag{1.3}$$

gdzie: W_d - wartość opałowa paliwa, kJ/kg ,
G_{ps} - ilość spalonego paliwa od chwili samozapłonu, kg ,
G_p - całkowita ilość wtryśniętego paliwa, kg .

Ponieważ całkowita ilość paliwa wtryśniętego do cylindra silnika jest sumą ilości spalonego paliwa oraz tej części, która nie uległa spaleniu, a całkowita ilość ładunku w modelu dwustrefowym jest sumą ilości ładunku znajdującego się w strefie spalonej i nie spalonej, tj.:

$$G_p = G_{ps} + G_{pn}, \tag{1.4}$$

$$G = G_u + G_b, \tag{1.5}$$

gdzie: G_{pn} - ilość paliwa nie spalonego, kg ,

a ponadto energia chemiczna zawarta w dawce paliwa jest taka sama jak energia chemiczna w ładunku:

$$W_d G_p = W_{du} G, \tag{1.6}$$

więc podstawiając do wzoru (1.6) wyrażenia (1.4) i (1.5) otrzymuje się:

$$W_d G_{pn} + W_d G_{ps} = W_{du} G_u + W_{du} G_b \tag{1.7}$$

Bilansując energię chemiczną w strefach można napisać, że:

$$\left.\begin{aligned} W_d G_{pn} &= W_{du} G_u \\ W_d G_{ps} &= W_{du} G_b \end{aligned}\right\} \tag{1.8}$$

przy założeniu, że spalanie było zupełne i całkowite (w spalinach występują jedynie następujące składniki: CO_2, H_2O, O_2 i N_2). W takiej sytuacji stopień x wypalenia ładunku stosowany w opisie dwustrefowego modelu procesu spalania odpowiadałby współczynnikowi wywiązywania się ciepła δ znanemu z literatury [3,4].

W rzeczywistości w strefie spalonej występują produkty spalania paliwa o zerowej energii chemicznej oraz produkty niezupełnego i niecałkowitego spalania (takie jak

CO, H_2, OH, węglowodory i sadza) o większej od zera energii chemicznej, którą można wyrazić za pomocą wartości opałowej W_{db} spalin. Dodając i odejmując iloczyn $W_{db}G_b$ do lewej strony równania (1.7) otrzymuje się:

$$W_d G_{pn} - W_{db} G_b + W_d G_{ps} + W_{db} G_b = W_{du} G_u + W_{du} G_b \tag{1.9}$$

Bilansując energię chemiczną ładunku w cylindrze w określonej chwili można zapisać, że:

$$\left.\begin{aligned} W_d G_{pn} - W_{db} G_b &= W_{du} G_u \\ W_d G_{ps} + W_{db} G_b &= W_{du} G_b \end{aligned}\right\} \tag{1.10}$$

Podstawiając wyrażenie (1.10) do wzoru (1.3) otrzymuje się:

$$\delta = \frac{Q_s}{Q_{so}} = \frac{W_d G_{ps}}{W_d G_p} = \frac{W_{du} G_b - W_{db} G_b}{W_{du} G} = \frac{G_b (W_{du} - W_{db})}{G W_{du}} = x\left(1 - \frac{W_{db}}{W_{du}}\right) = y, \tag{1.11}$$

czyli w przypadku spalania niezupełnego i niecałkowitego współczynnik wyzwolenia energii chemicznej zawartej w paliwie y zdefiniowany wcześniej przez autorów [1] odpowiada współczynnikowi wywiązywania się ciepła δ.

Ponieważ w modelu dwustrefowym wartości współczynnika wyzwolenia energii chemicznej zawartej w paliwie były obliczane dyskretnie co 0.5 °OWK, postanowiono wyrazić je za pomocą funkcji Wibego.

2. WYKORZYSTANIE FUNKCJI WIBEGO W MODELU DWUSTREFOWYM

Wibe założył wywiązywanie się ciepła w postaci funkcji wykładniczej. Funkcja ta wyrażona jest bezwymiarowym równaniem [2]:

$$\delta = 1 - \exp\left[-a\left(\frac{\varphi'}{\varphi_s}\right)^{m+1}\right], \tag{2.1}$$

w którym:

$$\left.\begin{aligned}\varphi' &= \varphi - \varphi_o \\ \varphi_s &= \varphi_k - \varphi_o\end{aligned}\right\}, \tag{2.2}$$

gdzie: a , m - parametry funkcji Wibego,
φ - chwilowa wartość kąta obrotu wału korbowego,
φ_o - kąt obrotu wału korbowego, przy którym zakłada się początek spalania,
φ_k - kąt obrotu wału korbowego, przy którym zakłada się koniec spalania.

Prędkość wywiązywania się ciepła określona jako - $d\delta/d(\varphi'/\varphi_s)$ po zróżniczkowaniu (2.1) wyraża równanie:

$$\frac{d\delta}{d\left(\frac{\varphi'}{\varphi_s}\right)} = a(m+1)\left(\frac{\varphi'}{\varphi_s}\right)^m \exp\left[a\left(\frac{\varphi'}{\varphi_s}\right)^{m+1}\right] \tag{2.3}$$

Parametr a charakteryzuje pełność spalania, parametr m - szybkość spalania.

W celu praktycznego wykorzystania formuł (2.1) i (2.3) w matematycznym modelowaniu obiegu silnikowego lub samego przebiegu spalania wielkość obydwu tych parametrów musi być określona na podstawie analizy wywiązywania się ciepła w silnikach podobnych do badanego. Z teoretycznych przeliczeń, jakie wykonał Wibe, wynika, że ze względu na ekonomiczność wykorzystania ciepła optymalna długotrwałość spalania wynosi 40 ÷60 °OWK, natomiast wykładnik m jest zwykle zawarty w granicach 0.1÷1, zależnie od typu silnika wysokoprężnego i warunków jego pracy. W przypadku wtrysku bezpośredniego z dobrym wymieszaniem paliwa z powietrzem m jest małe, a w przypadku dzielonych komór spalania m jest odpowiednio duże. Analiza parametru m wykazuje, że określa on takie cechy przebiegu spalania, jak: maksymalna prędkość i czas potrzebny do jej osiągnięcia, czas spalania połowy ilości paliwa oraz ilość paliwa spalona do chwili osiągnięcia maksymalnej prędkości.

Praktyczna przydatność formuły Wibego jest więc w zasadniczy sposób zależna od prawidłowości doboru parametrów a i m oraz φ_s. Wynikają stąd jej ograniczenia. Przede wszystkim należy zwrócić uwagę, że wykładnik m nie jest związany z parametrami charakteryzującymi rzeczywiste fizykochemiczne warunki panujące w komorze spalania. Wiadomo np., że na maksymalną prędkość wywiązywania się ciepła wpływają w zasadniczy sposób opóźnienie samozapłonu oraz ilość paliwa wtryśnięta do cylindra

w tym okresie. W celu urealnienia praktycznych wyników matematycznego modelowania procesu spalania należałoby więc uzależnić wielkość m np. od własności samozapłonowych paliwa oraz przebiegu jego wtrysku. Ponadto dokładniejsza analiza wykazuje, że w rzeczywistych warunkach wykładnik m nie jest stały, ale ulega znacznym zmianom w czasie trwania samego spalania, a szczególnie na początku i na końcu procesu.

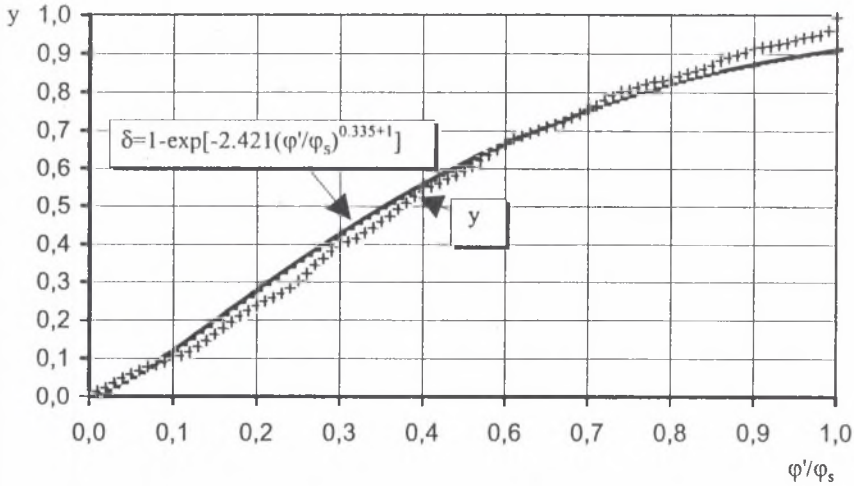
Źródłem niedokładności może być też ocena długotrwałości spalania φ_s, odpowiadająca chwili, gdy 99.9% paliwa ulegnie spaleniu; często można stwierdzić, że nawet w momencie otwarcia zaworu wylotowego wywiązywanie się ciepła nie jest jeszcze tak pełne. Jeżeli przyjmie się współczynnik wywiązywania ciepła równy 99.9 %, wówczas a = 6.908.

W opracowanym dwustrefowym modelu procesu spalania dla silników z zapłonem samoczynnym, w którym próbowano powiązać przebieg spalania z przebiegiem wtrysku paliwa przy uwzględnieniu opóźnienia samozapłonu, współczynnik wywiązywania ciepła δ wyrażony za pomocą współczynnika wyzwolenia energii zawartej w paliwie y dla λ=1.69 dla wyznaczonej długotrwałości spalania 45 °OWK przyjął postać wyrażenia (2.4):

$$\delta = 1 - \exp\left[-2.421\left(\frac{\varphi'}{\varphi_s}\right)^{0.335+1}\right] \tag{2.4}$$

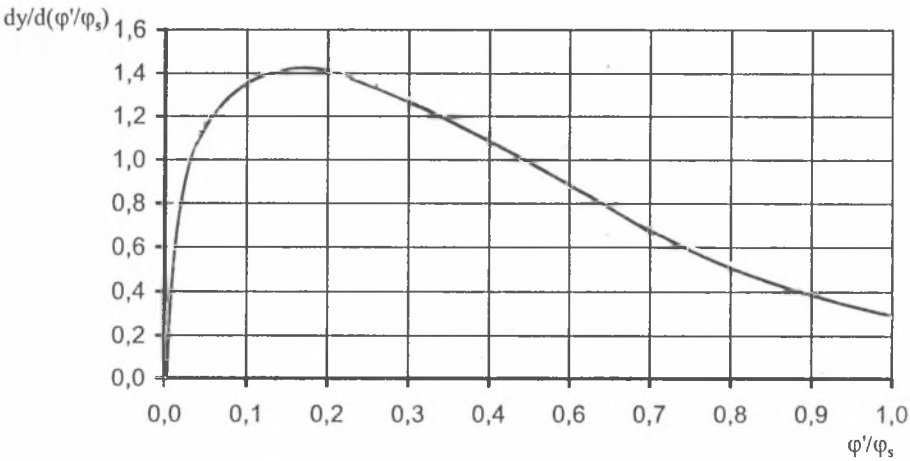
Wyznaczona na podstawie tego modelu wartość parametru a = 2.421 odpowiada spaleniu 91.1 % paliwa, a parametr m = 0.335 dużej szybkości wywiązywania się ciepła na początku spalania. Współczynnik korelacji pomiędzy dyskretnymi wartościami współczynnika wyzwolenia energii y (wydzielania się ciepła), a aproksymującą go funkcją Wibego wyniósł 99.7%.

Na rysunku 1 przedstawiono przebieg wartości dyskretnych współczynnika wyzwolenia energii chemicznej zawartej w paliwie y oraz wartości δ aproksymowanej ciągłą funkcją Wibego dla współczynnika nadmiaru powietrza λ=1.69, a na rysunku 2 przebieg prędkości wywiązywania się ciepła.



Rys.1. Przebieg wywiązywania ciepła opisany funkcją Wibego na podstawie modelu dwustrefowego dla λ=1.69

Fig. 1. The course of released heat described by Wibe's function on the base of the two-zonal model for λ = 1.69



Rys. 2. Przebieg prędkości wywiązywania się ciepła dla λ=1.69

Fig. 2. The course of the speed of released heat for λ = 1.69

3. WNIOSKI

Dwustrefowy model procesu spalania nadaje się do analizy silnika ZS. Określone wartości parametrów a i m mogą być wykorzystane do analizy przebiegu wywiązywania ciepła w podobnych silnikach. Pozwoliłoby to również obliczyć przebieg ciśnienia w czasie i porównać go z danymi pomiarowymi.

Literatura

1. 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.
2. Wibe I. : Nowoje o raboczim ciklie dwigatieliej. MASZGIZ, Moskwa - Swierdłowsk 1962.
3. Kowalewicz A. : Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych. WKŁ, Warszawa 1986.
4. Zabłocki M. : Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych, WKiŁ, Warszawa 1976.

Recenzent: Prof. dr hab.inż. Jerzy Jaskólski

Wpłynęło do Redakcji 15.10.1999 r.

Abstract

In this article the analysis of the course of released heat in turbo Diesel engine was presented. The computations were estimated by means of the two-zonal model. The object of research was the engine with immediate injection of the fuel to combustion chamber. On base of experimentally measured of the pressure coefficients of burning mixture and of released chemical energy contained in the fuel were defined. Then this factor was approximate by Wibe's function. This function was of service as criterion of correctness of executed calculations. Appears, that the two-zonal model can be used to the analysis of the course of released heat in other Diesel engine.