ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: TRANSPORT z. 57 Nr kol. 1675

Grzegorz KUBICA

ANALIZA PROCESU SPALANIA MIESZANKI POWIETRZNO-GAZOWEJ (LPG) W SILNIKU ZI

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono wyniki badań przebiegu procesu spalania mieszanki powietrzno-gazowej w silniku ZI. Podstawę analiz stanowią wyniki badań hamownianych uzupełnione obliczeniami z wykorzystaniem modelu matematycznego, przeprowadzone na silniku PERKINS AD3.152G. Badania przeprowadzono w pełnym zakresie obciążenia i prędkości obrotowej silnika, dokonując regulacji składu mieszanki oraz kąta wyprzedzenia zapłonu.

Proces spalania opisano uniwersalną funkcją wywiązywania się ciepła wg formuły Wibego. W pracy przestawiono wyniki obliczeń charakterystycznych parametrów tej funkcji oraz wyznaczono przedziały kątowe, w których zachodzi proces spalania, w zależności od warunków pracy i regulacji silnika zasilanego paliwem gazowym. Obciążenie silnika określa się stopniem otwarcia przepustnicy (**SOP**).

THE ANALYSIS OF COMBUSTION FOR AIR-GAS MIXTURE (LPG) IN SI ENGINE

Summary. The results of investigation of air – gas mixture combustion process in SI engine are presented in this paper. The analysis was done on the base of bench tests results of engine PERKINS AD3.152G, supplemented with mathematical simulations. The investigation covered full ranges of engine load and velocity. Additionally, the proportion of air – fuel and advanced ignition angle were regulated. Tested engine was fuelled LPG by mixture system. The profile of heat release during combustion was described using a universal function, formulated by Wibe. The value of characteristic parameters and crank angle periods for this function were counted in full range of work and regulation conditions. The degree of load of engine is determined by throttle opening ratio (**SOP**).

1. WPROWADZENIE

Paliwo gazowe, jakim jest mieszanina propanu i butanu (LPG), jest obecnie bardzo powszechnie wykorzystywane do zasilania pojazdów wyposażonych w silniki ZI. Jednakże w dalszym ciągu paliwo to traktowane jest jako alternatywne. Istnieje zatem potrzeba prowadzenia szczegółowych badań, które pozwolą określić, w jakim stopniu zmieniają się procesy zachodzące w cylindrze silnika, w sytuacji, kiedy jednostka konstruowana i wytwarzana pod kątem spalania benzyny jest zasilana alternatywnie paliwem gazowym.

Dotychczasowe informacje na temat przebiegu spalania mieszanki powietrzno-gazowej wskazują na odmienny charakter tego procesu w stosunku do spalania mieszanki z paliwem benzynowym, dlatego wiele uwagi poświęca się na analizę wpływu poszczególnych czynników na efektywność tego procesu. Kolejnym, równie ważnym procesem towarzyszącym spalaniu paliwa jest powstawanie substancji toksycznych. Ich ilość i rodzaj jest zależny głównie od składu paliwa i przebiegu temperatury podczas spalania ładunku.

Postęp w dziedzinie stosowanych metod badawczych daje możliwości lepszego poznania struktury powstawania i rozprzestrzeniania się płomienia. Oprócz tradycyjnych metod coraz częściej stosuje się nowoczesne metody oparte na optycznej rejestracji zjawisk zachodzących podczas procesu spalania. Uzyskany obraz pozwala na określenie szybkości i kierunków przesuwania się frontu płomienia.

Jednocześnie, bardzo często, w badaniach wykorzystuje się symulacje komputerowe oparte na modelach matematycznych. Modelowanie matematyczne pozwala na uzupełnienie wyników badań doświadczalnych o następujące informacje:

- rozkład temperatur w poszczególnych strefach,
- analizę przemian chemicznych opartą na przebiegu temperatury,
- określenie wymiany ciepła między ściankami komory spalania a czynnikiem roboczym.

2. ZAKRES I CEL PROWADZONYCH BADAŃ

Podstawę analiz stanowią wyniki badań hamownianych uzupełnione obliczeniami z wykorzystaniem modelu matematycznego, przeprowadzone na silniku PERKINS AD3.152G. Badania przeprowadzono w pełnym obszarze obciążeń i prędkości obrotowej silnika, dokonując regulacji składu mieszanki oraz kąta wyprzedzenia zapłonu.

Podstawową wielkością rejestrowaną w trakcie badań na hamowni silnikowej był przebieg zmian ciśnienia w cylindrze silnika. Opierając się na tym parametrze, w kolejnej fazie badań wykonano obliczenia z wykorzystaniem modelu dwustrefowego [1]. W wyniku tych obliczeń otrzymano podstawowe informacje na temat procesu spalania, tzn.:

- wartości masowego stopnia wypalenia mieszanki x w funkcji kąta obrotu wału korbowego φ oraz wartości maksymalne tej wielkości x_{max};
- kąty ograniczające proces spalania φ_p i φ_k;
- wartości temperatury i ciśnienia w cylindrze towarzyszące procesowi spalania.

Zasadniczym celem przeprowadzonych badań było opisanie procesu spalania za pomocą powszechnie stosowanych funkcji empirycznych opisujących szybkość wywiązywania się ciepła. Najbardziej uniwersalną i często wykorzystywaną w tym zakresie jest funkcja sformułowana przez Wibego. Założenia tej funkcji są standardowo wykorzystywane w matematycznych modelach opisujących przemiany termodynamiczne zachodzące w komorze spalania silnika spalinowego.

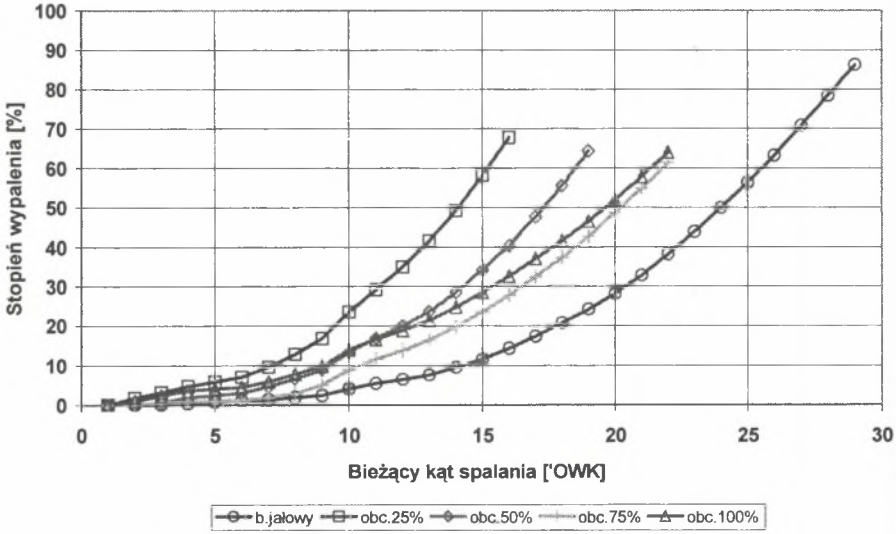
3. CAŁKOWITY STOPIEŃ WYPALENIA ŁADUNKU

Wartości masowego stopnia wypalenia ładunku uzyskano w wyniku obliczeń symulacyjnych realizowanych w dwustrefowym modelu spalania [2]. Przykładowe wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 1.)

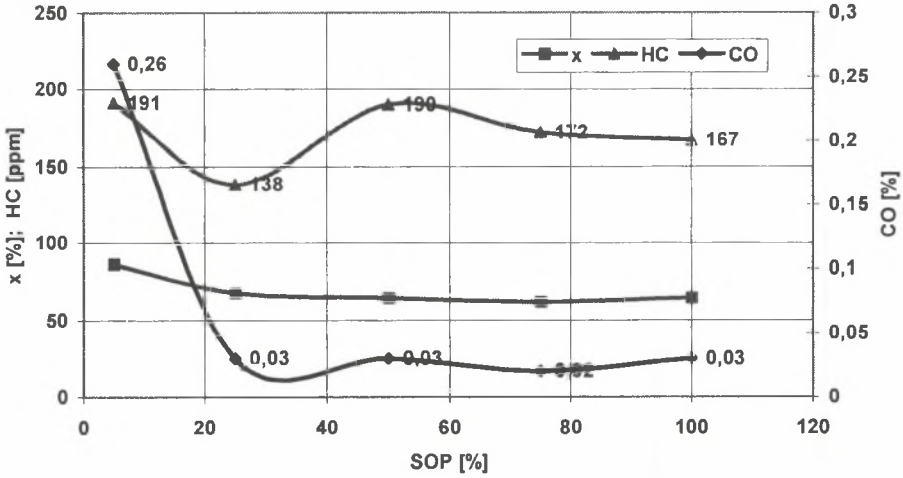
Podczas analizy wyników badań symulacyjnych szczególną uwagę przyciąga fakt, że uzyskane w obliczeniach wartości całkowitego stopnia wypalenia ładunku, w większości przypadków, mieszczą się w zakresie od 50% do 100%. Wynikający stąd wniosek wskazuje, że część ładunku nie ulega procesowi spalania. Natomiast analiza zarejestrowanych w trakcie badań udziałów HC i CO w spalinach nie potwierdza tego zjawiska (rys. 2). Wobec czego

stwierdzić można, że w rzeczywistości ładunek spala się niemalże całkowicie, a jedynie uproszczone założenia matematycznego modelu spalania „nie uwzględniają" tzw. fazy dopalania, co w efekcie daje zaniżone wartości całkowitego stopnia wypalenia ładunku.

Biorąc pod uwagę powyższe, w dalszych badaniach przyjmuje się, że ładunek spala się w 99,9% (założenie standardowo przyjmowane w obliczeniach symulacyjnych), a wynikający z obliczeń kąt końca spalania nie odpowiada kątowi, w którym proces ten definitywnie się kończy.



Rys. 1. Wpływ obciążenia silnika na przebieg procesu spalania
Fig. 1. An influence load of engine on combustion process



Rys. 2. Wyniki obliczeń stopnia wypalenia ładunku w zestawieniu z udziałami składników spalin
Fig. 2. The maximum value of heat release parameter and portions of some exhaust gas components

4. ZASTOSOWANIE FUNKCJI WIBEGO W MODELOWANIU PRZEBIEGU SPALANIA

Przebieg procesu spalania przedstawiony za pomocą funkcji Wibego jest interpretowany wartością masowego stopnia wypalenia ładunku **x**. Wartość funkcji jest bezwymiarowa, a jej równanie może przyjmować następującą postać:

$$x = 1 - \exp\left[a \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_k - \varphi_p} \right)^{m+1} \right] \tag{1}$$

gdzie:

φ – bieżący kąt obrotu wału korbowego;

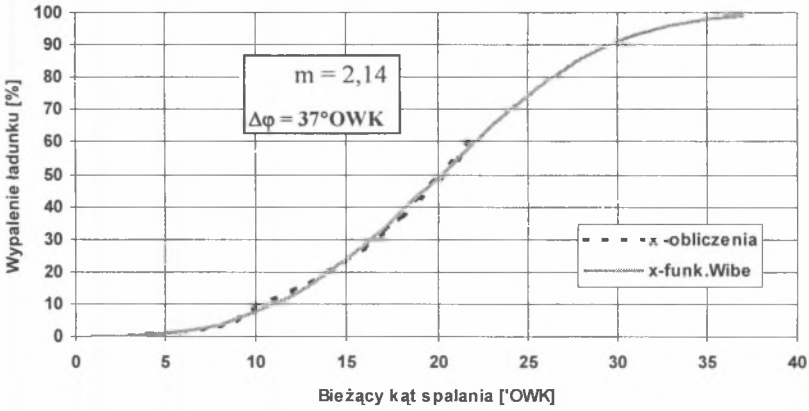
φ_p i φ_k – kąty ograniczające proces spalania;

a – parametr określający zupełność procesu spalania;

m – parametr określający szybkość procesu spalania.

Biorąc pod uwagę wcześniejsze spostrzeżenia, założono, że x_{max} =99,9%. Wobec czego **a**= 6,908. Dobór wartości parametrów funkcji Wibego sprowadza się zatem do wyznaczenia parametru **m** i określenia przedziału kątowego, w którym zachodzi proces spalania - $\Delta\varphi$. Przyjęty schemat obliczeń polegał na porównaniu wartości funkcji **x=f(φ)** obliczonych przy użyciu równania Wibego z wynikami obliczeń symulacyjnych bazujących na zarejestrowanym przebiegu ciśnienia. Jako kryterium przyjęto średnie odchylenie standardowe.

Obliczenia iteracyjne przeprowadzono wykorzystując przygotowaną aplikację komputerową, która realizowała przyjęty algorytm. Dla każdego z badanych stanów pracy silnika wyznaczono takie wartości parametru **m** oraz φ_k, przy których średnie odchylenie osiąga minimum (rys.3).



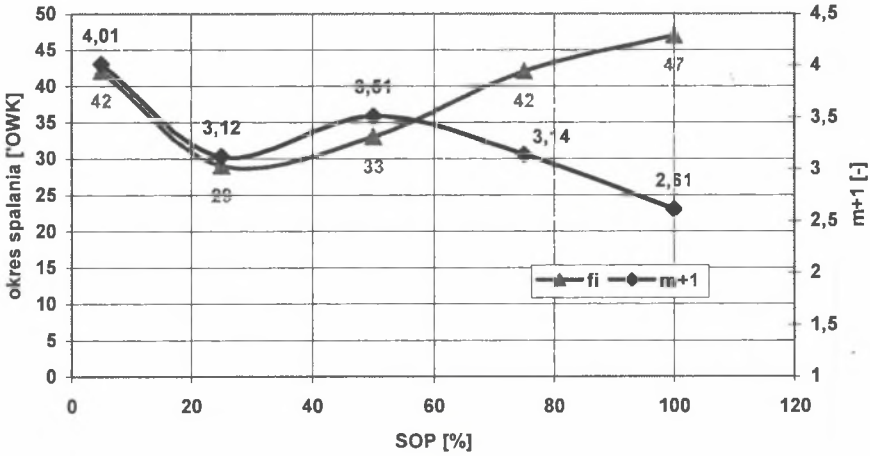
Rys. 3. Odwzorowanie funkcji Wibego dla jednego z badanych punktów pracy silnika
Fig. 3. A shape of Wibe function for one of work state of tested engine

5. WYNIKI OBLICZEŃ PARAMETRÓW FUNKCJI WIBEGO

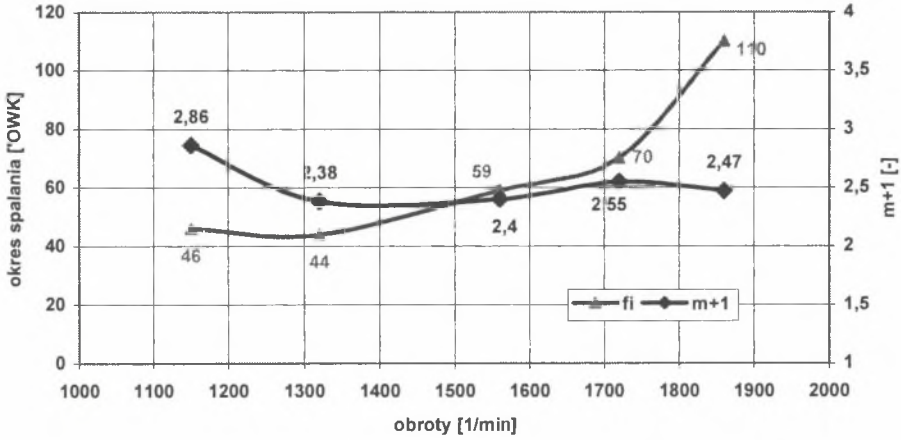
Wyniki przeprowadzonych analiz w pierwszej kolejności podają informacje o charakterze i warunkach spalania mieszanki powietrzno-gazowej, na bazie propanu i butanu. Informacje te następnie pozwoliły na określenie wartości parametrów **a** i **m** w funkcji Wibego dla silnika

zasilanego paliwem gazowym. Uzyskane wyniki stanowią uzupełnienie wiedzy w tym zakresie i mogą być wykorzystywane w badaniach innych jednostek, gdzie stosuje się podobny system spalania.

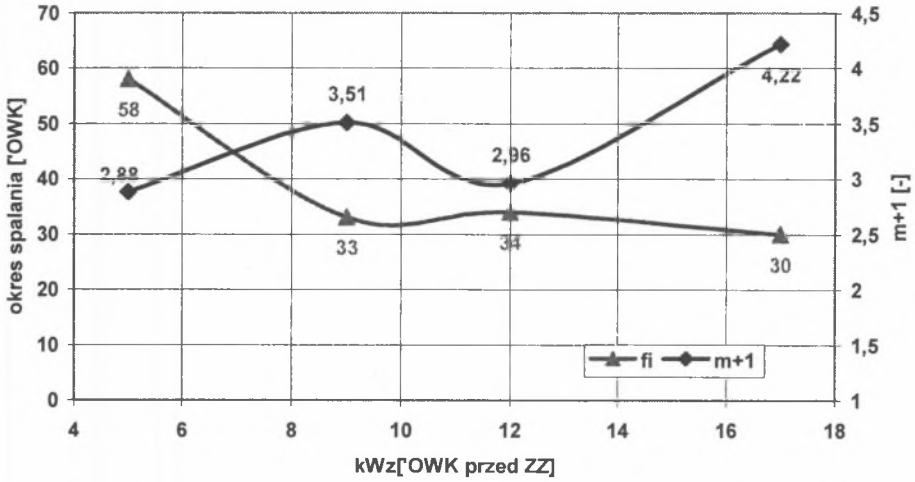
Wyznaczone w trakcie obliczeń wartości badanych parametrów przedstawiono na wykresach, w zależności od: warunków obciążenia silnika (rys.4 i 5) i warunków regulacji (rys.6 i 7).



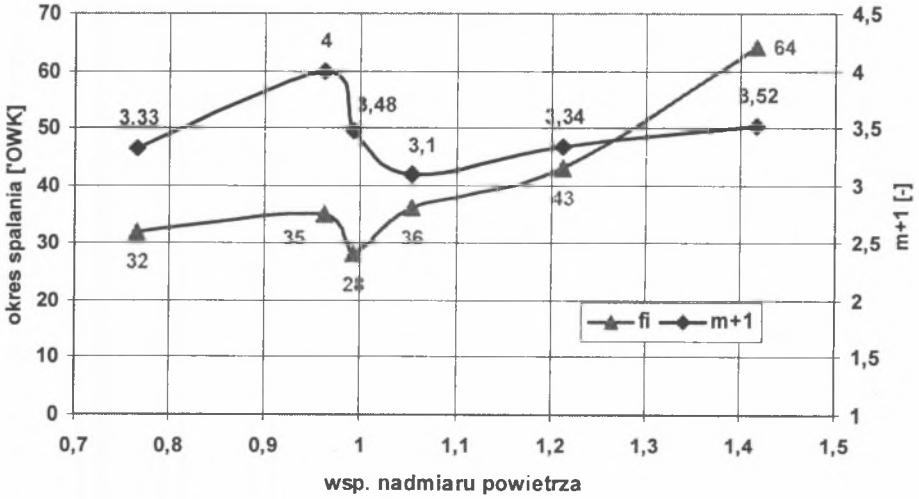
Rys. 4. Wyznaczone parametry w funkcji stopnia otwarcia przepustnicy, kWz = 9° pr.GMP
Fig. 4. Values of function parameters obtained in dependence of throttle position, kWz = 9° b. D.C.



Rys. 5. Wyznaczone parametry w funkcji stopnia prędkości obrotowej, kWz = 9° pr. GMP
Fig. 5. Values of function parameters obtained in dependence of velocity, kWz = 9° b. D.C.



Rys. 6. Wyznaczone parametry w funkcji kąta wyprzedzenia zapłonu, SOP=50%
Fig. 6. Values of function parameters obtained in dependence of ignition advanced angle, SOP=50%



Rys. 7. Wyznaczone parametry w funkcji składu mieszanki, kWz = 9° pr. GMP
Fig. 7. Values of function parameters obtained in dependence of air-fuel ratio, kWz = 9° b. D.C.

6. PODSUMOWANIE

Realizując zamierzone obliczenia wyznaczono wartości parametrów uniwersalnej funkcji wywiązywania się ciepła wg formuły Wibego, w zależności od:

- obciążenia silnika, które odpowiada danemu stopniowi otwarcia przepustnicy;
- prędkości obrotowej silnika;
- kąta wyprzedzenia zapłonu;
- współczynnika nadmiaru powietrza.

Obliczone wartości parametru **m**, dla wszystkich badanych stanów pracy, nie wykraczają poza zakres 1,61÷3,22. Natomiast, biorąc pod uwagę racjonalne wartości nastaw regulacyjnych dla badanego silnika [3]:

- kąt wyprzedzenia zapłonu - 5°pr.ZZ (b. jałowy), 8-10°pr.ZZ (wyższe obroty);
- współczynnik nadmiaru powietrza – 1,05÷1,1;
- dla częściowych obciążeń silnika wartość parametru **m** mieści się w zakresie 2,12÷2,55.

Odnosząc te wyniki do wartości powszechnie stosowanych w obliczeniach dla paliw ciekłych (tj. m=3÷5), można zauważyć, że zasadnicza różnica w przebiegu spalania paliwa gazowego polega na tym, że proces ten przebiega bardziej gwałtownie w początkowej fazie. Funkcja wydzielania się ciepła osiąga maksymalne wartości w pierwszej połowie okresu spalania. Druga połowa fazy spalania to okres dopalania i wygaszania płomieni.

Równie ciekawa jest analiza wyników obliczeń trwania okresu spalania. Fazę spalania przedstawiono jako przedział kątowy (a nie jako czas trwania), ponieważ takie ujęcie jest najczęściej przyjmowane w założeniach modelowania matematycznego. Poza tym, istnieje możliwość bezpośredniego odniesienia do faz rozrządu silnika. W związku z powyższym istnieje naturalna zależność pomiędzy okresem spalania a prędkością obrotową (rys.5), na co trzeba zwracać uwagę oceniając szybkość spalania.

Generalnie proces spalania, przy niskiej prędkości obrotowej, trwa ok. 30÷40°OWK, natomiast przy maksymalnej prędkości obrotowej dochodzi do 110°OWK. Istnieje zatem niebezpieczeństwo, że w przypadku nieodpowiednich nastaw regulacyjnych (zbyt późny zapłon, zubożona mieszanka) faza ta może przeciągnąć się poza punkt, w którym następuje otwarcie zaworu wydechowego (dla badanej jednostki jest to 134°po ZZ). W konsekwencji oznacza to, że dopalanie ładunku następuje w kolektorze wydechowym.

Literatura

1. Maćkowski J., Wilk K.: The effect of the mixture and flame front initial temperature on the heat amount flowing between zones in the combustion engine. 12th international symposium on combustion processes. Bielsko Biała, Poland 1991.
2. Kubica G.: Wpływ parametrów regulacyjnych na proces spalania w silniku ZI zasilanym paliwem gazowym (LPG). Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ser.Transport z.44, Gliwice 2002.
3. Kubica G.: Wpływ parametrów regulacyjnych na sprawność, toksyczność spalin i obciążenia cieplne silnika zasilanego paliwem gazowym. Praca doktorska. Katowice 2002.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bronisław Sendyka