ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: TRANSPORT z. 44 Nr kol. 1562

Grzegorz KUBICA

WPŁYW PARAMETRÓW REGULACYJNYCH NA PROCES SPALANIA W SILNIKU ZI ZASILANYM PALIWEM GAZOWYM (LPG)

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań i analiz wpływu parametrów regulacyjnych na proces spalania mieszanki powietrzno-paliwowej (LPG) w silniku ZI, zasilanym mieszaniną propanu i butanu. Szczegółową analizę przebiegu wywiązywania się energii w trakcie procesu spalania przeprowadzono opierając się na dwustrefowym modelu matematycznym opisującym zjawiska zachodzące w cylindrze silnika. Podstawę obliczeń stanowiły wyniki badań hamownianych silnika PERKINS AD3.152G przeprowadzone w laboratorium badań alternatywnych.

Głównym parametrem opisującym proces spalania jest masowy stopień wypalenia mieszanki **x**. Zaprezentowane wyniki przedstawiają przebieg procesu spalania w zależności od zmiennych parametrów regulacyjnych, tzn. współczynnika nadmiaru powietrza λ i kąta wyprzedzenia zapłonu **kWz**. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do określenia racjonalnych wartości nastaw regulacyjnych w silniku gazowym oraz posłużą jako wytyczne przy projektowaniu charakterystyk regulacyjnych w trakcie badań silnika zasilanego przez układ wielopunktowego wtrysku paliwa gazowego (LPG).

AN INFLUENCE OF REGULATION PARAMETERS ON COMBUSTION PROCESS IN SI ENGINE FUELLED BY LPG

Summary. The results of investigations and analysis an influence of regulation parameters on combustion process of air-gas mixture in SI engine fuelled by LPG are presented in this paper. The detailed analysis was conducting according to assumptions of dual-zone mathematical model of internal combustion. The model counting was based on bench test results of PERKINS AD3.152G tested in laboratory of alternative fuels.

The main parameter characteristic in combustion process is the heat release ratio **x**. The results presented are showing an influence of regulation parameters, A/F ratio λ and ignition advanced angle **kWz**, on the general profile of combustion process. The obtained results were the base to sign the reasonable values of regulation parameters in that engine and would be significant in creation of regulation profiles in engine fuelled by multi-point injection system of LPG in the next stage of research.

1. WPROWADZENIE

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 analizie wpływu poszczególnych czynników na efektywność tego procesu. Kolejnym, równie ważnym procesem towarzyszącym spalaniu paliwa, jest powstawanie substancji toksycznych. Ich ilość i rodzaj są zależne 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.

Olbrzymi wkład w badania wnoszą również szeroko stosowane 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 na podstawie przebiegu temperatury,
- określenie przepływu ciepła między ściankami komory spalania a czynnikiem roboczym.

Analiza przemian chemicznych obrazuje proces spalania ładunku. Podstawowym parametrem charakteryzującym te przemiany jest stopień wypalenia mieszanki x[-], a jego przebieg x(φ) w trakcie procesu spalania świadczy o charakterze zachodzących przemian i o szybkości wywiązywania się ciepła. Ponadto końcowa wartość tego parametru może odzwierciedlać (np. w ujęciu procentowym), jaka ilość świeżego ładunku przeszła przez front spalania, co z kolei świadczy o jakości samego procesu.

W przeprowadzonych badaniach stopień wypalenia ładunku wyznaczono na podstawie obliczeń modelowych, które były poprzedzone badaniami na hamowni silnikowej.

2. OPIS STANOWISKA I PRZEPROWADZONYCH BADAŃ [1]

2.1. Aparatura kontrolno–pomiarowa

Badania przeprowadzono na stanowisku hamownianym typu HPS-75, wyposażonym w odpowiednio dobrany zestaw aparatury pomiarowej. Zestaw ten umożliwiał zarówno określenie aktualnego stanu pracy silnika, jak i sterowanie jego zasilaniem. Do zasadniczych parametrów, które mierzono w sposób ciągły, należały:

- ciśnienie indykowane,
- masowe zużycie paliwa,
- masa powietrza zasysanego przez silnik,
- temperatury i ciśnienia paliwa gazowego, mieszaniny powietrzno-gazowej oraz spalin,
- moc, moment i prędkość obrotowa silnika,
- temperatura cieczy chłodzącej silnik i oleju,
- udziały składników toksycznych w spalinach.

2.2. Procedury pomiarowe

Ponieważ zasadniczym celem badań było zebranie jak największej ilości danych określających parametry pracy silnika, w badaniach zastosowano wielokanałową kartę akwizycji danych firmy Keithley. Chwilowe wartości mierzonych parametrów gromadzono w

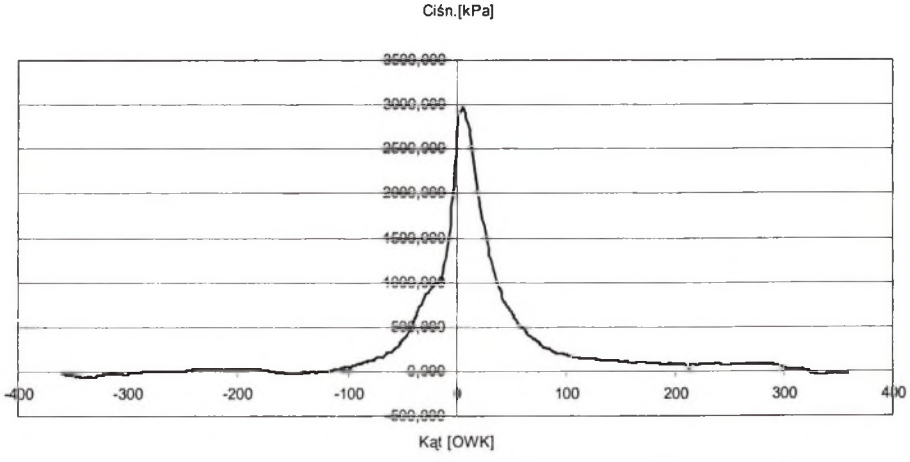
uporządkowanych macierzach wielowymiarowych. Przetwarzanie tych danych oraz ich analizę zapewniały procedury oprogramowania naukowego ASYST. Za ich pomocą, między innymi, określono przebieg zmian ciśnienia indykowanego w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika (rys 1).

Zakresy zmian parametrów obciążenia i regulacji silnika przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zakres zmienności wybranych parametrów

Wielkość	Zakres zmienności
Prędkość obrotowa	850.....2100 obr/min
Stopień otwarcia przepustnicy	5% 25% 50% 75% 100%
Współczynnik nadmiaru powietrza	0,71.....1,51
Kąt wyprzedzenia zapłonu	5°.....17° przed GMP



Rys. 1. Przebieg zmian ciśnienia indykowanego
Fig. 1. An indicating pressure profile

3. GŁÓWNE ZAŁOŻENIA DWUSTREFOWEGO MODELU SPALANIA

W prezentowanym modelu przestrzeń komory spalania podzielona jest na dwie strefy oddzielone od siebie nieskończenie cienkim frontem płomienia. Wartości temperatur w poszczególnych strefach są jednorodne, natomiast temperatura frontu płomienia jest równa temperaturze spalin [2]. Zakłada się, że dany jest wykres indykatorowy, tzn. przebieg ciśnienia $\mathbf{p=p(\varphi)}$ i zmiany objętości $\mathbf{V_i=V_i(\varphi)}$ przestrzeni roboczej, w zależności od kąta obrotu wału korbowego.

Rys. 2. Składniki bilansu energii w poszczególnych strefach
Fig. 2. The components of each zone balance of energy

Model stanowią następujące równania dla elementarnego kąta **dφ** obrotu wału korbowego:

- bilans energii strefy niespalonej (mieszanki),

$$dQ = dU_u + dI_u + p * dV_u + dQ_{wu} \tag{1}$$

- bilans energii frontu spalania,

$$dI_u = dI_b + dQ \tag{2}$$

- bilans energii strefy spalonej (spalin),

$$dI_b = dU_b + p * dV_b + dQ_{wb} \tag{3}$$

- termiczne równania stanu stref,

$$p * V_u = G_u * R_u * T_u \tag{4}$$

$$p * V_b = G_b * R_b * T_b \tag{5}$$

- równania stanu ilości substancji i objętości,

$$G = G_u + G_b \tag{6}$$

$$V_i = V_u + V_b \tag{7}$$

- stopień wypalenia ładunku,

$$x = \frac{G_b}{G} \tag{8}$$

- stopień wyzwolenia energii chemicznej zawartej w paliwie,

$$y = x * \left(1 - \frac{W_{db}}{W_{du}}\right) \tag{9}$$

gdzie:

U_u, U_b – energia wewnętrzna (fizyczna i chemiczna) mieszanki i spalin;
I_u, I_b – entalpia (fizyczna i chemiczna) mieszanki i spalin;

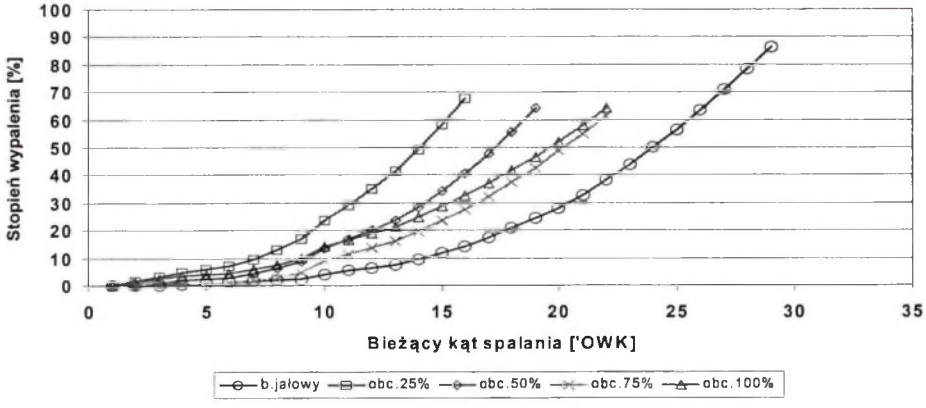
T_u, T_b – temperatura strefy mieszanki i spalin;
V_u, V_b – objętość chwilowa strefy mieszanki i spalin;
V_i - objętość chwilowa przestrzeni roboczej w cylindrze;
p– ciśnienie panujące w cylindrze;
Q – ciepło dopływające do strefy mieszanki od frontu płomienia;
Q_{wu}, Q_{wb} - ciepło dopływające do ścian komory spalania (głowica, tłok, tuleja) ze strefy mieszanki i spalin;
G_u, G_b – masa substancji mieszanki i spalin na cykl;
G – masa ładunku na cykl.
x – stopień wypalenia ładunku,
y - stopień wyzwolenia energii chemicznej zawartej w paliwie,
W_{du}, W_{db} – wartość opałowa mieszanki i spalin.

W obliczeniach mieszankę i spaliny traktuje się jako gazy półdoskonałe. Energię chemiczną mieszanki i spalin (niespalonych zupełnie) wyrażono za pomocą wartości opałowej.

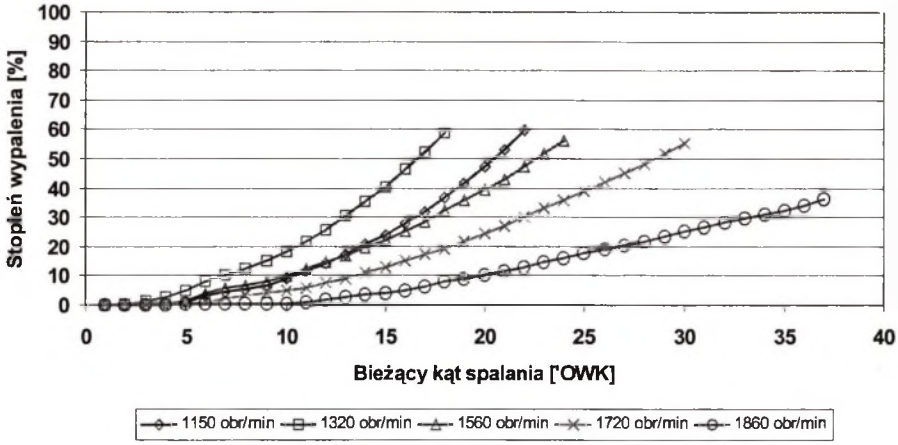
4. OPRACOWANIE WYNIKÓW

Analizy procesu spalania, w badanych stanach pracy silnika, dokonano w trakcie obliczeń modelowych. Podstawą obliczeń modelowych jest zarejestrowany w trakcie badań na hamowni wykres indykatorowy.

Uzyskane podczas modelowania dane na temat przebiegu spalania przedstawiają kształt funkcji wypalenia ładunku i można na ich podstawie dokonać charakterystyki procesu spalania, określając m.in. maksymalne wypalenie, czas trwania i szybkość zachodzących przemian.

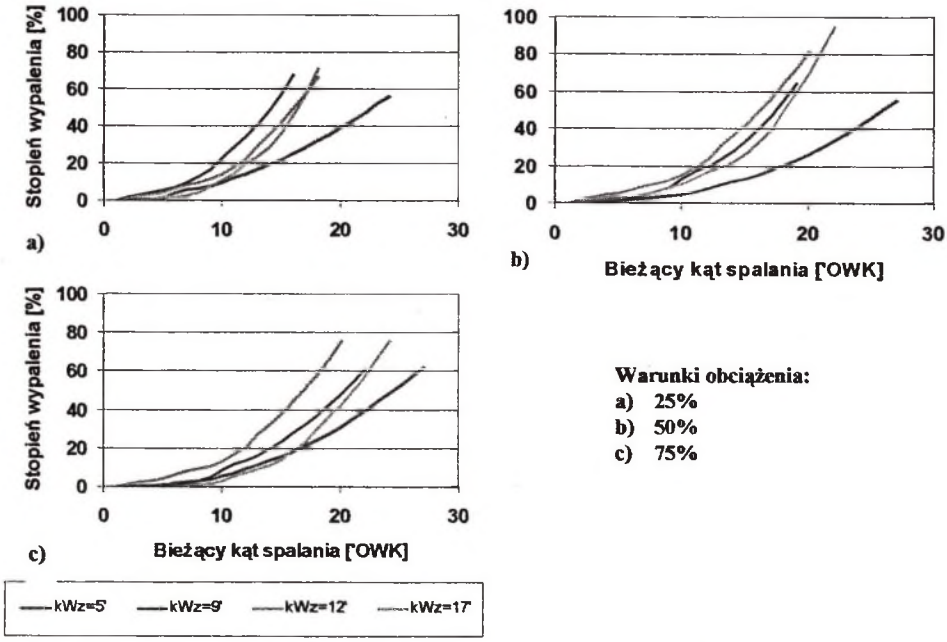


Rys. 3. Wpływ obciążenia silnika na przebieg procesu spalania; kWz=9°, λ≈1,05
Fig. 3. An influence of load on combustion process in engine; kWz=9°, λ≈1,05



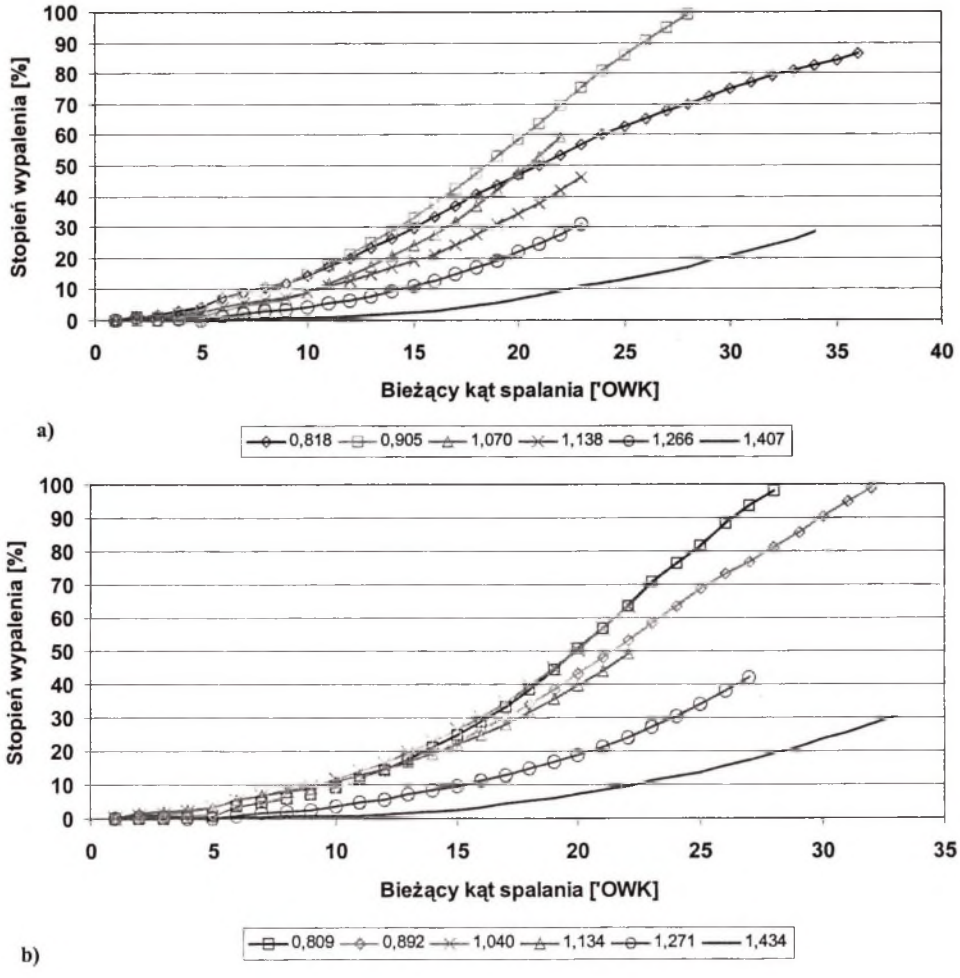
Rys. 4. Wpływ zmiany prędkości obrotowej na przebieg procesu spalania kWz=5°, λ≈1,05, obc. 25%

Fig. 4. An influence of velocity on combustion process in engine; kWz=5°, λ≈1,05, obc. 25%



Rys. 5. Wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu na przebieg procesu spalania w różnych warunkach obciążenia silnika; λ≈1,05

Fig. 5. An influence of ignition advanced angle on combustion process in variable loading conditions of engine; λ≈1,05



Rys. 6. Wpływ regulacji składu mieszanki na przebieg procesu spalania w różnych warunkach obciążenia silnika: a) obc. 25%, b) obc. 50%

Fig. 6. An influence of A/F ratio on combustion process in variable loading conditions of engine: a) obc. 25%, b) obc. 50%

Opracowanie wyników w zakresie analizowanych zagadnień sprowadza się do przedstawienia zmian ogólnego obrazu spalania na przykładzie stopnia wypalenia ładunku. Przedstawione poniżej przykłady prezentują zmiany w przebiegu stopnia wypalenia ładunku w różnych warunkach obciążenia (rys.3 i 4) i regulacji silnika (rys.5 i 6).

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analiza procesu spalania polegała na obserwacji zmian stopnia wypalenia ładunku **x** w trakcie spalania. Zaobserwowano, że wzrost obciążenia (rys.3) przy ustalonych nastawach regulacyjnych wydłuża proces spalania nie zmieniając zasadniczo jego przebiegu, jak również maksymalnego stopnia wypalenia ładunku. Wyjątkiem jest tutaj praca na biegu jałowym, gdzie ładunek wypala się znacznie dokładniej i proces trwa znacznie dłużej.

Trzeba jednak zauważyć, że dawka paliwa na biegu jałowym jest znacznie mniejsza, niż w pozostałych przypadkach.

Wzrost prędkości obrotowej **n** (rys.4) pogarsza warunki spalania, szczególnie w górnej części zakresu (powyżej 1600 obr/min). Kolejny wykres (rys.5) przedstawia wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu **kWz** na przebieg procesu spalania. Jednoznacznie wynika z niego, że lepsze parametry spalania uzyskuje się przy wyższych wartościach kąta (**kWz** = 12° i 17°).

Największe zmiany w przebiegu spalania wywołuje regulacja składu mieszanki (rys.6a i 6b). Stopień wypalenia ładunku **x** drastycznie spada po przekroczeniu składu stechiometrycznego ($\lambda>1$). Interesujący jest również sam przebieg procesu i czas jego trwania. Najkrócej trwa spalanie ładunku o proporcjach składników odpowiadających $\lambda=1{,}04\div1{,}07$. Dodatkowo obserwując sam rozwój procesu, widać wyraźnie, że spalanie mieszanek ubogich przebiega następująco: ładunek rozpala się do pewnego stopnia, a następnie nagle gaśnie. Natomiast mieszanki wzbogacone ($\lambda<1$) rozpalają się, następnie proces stabilizuje się i stopniowo wygasa.

Zaprezentowane wyniki są efektem obliczeń modelowych, dlatego też w warunkach rzeczywistych, w niektórych przypadkach, można spodziewać się wyższych wartości stopnia wypalenia mieszanki, ponieważ modelowanie nie uwzględnia ewentualnej fazy dopalania ładunku.

Literatura

1. Kubica G., Flekiewicz B., Wilk K.: Koncepcja stanowiska i procedury badań silnika gazowego zasilanego układem wtryskowym. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej z.7-M/2000. Kraków 2000.
2. Maćkowski J., Wilk K.: The effect of the mixture and flame front initial temperature on the heat amount flowing beetween zones in the combustion engine. 12th international symposium on combustion processes. Bielsko Biała, Poland 1991.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stefan Postrzednik

Abstract

The results of investigations and analysis an influence of regulation parameters on combustion process of air-gas mixture in SI engine fuelled by LPG were counted in that research. The object of investigation was PERKINS AD3.152G. The main parameter showing the character of combustion process is the heat release ratio **x**, which was counted with the support of dual-zone mathematical model of internal combustion. The obtained results of heat

release ratio give possibility to describe preciously this process by others, detailed parameters: maximum value of heat release ratio **x**, duration of combustion period and speed of combustion.

Artykuł stanowi sprawozdanie z realizacji pracy BW-466/RM10-2/2002.