

## **Analiza wybranych parametrów spalania w silniku dwupaliwowym zasilanym CNG**

**ZDZISŁAW STELMASIAK**

Politechnika Łódzka Filia w Bielsku-Białej  
Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów

W artykule przedstawiono wyniki badań parametrów procesu spalania w silniku dwupaliwowym zasilanym gazem ziemnym sprężonym (CNG). Parametry będące przedmiotem analizy obliczono na podstawie wykresów indykatorowych z badań jednocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym i wtrysku bezpośrednim ICA90 zasilanego dwupaliwowo. Przedmiotem analizy było porównanie przebiegów ciśnienia, przyrostu ciśnienia, temperatury i szybkości wydzielania ciepła w czasie spalania przy zasilaniu dwupaliwowym i tradycyjnym. Ponadto przedstawiono wpływ wielkości dawki inicjującej i udziału paliwa gazowego na przebieg omawianych parametrów. Badania wykazały odmienny przebieg spalania paliwa gazowego zależny głównie od wielkości dawki inicjującej, obciążenia silnika i koncentracji paliwa gazowego w ładunku. Wnioski ogólne mogą być pomocne przy adaptacji silników o zapłonie samoczynnym do zasilania zarówno gazem ziemnym jak i innym paliwem gazowym o zbliżonym składzie.

### **1. Wstęp**

W Katedrze Ciepłych Maszyn Tłokowych, obecnie Silników Spalinowych i Pojazdów, Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej od 1986 roku prowadzone są badania nad dwupaliwowym zasilaniem silników o zapłonie samoczynnym. Głównym paliwem przewidywanym w tym zasilaniu jest gaz ziemny sprężony (CNG), który ze względu na zasoby, cenę i dostępność może być traktowany jako zasadnicze paliwo zastępcze dla silników trakcyjnych.

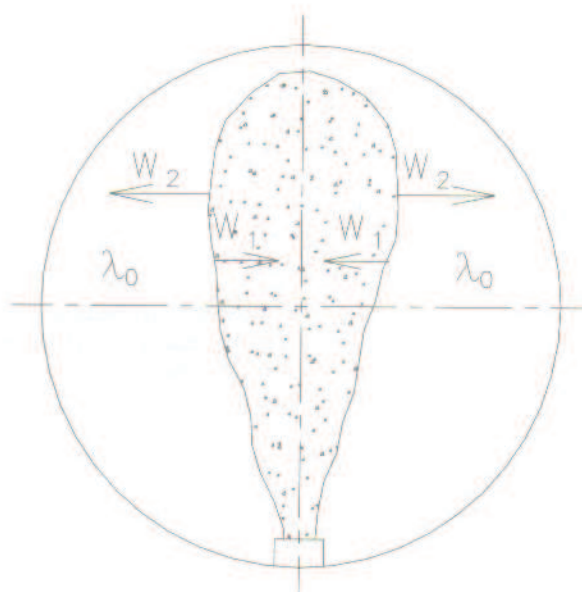
Wykonane dotychczas badania systemów dwupaliwowych oraz iskrowych wykazują szereg pozytywnych cech silników dwupaliwowych w stosunku do gazowych z zapłonem iskrowym. Do podstawowych zalet silników dwupaliwowych należą:

- większa sprawność ogólna;
- możliwość pracy w szerokim zakresie składu mieszaniny gaz-powietrze;
- spokojniejsza praca przy zmianie obciążenia i prędkości obrotowej silnika;

- łatwy rozruch;
- możliwość ciągłej pracy silnika przy awarii systemu lub braku gazu.

Cechy te są szczególnie istotne w silnikach autobusowych, gdzie ze względu na transport ludzi, pewność pracy silnika ma podstawowe znaczenie. Silniki dwupaliwowe charakteryzują się ponadto mniejszą toksycznością od silników gazowych o zapłonie iskrowym [1, 2].

Spalanie gazu w silniku dwupaliwowym zależy jest od wielkości dawki inicjującej ON, jakości rozpylenia i zasięgu strugi paliwa ciekłego [2]. Schemat przebiegu spalania przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat spalania gazu i oleju napędowego w silniku dwupaliwowym.  
Fig. 1. Scheme of the gas and diesel oil combustion in a dual fuel engine.

Najlepsze warunki zapłonu ma porcja paliwa wtryskiwana w I fazie wtrysku i znajdująca się na zewnętrznej powierzchni strugi. W strefie tej występuje największe stężenie tlenu, a odparowanie i wymieszanie paliwa z powietrzem jest najlepsze [4]. Od powierzchni strugi płomień przenosi się w kierunku jej środka z prędkością  $w_1$  oraz nazewnątrz strugi w strefę jednorodnej mieszaniny gaz-powietrze z prędkością  $w_2$ . Z uwagi na znaczne różnice w jakości ładunku wewnątrz i na zewnątrz strugi przebieg spalania w tych strefach jest odmienny. Na powierzchni strugi proces odparowania paliwa i mieszania z powietrzem jest kontrolowany przez dyfuzję, której szybkość zależy od prędkości ruchu powietrza, temperatury i ciśnienia. Po zapłonie par paliwa na powierzchni strugi, przebieg procesu spalania zależy od dyfuzji tlenu do odparowanego paliwa [4].



Krople paliwa znajdujące się wewnątrz strugi spalają się wolniej z uwagi na utrudniony dostęp tlenu. Szybkość spalania jest regulowana zarówno kinetyką reakcji chemicznych jak i szybkością dyfuzji tlenu do wnętrza strugi. Z uwagi na mniejszą koncentrację tlenu, wywołaną obecnością gazu w mieszaninie, szybkość dyfuzji tlenu jest mniejsza od szybkości dyfuzji z powietrza (szczególnie w zakresie bogatych mieszanin gaz-powietrze). Wpływa to na zmniejszenie szybkości spalania par paliwa ciekłego. Równocześnie obecność gazu w mieszaninie powoduje powstanie jeszcze przed wtryskiem paliwa wolnych rodników, nadtlenków i aldehydów, będących produktami rozpadu węglowodorów wchodzących w skład gazu. Stanowią one centra zapłonu powodując skrócenie chemicznej zwłoki zapłonu. Jednocześnie zmniejsza się szybkość odparowania paliwa ciekłego wpływająca na fizyczne opóźnienie zapłonu. Całkowita zwłoka zapłonu, wynikająca ze zwłoki chemicznej i fizycznej, zależy od rodzaju gazu, a właściwie od rodzaju węglowodoru stanowiącego jego główny składnik palny [5].

Wewnątrz strugi spalają się równocześnie olej napędowy i paliwo gazowe. Z uwagi na bogatszą mieszaninę w strefie tej panują wyższe temperatury, w związku z czym prędkość propagacji płomienia jest większa niż na zewnątrz  $w_1 > w_2$ . W strefie objętej strugą paliwa ciekłego występują zatem korzystne warunki dla zapłonu i spalania gazu. Ze względu na wysokie temperatury i małe straty ciepłe wewnątrz strugi spalane są całkowicie nawet ubogie mieszaniny gaz-powietrze o  $\lambda_o$  poza dolną granicą palności [3]. Proces spalania wewnątrz strugi ze względu na zmieniający się skład mieszaniny jest niekontrolowany.

Na zewnątrz strugi występuje jednorodna mieszanina gaz-powietrze o  $\lambda_o = \text{const}$ . Płomień rozchodzi się w tej strefie od powierzchni strugi w kierunku ścianek komory spalania z prędkością  $w_2 < w_1$ , malejącą w miarę oddalania się od strugi. Zmniejszanie prędkości płomienia związane jest z gradientem temperatury oraz powiększającymi się stratami ciepła do ścianek komory spalania. Proces spalania w tej strefie może być kontrolowany w zakresie palności mieszaniny przez zmianę współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda_o$ . Dla mieszanek o  $\lambda_o$  poza granicą palności proces spalania jest niekontrolowany. Przy ubogich mieszaninach może zachodzić zjawisko powolnego spalania lub nawet wygaszania płomienia w warstwach odległych od strugi (spalanie niecałkowite) [2, 3].

Z przedstawionych danych wynika, że wielkość dawki inicjującej ON, jakość rozpylenia i zasięg strugi ma istotny wpływ na parametry pracy i przebieg spalania gazu w silnikach dwupaliwowych.

## 2. Obiekt i metodyka badań

Badania przeprowadzono na jednocylindrowym silniku o zapłonie samoczynnym i wtrysku bezpośrednim ICA90 produkcji WSW Andrychów [3].

Dane techniczne silnika:

średnica cylindra:	90 mm;
skok tłoka:	90 mm;
objętość skokowa:	573 cm <sup>3</sup> ;
stopień sprężania:	16,8
moc znamionowa:	6,1 kW;

prędkość obrotowa mocy znamionowej: 3000 obr/min;  
 wtrysk bezpośredni do toroidalnej komory umieszczonej w tłoku;  
 kąt wyprzedzenia wtrysku: 28°OWK przed GMP;  
 wtryskiwacz: 4 otworkowy

W badaniach stosowano cztery różne dawki inicjujące oleju napędowego: 10, 15, 20, 25 mm<sup>3</sup>/cykl. Ilość gazu regulowano przepustnicą mieszalnika i zaworem kulowym ograniczającym maksymalny wydatek gazu dopływającego do silnika.

Ilość energii dostarczanej w postaci paliwa gazowego obliczano z wzoru:

$$Q_g = \frac{V_g \cdot W_g}{m_{on} \cdot W_{on} + V_g \cdot W_g} \cdot 100\%, \quad (1)$$

gdzie:  $m_{on}$  — masa oleju napędowego [kg/s];

$V_g$  — objętość gazu [nm<sup>3</sup>/s];

$W_{on}$  — wartość opałowa oleju napędowego [MJ/kg];

$W_g$  — wartość opałowa gazu [MJ/nm<sup>3</sup>]

Stężenie toksycznych składników spalin mierzono analizatorami firmy Pierburg AG w podczerwieni CO, płomieniowo-jonizacyjnym CH oraz chemoluminescencyjnym NO<sub>x</sub>.

Parametry spalania obliczano na podstawie średniego wykresu indykatorowego ze 128 kolejno po sobie następujących cykli pojedynczego spalania. Wykresy indykatorowe rejestrowano przy pomocy układu INDIMETER typ 619 i nadajnika kąta obrotu wału korbowego typ 3016 produkcji AVL. Wartość ciśnienia w cylindrze rejestrowano co 0,5°OWK w całym zakresie cyklu roboczego to znaczy dla części wysokociśnieniowej i pętli wymiany ładunku.

### 3. Wyniki badań

W silniku dwupaliwowym spalanie oleju napędowego i mieszaniny gaz powietrze przebiega równocześnie. Z uwagi jednak na różne własności paliw i różne warunki spalania czas trwania obydwu procesów i ich przebieg są różne. Autor w opracowanym przez siebie modelu teoretycznym założył, że proces spalania obydwu paliw rozpoczyna się w tym samym czasie określonym przez zwłokę zapłonu oleju napędowego [6]. Spalanie ON ma przebieg podobny do spalania w silniku tradycyjnym. Przy małych dawkach inicjujących kąt całkowitego spalania ON jest mniejszy od kąta spalania w silniku pracującym przy tym samym obciążeniu i zasilanym ON. Spalanie gazu zależy od składu mieszaniny gaz-powietrze, od wielkości dawki inicjującej i temperatury czynnika. Całkowity kąt spalania gazu jest większy od kąta spalania dawki inicjującej.

W modelu teoretycznym założono zatem różne kąty i prędkości spalania dla obydwu paliw [6]. Parametry silnika dwupaliwowego zależne są od sumy efektów cieplnych obydwu procesów i mogą być w szerokim zakresie regulowane przez zmianę parametrów regulacyjnych silnika.

Analiza parametrów spalania obliczonych na podstawie wykresów indykatorowych silnika 1CA90 zasilanego dwupaliwowo (rys. 2) pokazuje występowanie dwóch wyraź-



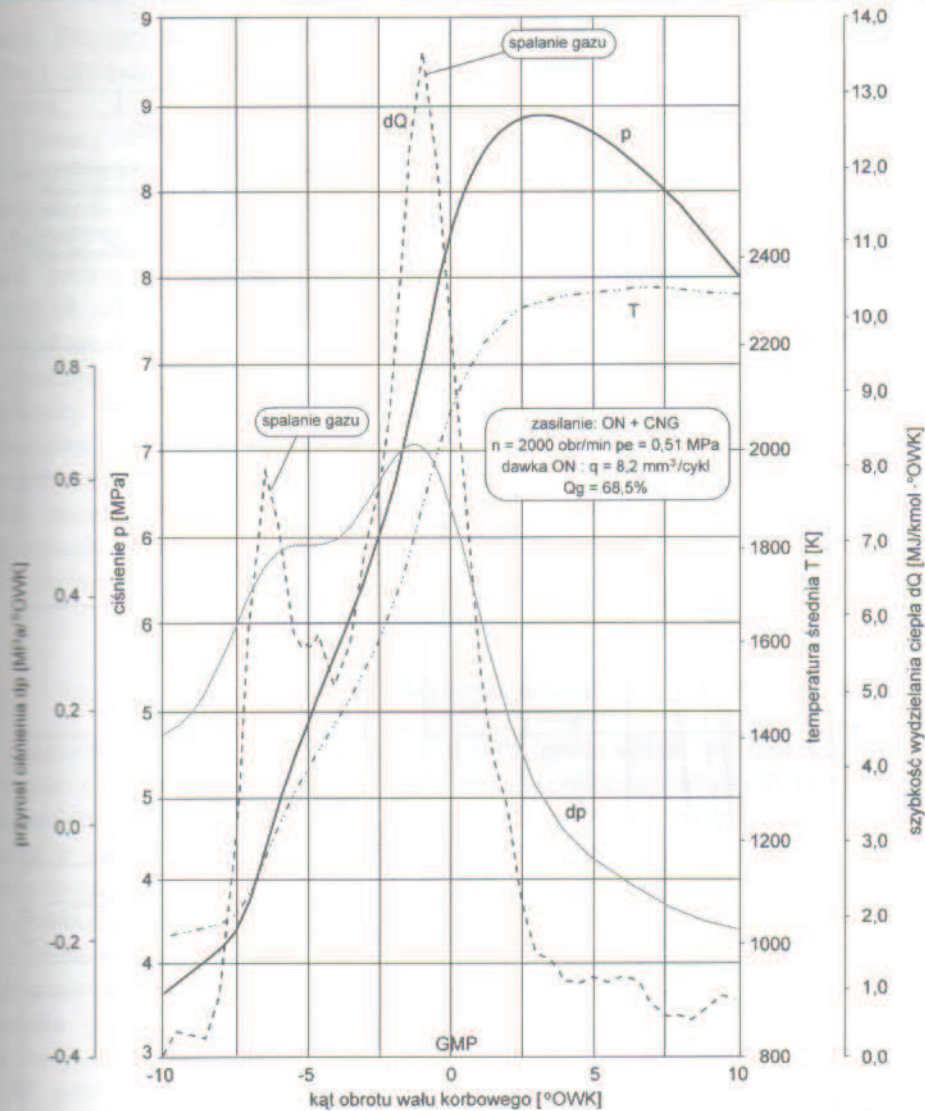
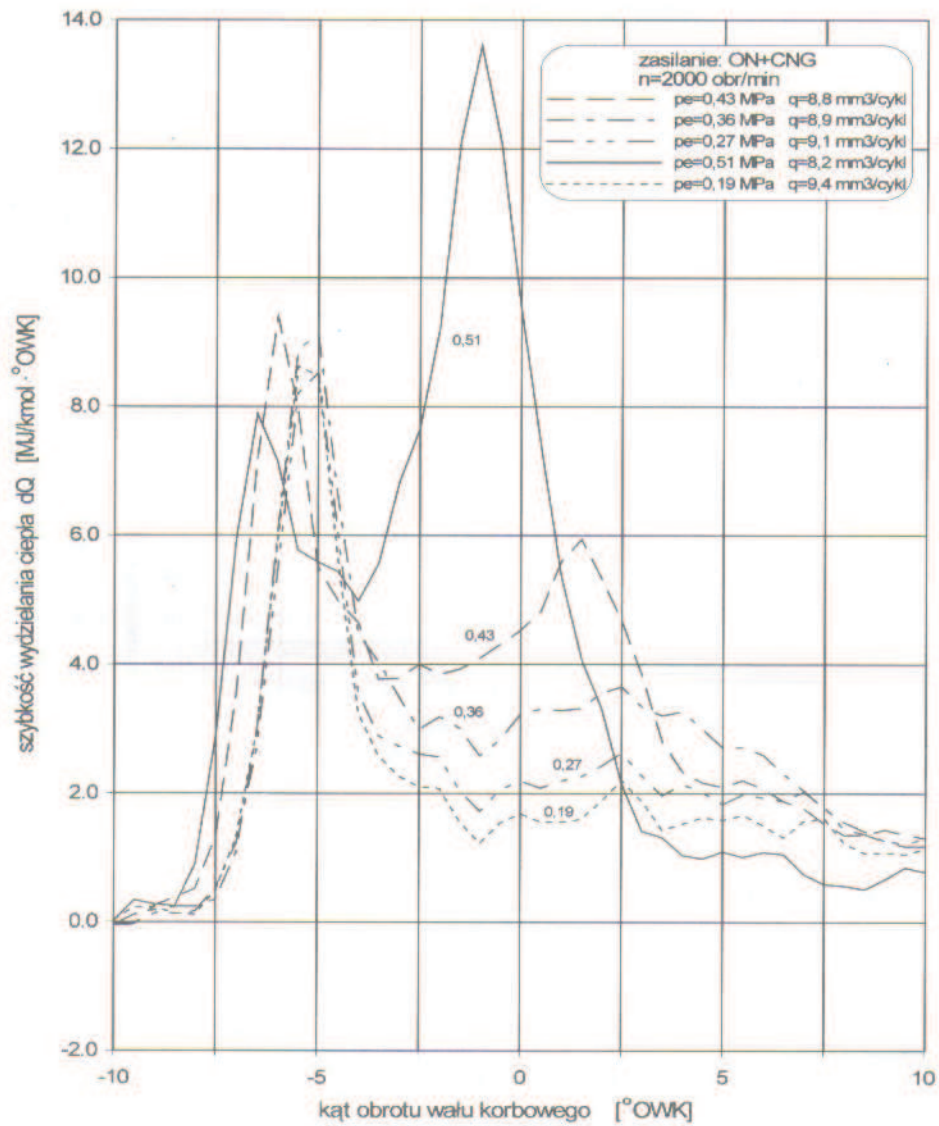


Fig. 2. Zmiany parametrów spalania w silniku ICA90 zasilanym dwupaliwowo: prędkość obrotowa 2000 obr/min; dawka inicjująca oleju napędowego 8,2 mm<sup>3</sup>/cykl.

Fig. 2. Change of combustion parameters of the ICA90 dual fuel engine; n = 2000 rpm; injection dose 8,2 mm<sup>3</sup>/cycle.

nych maksimumów szybkości wydzielania ciepła. Pierwsze maksimum odpowiada spalaniu ON drugie spalaniu gazu. Maksimum odpowiadające spalaniu gazu jest opóźnione około 5°OWK w stosunku do ON i występuje przed GMP. Przebieg spalania obydwu paliw wpływa na rejestrowane ciśnienie w cylindrze, na którym widoczne są wyraźne dwa punkty przegięcia występujące między początkiem spalania a GMP.

W przeprowadzonych badaniach, zmianę obciążenia silnika uzyskiwano przez zmniejszanie ilości gazu dopływającego do silnika przy stałej wielkości dawki inic-



Rys. 3. Przebieg szybkości wydzielenia ciepła w czasie spalania w silniku zasilanym dwupaliwowo dla różnych obciążeń silnika: udział energii dostarczonej z gazem dla  $p_e = 0,51$  MPa — 68,5%, dla  $p_e = 0,19$  MPa — 44,1%; kąt wyprzedzenia wtrysku — 28°OWK.

Fig. 3. Change of heat release rate in the combustion process of a dual fuel engine for different engine load: thermal gas substitute diesel oil for  $p_e = 0,51$  MPa — 68,5%, for  $p_e = 0,19$  MPa — 44,1%; injection timing — 28 deg BTDC.



jącej. Przyjęty system regulacji powodował, że przy małych obciążeniach silnik był zasilany uboższą mieszaniną gaz-powietrze. Powodowało to zmiany w przebiegu spalania gazu.

W miarę zubażania mieszaniny gaz-powietrze maleje maksimum wydzielania ciepła odpowiadające spalaniu gazu (rys. 3). Równocześnie przesuwają się one w kierunku późniejszych kątów w miarę zmniejszania obciążenia i występuje po GMP.

Zmiany współczynnika nadmiaru powietrza mieszaniny gaz-powietrze w warunkach badań pokazanych na rys. 3 wynosiły: od  $\lambda_o = 2,32$  ( $p_e = 0,51$  MPa) do  $\lambda_o = 6,13$  ( $p_e = 0,19$  MPa). Udział energii dostarczonej do silnika wraz z paliwem gazowym zmieniał się w granicach 68,5%+44,1%.

Zmniejszanie koncentracji gazu w mieszaninie wpływa na przebieg spalania dawki inicjującej. Maksimum wydzielania ciepła wynikające ze spalania ON przesuwają się w kierunku późniejszych kątów wraz ze zmniejszaniem ilości gazu w mieszaninie a jego wartość wzrasta. Wzrost wartości maksimum  $dQ$  może również wynikać ze wzrostu dawki inicjującej, która przy stałym położeniu listwy zębatej pompy zwiększała się w granicach 6,8% w miarę zmniejszania obciążenia. Jednak wzrost wartości maksimum  $dQ$  o około 19% świadczy o oddziaływaniu gazu na przebieg spalania ON.

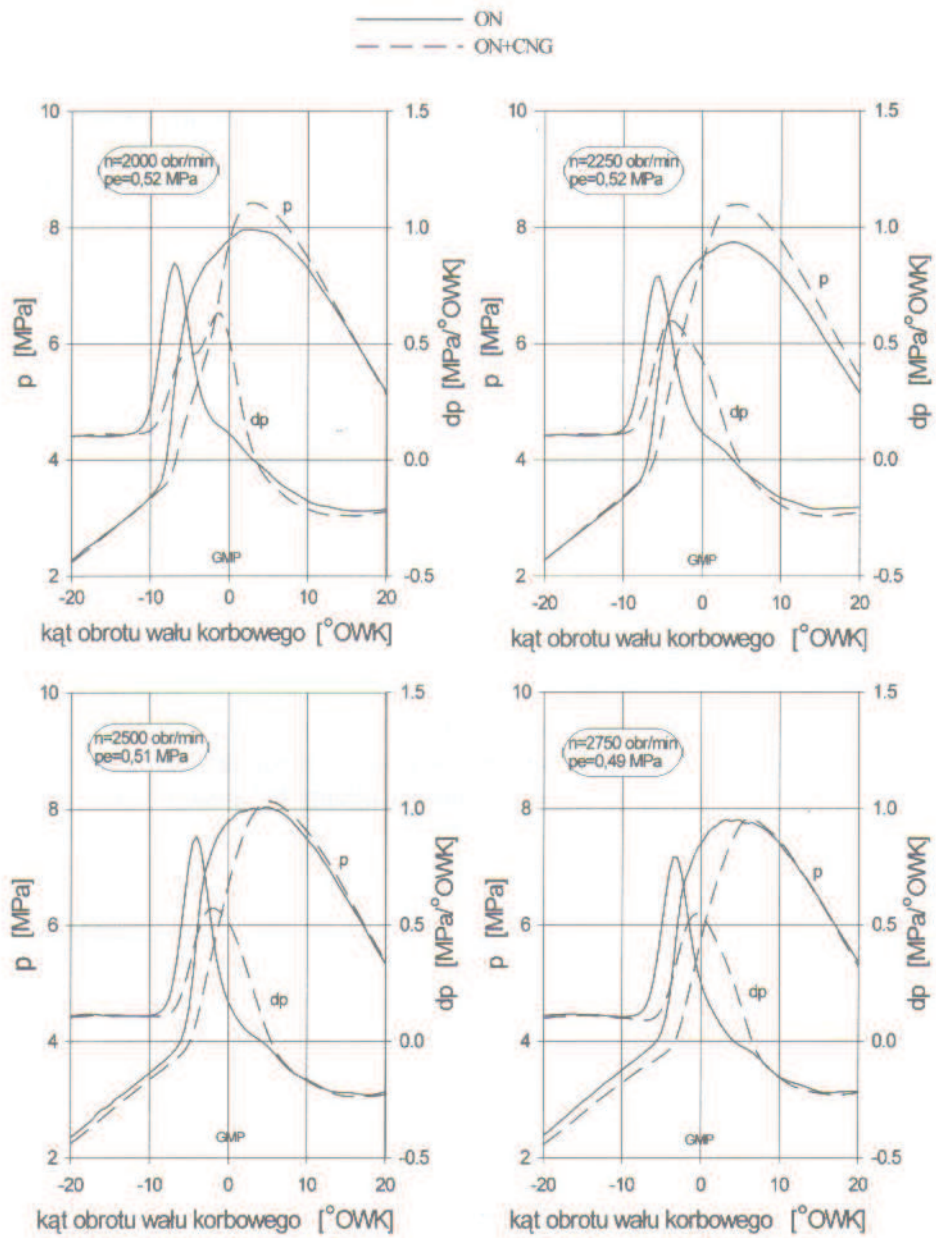
### 3.1. Porównanie parametrów spalania silnika zasilanego tradycyjnie i dwupaliwowo

Maksymalne ciśnienia spalania silnika dwupaliwowego w zakresie mniejszych prędkości obrotowych były większe od ciśnień w silniku zasilanym ON pracującym przy tym samym obciążeniu (rys. 4). W zakresie większych prędkości obrotowych poziom ciśnień w czasie spalania dla obydwu systemów zasilania był podobny. Przy zasilaniu dwupaliwowym w całym zakresie zmian prędkości obrotowych krzywa zmian ciśnienia jest przesunięta w prawo w stosunku do zmian odpowiadających zasilaniu ON. Powoduje to zmniejszenie przyrostów ciśnienia w czasie spalania. Maksymalne wartości  $dp$  były mniejsze w granicach 0,2+0,3 MPa/°OWK w stosunku do zasilania ON. Maksymalne ciśnienia w silniku dwupaliwowym były osiągane w zakresie późniejszych kątów. Tendencja ta była wyraźniejsza przy większych prędkościach obrotowych.

W silniku dwupaliwowym występują znaczące różnice w przebiegu temperatur czynnika i szybkości wydzielania ciepła w czasie spalania (rys. 5). Na początku procesu temperatury czynnika w silniku dwupaliwowym były mniejsze od występujących przy zasilaniu ON. Dłuższy czas spalania gazu powoduje, że w dalszej fazie spalania temperatury były większe w granicach 100+200 K w stosunku do obliczanych dla zasilania ON.

Szybkości wydzielania ciepła w silniku dwupaliwowym są mniejsze i przesunięte w zakres późniejszych kątów. Maksymalne wartości  $dQ$  maleją wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej i dla 2500+2750 obr/min są prawie dwukrotnie mniejsze od obliczonych dla zasilania ON.

Przy zwiększaniu prędkości obrotowej zanika sygnalizowane zjawisko występowania dwóch maksimum na krzywych  $dQ$ . Ponieważ dla wszystkich prędkości obrotowych pokazanych na rys. 4 silnik był zasilany mieszaniną gaz-powietrze o zbliżonym składzie



Rys. 4. Porównanie przebiegu ciśnienia w czasie spalania w silniku ICA90 zasilanym olejem napędowym i dwupaliwowo dla różnych prędkości obrotowych.

Fig. 4. The comparison of pressure in the cylinder of ICA90 engine fuelled with dual fuel and diesel oil for various speed torque.



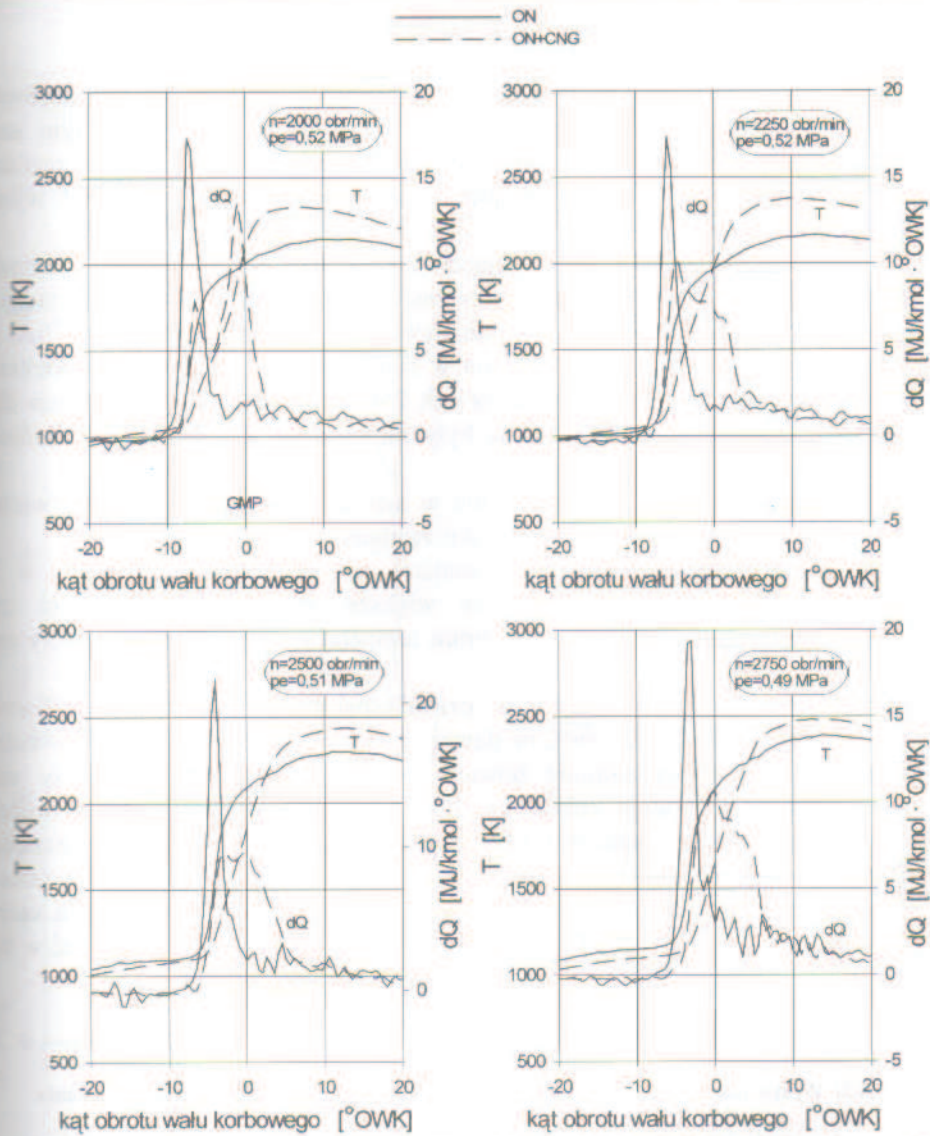


Fig. 5. Porównanie przebiegu temperatury i szybkości wydzielania ciepła w silniku ICA90 zasilanym olejem napędowym i dwupaliwowo.

Fig. 5. The comparison of temperature and heat release rate in the cylinder of ICA90 engine fuelled with dual fuel and diesel oil for various speed torque.

zmiana  $\lambda_o$  z 1,82 dla 2000 obr/min do wartości 1,59 dla 2750 obr/min) oraz tą samą wielkością dawki inicjującej ok. 10 mm<sup>3</sup>/cykl należy sądzić, że w miarę zwiększania prędkości obrotowej spalanie ON rozpoczyna się później. Równocześnie zwiększone temperatury komory spalania wywołują przyspieszenie spalania gazu. Zjawiska te powodują, że procesy spalania obydwu paliw zaczynają się na siebie nakładać.

### 3.2. Wpływ wielkości dawki inicjującej na parametry spalania

Wpływ wielkości dawki inicjującej przedstawiono na rys. 6÷9. Przy porównaniu stosowano zasadę, że dla danej prędkości obrotowej silnik pracował z tym samym obciążeniem  $p_e = \text{const}$  niezależnie od wielkości dawki inicjującej i rodzaju zasilania.

Z analizy przebiegu parametrów przedstawionych na rysunkach 6÷9 wynikają następujące wnioski:

- W miarę zwiększania dawki inicjującej zmniejszają się ciśnienia w czasie spalania a ich przebiegi zbliżają się do ciśnień przy zasilaniu ON. Należy jednak zaznaczyć, że w zakresie prędkości 2000÷2250 obr/min nawet przy dawce 20 mm<sup>3</sup>/cykl (ok. 66% energii dostarczanej wraz z ON) ciśnienia w silniku dwupaliwowym były większe od ciśnień przy zasilaniu ON. Przy prędkościach 2500÷2750 obr/min dla dużych dawek inicjujących ciśnienia w czasie spalania były mniejsze od ciśnień przy zasilaniu ON (rys. 6).

- Przyrosty ciśnienia w czasie spalania w niewielkim stopniu zależą od wielkości dawki inicjującej i są mniejsze niż w silniku zasilanym ON (rys. 7).

- Temperatury czynnika w czasie spalania po przekroczeniu GMP i w fazie dopalania są w silniku dwupaliwowym większe (rys. 8). Jedynie przy dawce 20 mm<sup>3</sup>/cykl i prędkości 2500÷2750 obr/min temperatury są mniejsze niż przy zasilaniu ON.

- Szybkość wydzielania ciepła w czasie spalania w silniku dwupaliwowym zmniejsza się wraz ze zwiększaniem dawki inicjującej (rys. 9). Z punktu widzenia spalania gazu jest to zrozumiałe bowiem powiększenie dawki ON przy stałym obciążeniu silnika powoduje zubożenie mieszaniny gaz-powietrze, co prowadzi do zmniejszenia jej szybkości spalania. Równocześnie szybkość spalania oleju napędowego jest mniejsza niż w silniku zasilanym tradycyjnie. Może to świadczyć, że obecność gazu zmniejszając szybkość dyfuzji tlenu do strugi wtryskiwanego paliwa ciekłego działa hamująco na przebieg spalania. Podobne spostrzeżenia można spotkać w literaturze [7]

### 3.3. Wpływ udziału paliwa gazowego na maksymalne wartości parametrów spalania

Udział gazu  $Q_g$  określano energetycznie z wzoru (1) jako procentową część energii dostarczanej wraz z paliwem gazowym. Według przyjętej zasady odpowiednie wartości  $Q_g$  oznaczają:

- 0% — zasilanie samym olejem napędowym;
- 100% — zasilanie samym paliwem gazowym.

Do analizy wykorzystano maksymalne wartości omawianych wcześniej parametrów spalania przy stałym (zblizonym do maksymalnego) obciążeniu silnika i zmiennym udziale paliwa gazowego, dla prędkości obrotowych 2000, 2250, 2500 i 2750 obr/min. Z analizy danych przedstawionych na rys. 10÷11 wynikają następujące wnioski ogólne:

- Maksymalne ciśnienia spalania  $p_{\text{max}}$  zwiększają się wraz ze wzrostem udziału paliwa gazowego i maleją wraz z powiększaniem prędkości obrotowej (rys. 10a);



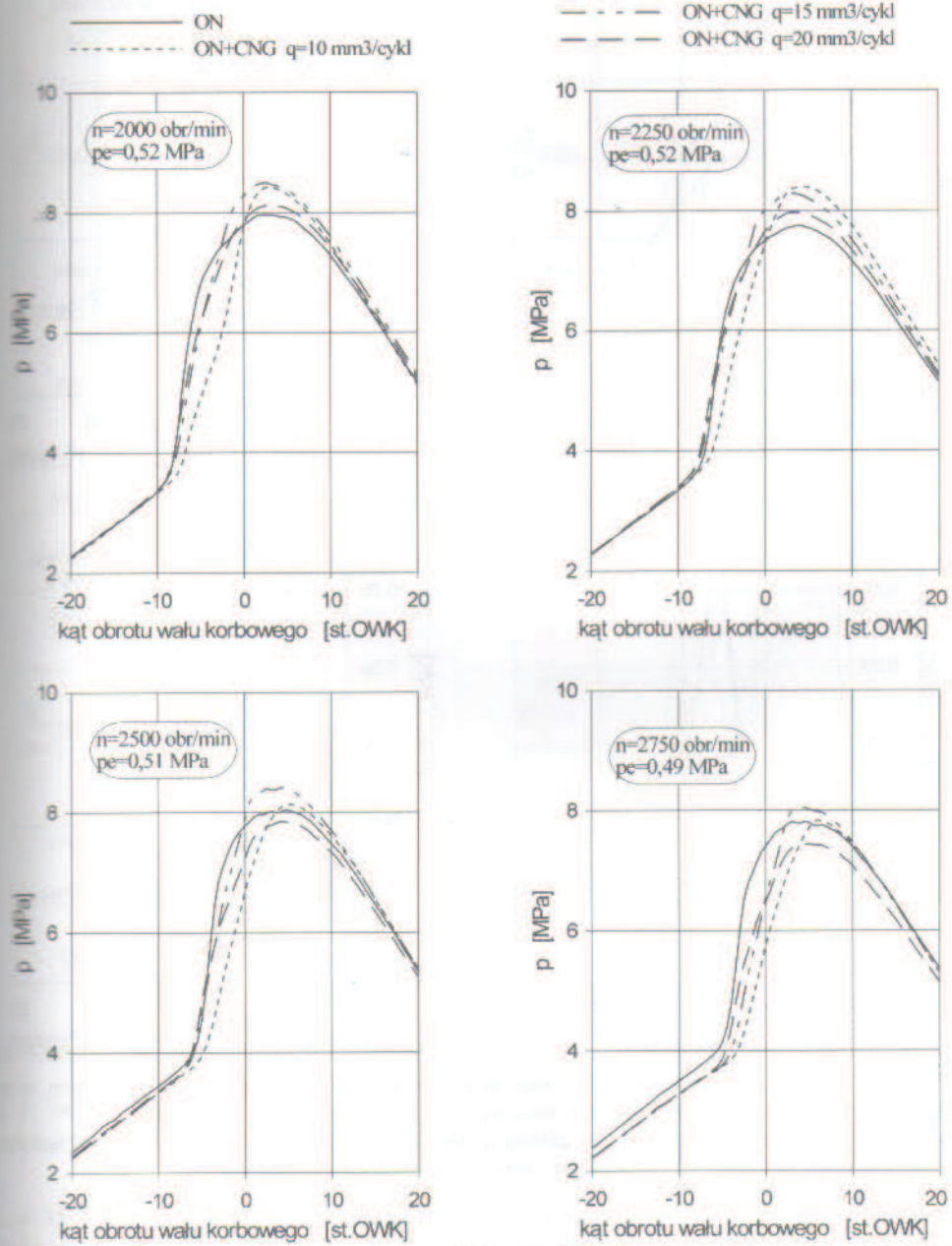
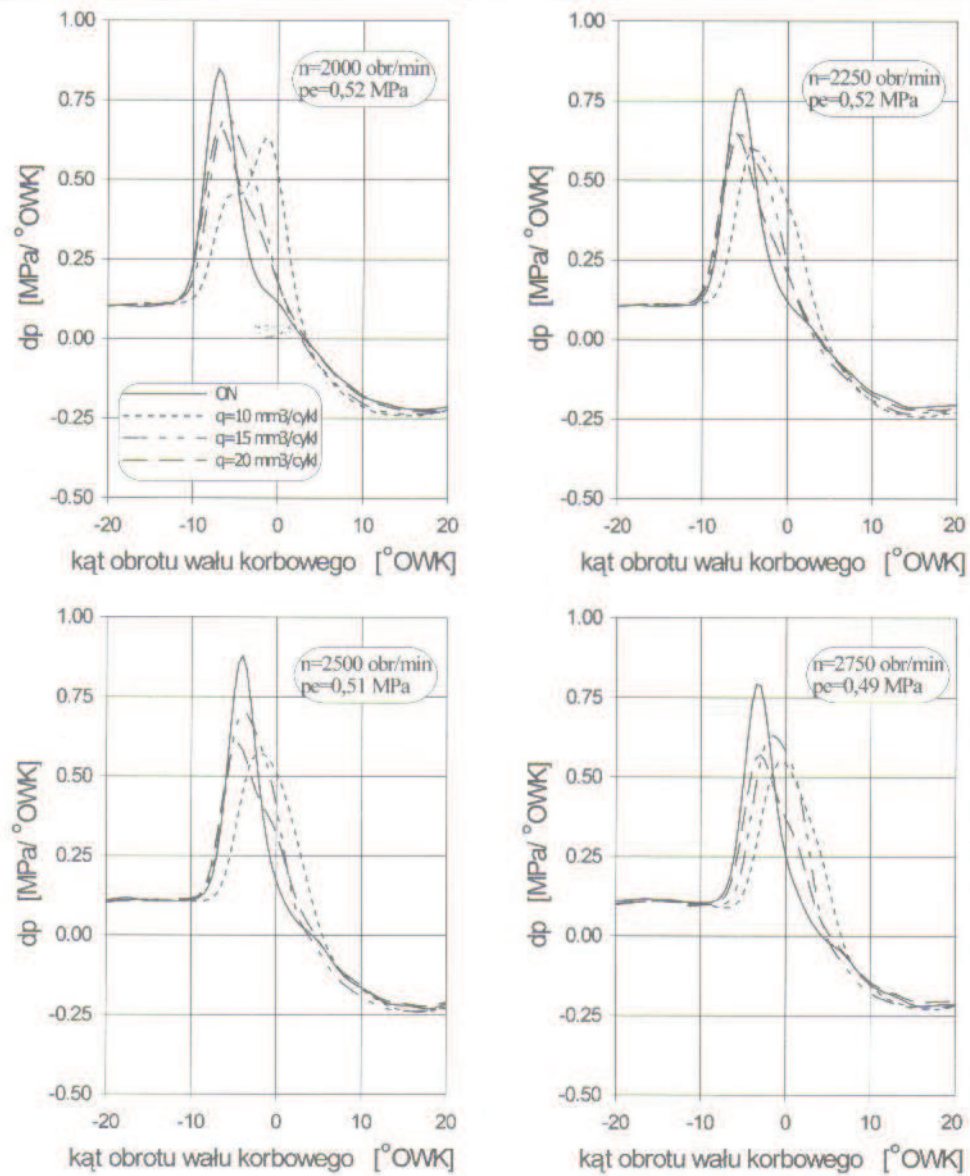


Fig. 6. Porównanie zmian ciśnienia w czasie spalania w silniku 1CA90 zasilanym olejem napędowym i dwupaliwowo przy różnych dawkach inicjujących.  
 Fig. 6. The comparison of pressure in the cylinder of 1CA90 engine fuelled with dual fuel and diesel oil for various injection dose.



Rys. 7. Porównanie zmian przyrostów ciśnienia w czasie spalania w silniku ICA90 zasilanym olejem napędowym i dwupaliwowo przy różnych dawkach inicjujących.

Fig. 7. The comparison of pressure increase in the cylinder of ICA90 engine fuelled with dual fuel and diesel oil for various injection dose.

- Kąt opóźnienia zapłonu  $\alpha_z$  liczony od początku wtrysku do początku spalania rośnie wraz ze wzrostem udziału gazu i prędkości obrotowej (rys. 11a).

- Całkowity kąt spalania  $\alpha_s$  maleje ze wzrostem udziału gazu (rys. 11b). Uzyskane punkty pomiarowe wykazują jednak duże rozrzuty i z tego powodu trudno prześledzić wpływ prędkości obrotowej na omawiany parametr. Ponieważ jednak całkowity kąt



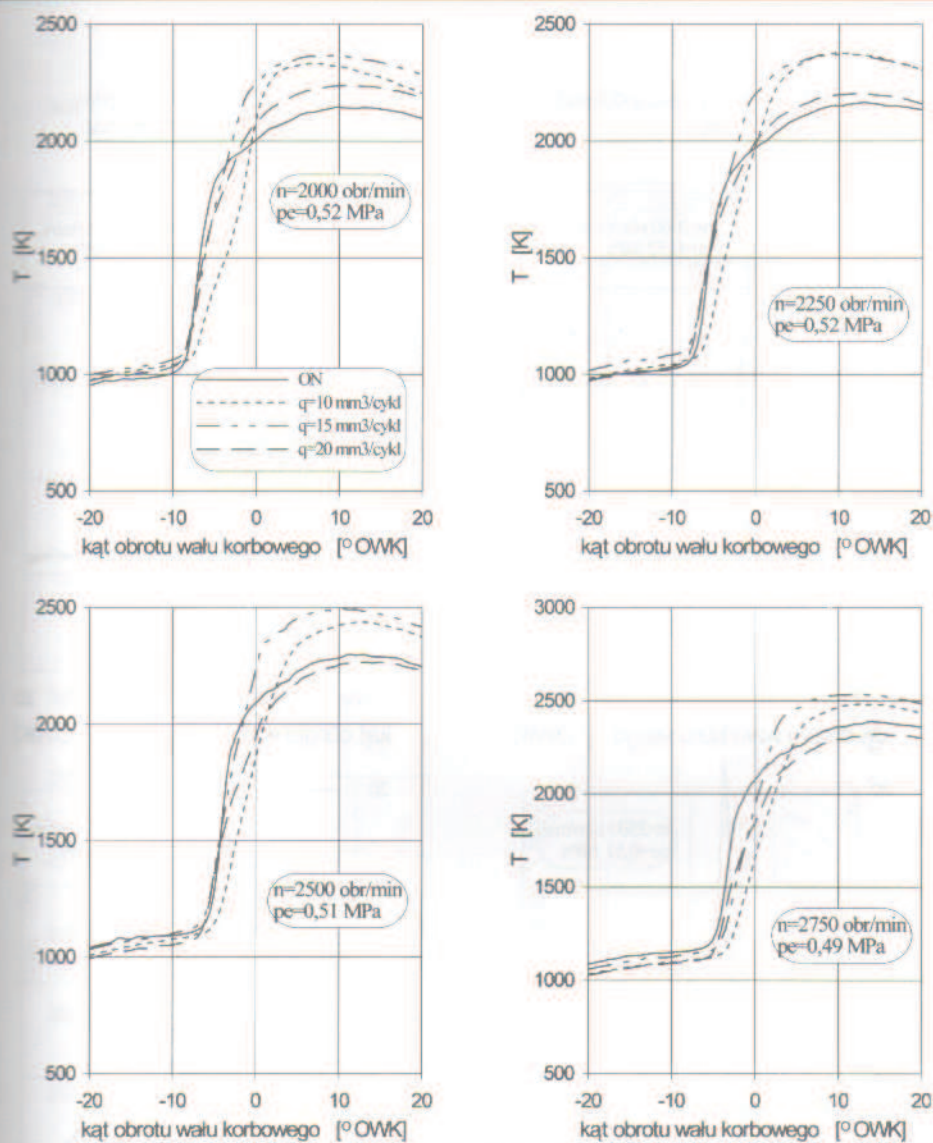
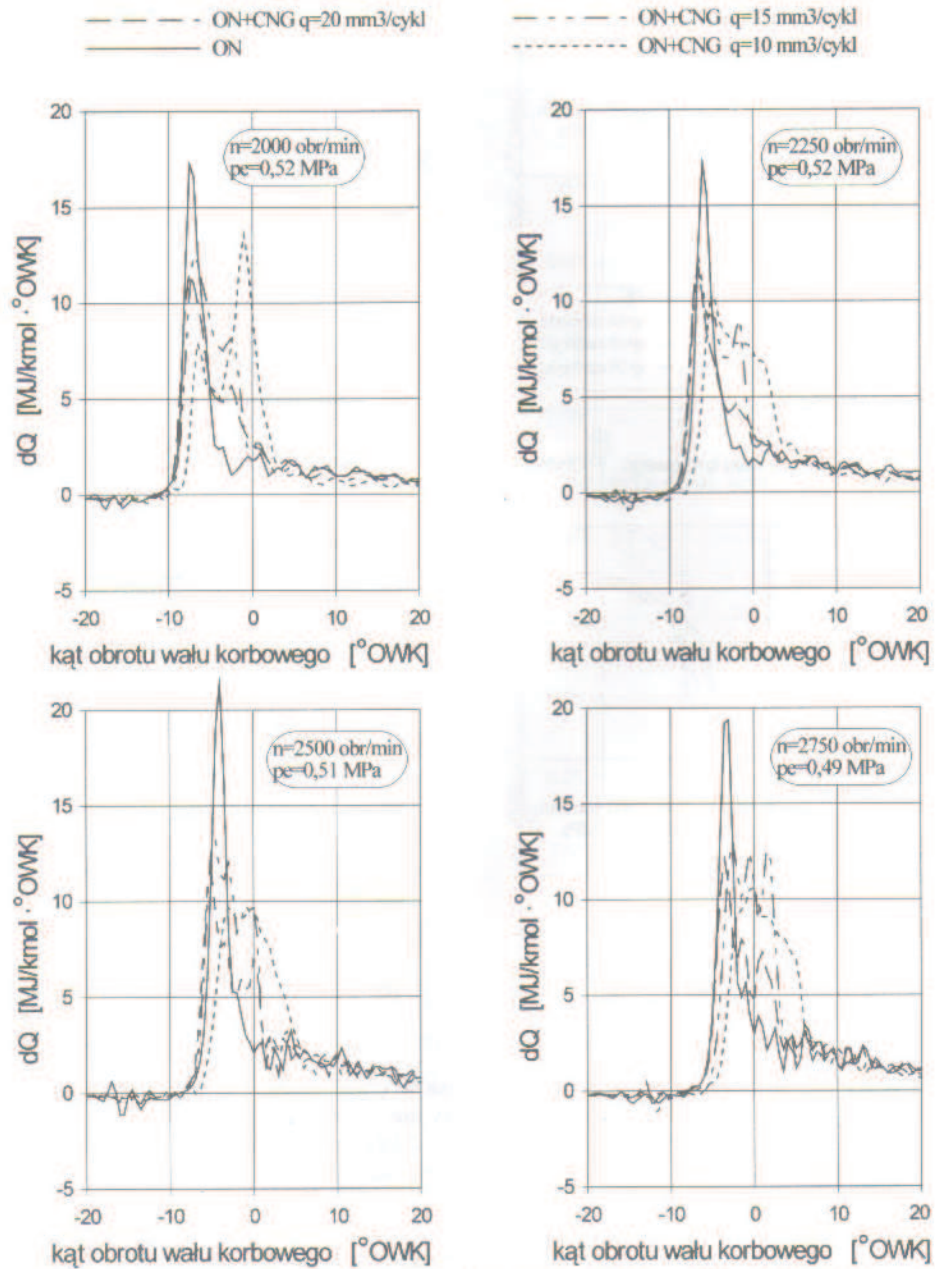


Fig. 8. Porównanie zmian temperatury średniej czynnika w czasie spalania w silniku ICA90 zasilanym olejem napędowym i dwupaliwowo przy różnych dawkach inicjujących.

Fig. 8. The comparison of temperature in the cylinder of ICA90 engine fuelled dual fuel and diesel oil for different injection dose.

- Maksymalne przyrosty ciśnienia  $dp_{max}$  początkowo rosną osiągając maksimum dla udziału gazu w granicach 40+50% a następnie maleją (rys. 10b). Odstępstwem jest przebieg  $dp_{max}$  dla prędkości 2000 obr/min gdzie występują prawie stałe wartości  $dp_{max}$  niezależnie od zmian  $Q_g$ .

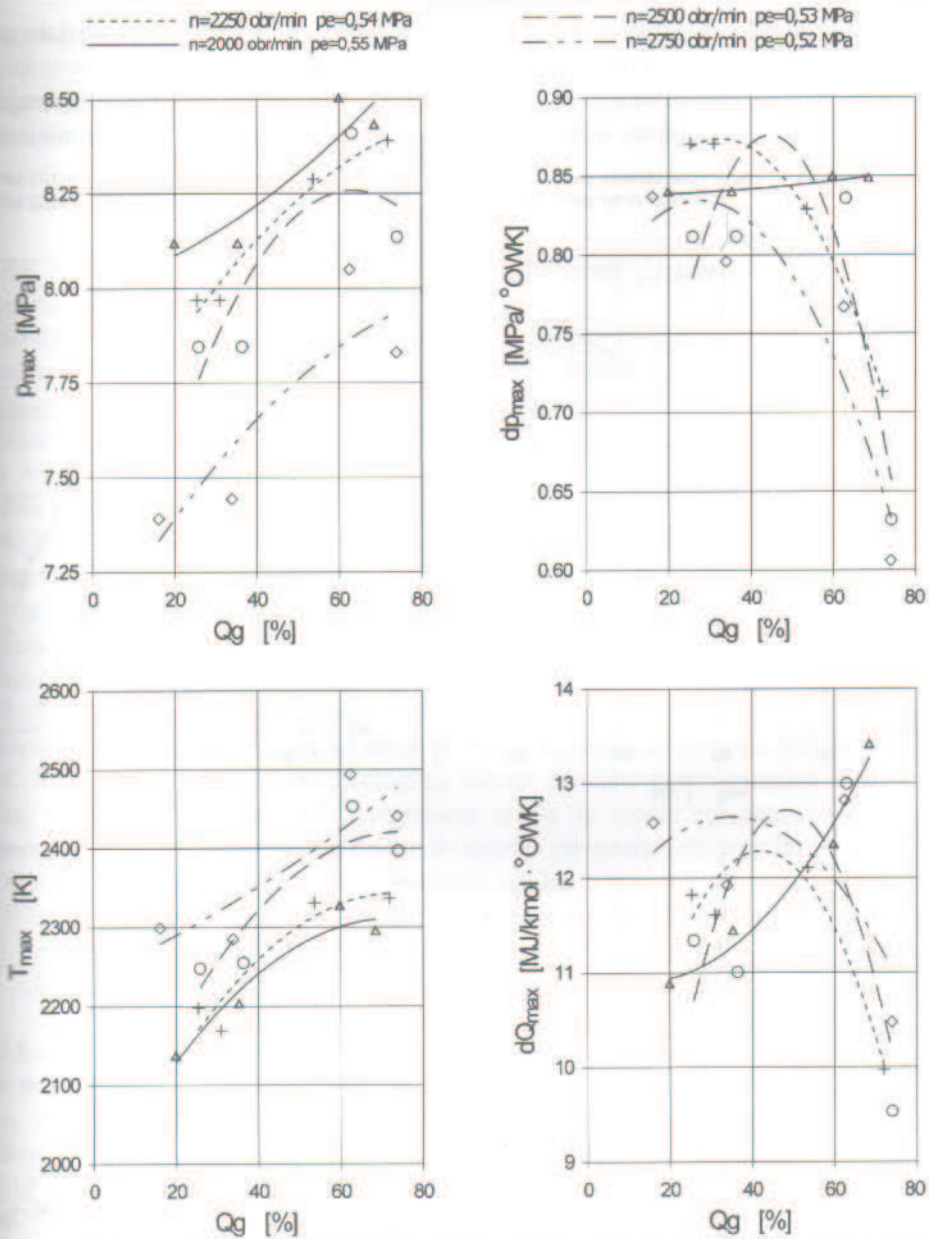
- Maksymalne wartości temperatur czynnika  $T_{max}$  zwiększają się wraz ze wzrostem udziału gazu i zwiększaniem prędkości obrotowej silnika (rys. 10c).



Rys. 9. Porównanie zmian szybkości wydzielania ciepła w czasie spalania w silniku 1CA90 zasilanym olejem napędowym i dwupaliwowo przy różnych dawkach inicjujących.

Fig. 9. The comparison of heat realise rate in the cylinder of 1CA90 engine fuelled dual fuel and diesel oil for different injection dose.



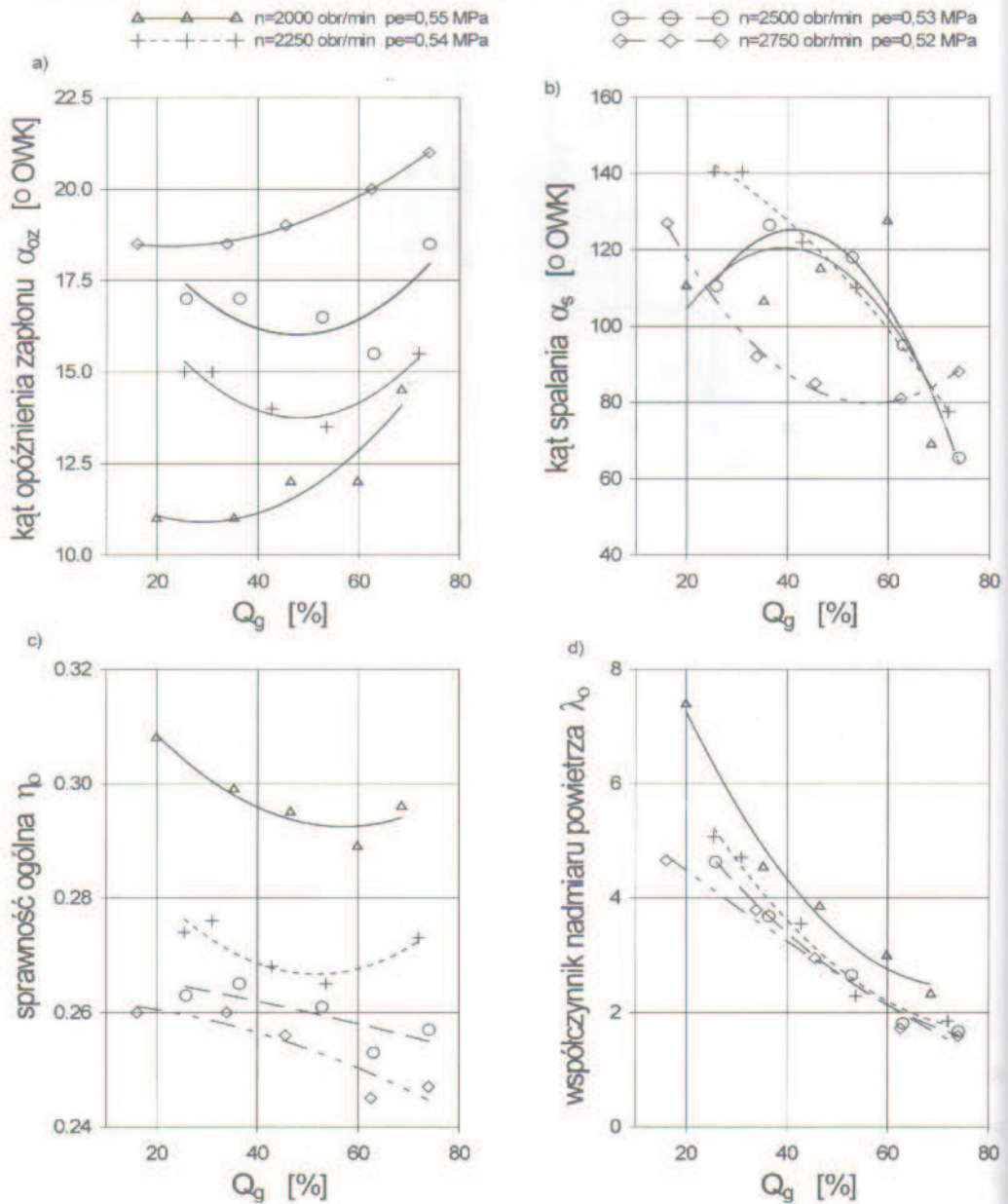


Rys. 10. Zmiany parametrów spalania silnika dwupaliwowego w funkcji ilości gazu i prędkości obrotowej dla maksymalnego obciążenia silnika ( $p_e = \text{const}$ ).

Fig. 10. Change of combustion parameters of a dual fuel engine versus thermal gas substitute diesel oil and speed torque ( $p_e = \text{const}$ ).

• Maksymalne wartości szybkości wydzielania ciepła występują dla udziału gazu około 40+50% za wyjątkiem prędkości obrotowej 2000 obr/min gdzie obserwuje się stały wzrost  $dQ_{max}$  wraz ze wzrostem udziału gazu (rys. 10 d).

- Sprawność ogólna silnika dwupaliwowego  $\eta_o$  maleje ze wzrostem udziału gazu i prędkości obrotowej (rys. 11c).
- Skład mieszaniny gaz-powietrze przy udziale gazu mniejszym od 40% znajduje się poza dolną granicą zapłonu metanu w warunkach otoczenia (rys. 11d). Zmniejszenie



Rys. 11. Zmiany parametrów spalania silnika dwupaliwowego w funkcji ilości gazu i prędkości obrotowej dla maksymalnego obciążenia silnika ( $p_e = \text{const}$ ).

Fig. 11. Change of combustion parameters of a dual fuel engine versus thermal gas substitute diesel oil and speed torque ( $p_e = \text{const}$ ).



obciążenia silnika będzie powodowało dalsze zubażanie mieszanki. Z uwagi na sygnalizowane przewlekłe spalanie gazu wydaje się celowe wprowadzenie regulacji ilościowej przy częściowych obciążeniach silnika dwupaliwowego.

### 3. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i obliczeń parametrów spalania można sformułować wnioski ogólne.

1. Spalanie gazu i paliwa ciekłego w silniku dwupaliwowym wykazuje zróżnicowany charakter w czasie i w szybkości przebiegu procesu. Paliwo ciekłe przy małych dawkach inicjujących spala się szybciej niż paliwo gazowe. Występują wtedy wyraźne dwa maksima szybkości wydzielania ciepła odpowiadające spalaniu paliwa ciekłego i paliwa gazowego. Przy większych dawkach inicjujących i większym obciążeniu silnika procesy spalania obydwu paliw zaczynają się na siebie nakładać.

2. W zakresie znamionowych obciążeń silnika dwupaliwowego, kiedy jest on zasilany bogatą mieszanką gaz-powietrze, występują większe ciśnienia maksymalne od występujących przy zasilaniu olejem napędowym. Równocześnie, z uwagi na przesunięcie procesu spalania w kierunku późniejszych kątów, przyrosty ciśnienia  $dp$  są mniejsze od rejestrowanych dla zasilania tradycyjnego.

3. Spalanie ładunku w silniku dwupaliwowym odbywa się ze znacznie mniejszymi szybkościami wydzielania ciepła co może powodować mniejsze stężenia  $NO_x$  w spalinach.

4. Przez zwiększenie dawki inicjującej można zmniejszyć maksymalne wartości ciśnienia, temperatury i szybkości wydzielania ciepła w czasie spalania. Należy jednak zaznaczyć, że równoczesne zubażanie mieszanki gaz-powietrze powoduje przedłużenie spalania, co wywołuje zmniejszenie sprawności silnika.

5. Zwiększanie udziału gazu w ładunku dostarczanym do silnika powoduje:

- a) Zwiększenie maksymalnych ciśnień i temperatur w cylindrze;
- b) zwiększenie zwłoki zapłonu paliwa ciekłego;
- c) zmniejszenie sprawności ogólnej i skrócenie czasu spalania.

Maksymalne szybkości wydzielania ciepła występowały w badanym silniku przy udziale gazu liczonym energetycznie w granicach 40÷50%.

6. Analiza parametrów spalania wskazuje na konieczność elektronicznego sterowania wielkością dawki inicjującej, ilości gazu i powietrza. Umożliwi to optymalny proces spalania w różnych warunkach pracy silnika dwupaliwowego.

7. Pokazane zmiany w przebiegu ciśnienia i szybkości wydzielania ciepła w silniku dwupaliwowym wskazują na konieczność przeprowadzenia badań kąta wyprzedzenia wtrysku w celu optymalizacji procesu spalania.

#### Stosowane oznaczenia

ON	— olej napędowy
CNG	— gaz ziemny sprężony
ON+CNG	— zasilanie dwupaliwowe gazem ziemnym i olejem napędowym

$\lambda$	— średni współczynnik nadmiaru powietrza
$\lambda_a$	— współczynnik nadmiaru powietrza mieszaniny gaz-powietrze
$Q_g$	— udział gazu w całkowitym ładunku spalonym w silniku liczony energetycznie [%]
$p_e$	— średnie ciśnienie użyteczne [MPa]
$p$	— ciśnienie czynnika w czasie spalania [MPa]
$dp$	— przyrost ciśnienia w czasie spalania [MPa/°OWK]
$T$	— średnia temperatura czynnika w komorze spalania [K]
$dQ$	— szybkość wydzielania ciepła w czasie spalania [MJ/kmol(°OWK)]
$\alpha_z$	— kąt opóźnienia zapłonu [°OWK]
$\alpha_s$	— kąt spalania [°OWK]
Indeksy	
max	— maksimum parametru

### Literatura

- [1] STELMASIAK Z.: *Ekologiczno-ekonomiczne aspekty zastosowania gazu w silnikach dwupaliwowych*. III Ogólnopolska Konferencja Naukowo — Techniczna „Pojazd a środowisko” Radom 2001
- [2] STELMASIAK Z.: *Analiza systemów spalania paliw gazowych ze szczególnym uwzględnieniem układów dwupaliwowych*. Zeszyty naukowe Politechniki Łódzkiej Filia w Bielsku-Białej nr 58, 2000
- [3] WAJAND J., STELMASIAK Z., STAŚ M., GRUDNICKA E., WOJCIECHOWSKA-TROMBSKA A., FIC A., BARABASZ M., JÓZEFOWICZ R.: *Badania porównawcze procesów spalania w silnikach zasilanych gazem ziemnym w odmianach o zapłonie iskrowym oraz o zapłonie samoczynnym (dwupaliwowe)*. Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej nr PB 0320/T12/98/14, Bielsko-Biała 2001
- [4] KOWALEWICZ A.: *Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych*. WKŁ, Warszawa 1980
- [5] LIU Z., KARIM G.A.: *The ignition delay period in dual fuel engines*. SAE Paper 950466, 1995
- [6] STELMASIAK Z.: *Wpływ przebiegu spalania gazu na parametry procesu spalania dwupaliwowego silnika zasilanego gazem ziemnym i olejem napędowym*. Polska Akademia Nauk TeKa Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji Zeszyt nr 22 „Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów i silników spalinowych”, Kraków 2001
- [7] AESOY V., VALLAND H.: *Hot surface assisted compression ignition of natural gas in a direct injection diesel engine*. SAE Paper 960767, 1996

### Analysis of combustion parameters of a dual fuel engine fuelled with CNG

#### Summary

The results of research on combustion parameters in the dual fuel engine fuelled with compression natural gas (CNG) have been presented in the paper. The analysed parameters were computed from indicator diagrams of the single cylinder compression ignition direct injection engine 1CA90 type fuelled with CNG. The subject parameters were cylinder pressure, increase of pressure, cylinder temperature and heat release rate in the combustion process in a dual fuel engine and a traditional diesel engine. It is presented the influence of a pilot liquid fuel charge and a gas fuel contribution on the change of studied parameters as well. The research results showed that different course of gas fuel combustion principally depends on the pilot fuel charge, engine load and gas fuel contribution. The general conclusions can be useful at adaptation of compression ignition engines to fuelling them with natural gas and other similar gas fuels.