Article citation info:
STELMASIAK, Z., MATYJASIK, M. Exhaust emissions of dual fuel self-ignition engine with divided initial dose. *Combustion Engines*. 2013, **154**(3), 944-952. ISSN 0138-0346.

Zdzisław STELMASIAK
Marcin MATYJASIK

PTNSS-2013-SC-177

Exhaust emissions of dual fuel self-ignition engine with divided initial dose

In the paper is discussed an effect of initial dose division on emission of toxic components in exhaust gases of dual fuel self-ignition engine run on CNG as the main fuel and on Diesel oil used to ignition of the gas. To disadvantageous features of the dual fuel engine belongs excessive worsening of engine performance at partial loads due to leaning of gaseous mixture. It results from worsening of combustion process of lean mixtures, effecting in excessive emission of toxic components of exhaust gases. In the present paper one strived after reduction of this problem by division of the initial dose. The second dose of the Diesel oil, according to assumptions, should activate fading combustion of the gas. The investigations have confirmed advantageous effect of division of the dose on emission of the NO_x, at slight increase of CO and THC. Simultaneously, overall efficiency of the engine has increased.

Keywords: *dose divided, gas, diesel oil, exhaust emission, toxic components, combustion*

Emisja spalin dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym z dzieloną dawką inicjującą

W pracy przedstawiono wpływ podziału dawki na emisję toksycznych składników spalin dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego gazem ziemnym CNG jako paliwem głównym i olejem napędowym inicjującym zapłon gazu. Niekorzystną cechą silników dwupaliwowych jest nadmierne pogorszenie parametrów przy częściowych obciążeniach wskutek zubożaniu mieszaniny gazowej. Wynika to z pogorszenia procesu spalania ubogich mieszanin, czego efektem jest nadmierna emisja toksycznych składników spalin. Problem ten w przedstawionej pracy starano się zmniejszyć przez podział dawki inicjującej. Druga dawka oleju napędowego wg założenia miała aktywizować zanikające spalanie gazu. Badania potwierdziły korzystny wpływ podziału dawki na emisję NO_x, przy niewielkim zwiększeniu emisji CO i THC. Równocześnie zwiększeniu uległa sprawność ogólna silnika.

Słowa kluczowe: *dawka dzielona, gaz, olej napędowy, emisja spalin, składniki toksyczne, spalanie*

1. Introduction

Excessive worsening of engine performance at partial loads belongs to important disadvantages of gaseous dual fuel engines. It results from prolonged combustion of lean gaseous mixtures at qualitative adjustment of the engine. In result, overall efficiency of the engine at partial loads is smaller comparing to fuelling with Diesel oil only. Improvement of combustion of lean gaseous mixtures can be achieved through:
– reduction of initial dose,
– partial choking of air at low engine loads,
– division of initial dose.

Use of injection systems with common rail controlled electronically enables division of the initial dose and taking advantage of later injection of a part of liquid fuel to activation of combustion process of gaseous mixture. The main objective of division of the dose is counteraction to declining combustion rate of gaseous mixture and phenomenon of fading flame in zones adjacent to walls.

Limitation of the fading flame phenomenon requires enrichment of the gas-air mixture, what in turn would require gradual reduction of the initial dose, or reduction of minimal engine power output possible to be maintained in dual fuel system.

On the base of investigations performed earlier one can ascertain lacking possibility to improve composition of gaseous mixture by gradual reduction of the initial dose

1. Wstęp

Poważną wadą gazowych silników dwupaliwowych jest nadmierne pogorszenie parametrów przy częściowych obciążeniach. Wynika ono z przedłużającego się spalania ubogich mieszanin gazowych przy jakościowej regulacji silnika. W efekcie sprawność ogólna silnika przy małych obciążeniach jest mniejsza w stosunku do zasilania samym olejem napędowym. Polepszenie spalania ubogich mieszanin gazowych może być osiągane przez zastosowanie:
– zmniejszania dawki inicjującej,
– częściowe dławienie powietrza przy małych obciążeniach,
– podział dawki inicjującej.

Zastosowanie układów wtryskowych typu common rail sterowanych elektronicznie umożliwia podział dawki inicjującej i wykorzystanie późniejszego wtrysku części paliwa ciekłego do aktywizacji procesu spalania mieszaniny gazowej. Głównym celem podziału dawki jest przeciwdziałanie malejącej szybkości spalania mieszaniny gazowej i zjawisku zaniku płomienia w strefach przylegających do ścianek.

Ograniczenie zjawiska zaniku płomienia wymaga wzbogacenia mieszaniny gaz–powietrze, co z kolei wymagałoby stopniowego zmniejszania dawki inicjującej lub ograniczenia minimalnej mocy silnika, przy której może on pracować w systemie dwupaliwowym.

Na podstawie przeprowadzonych wcześniej badań można stwierdzić, że nie da się poprawić składu miesza-

only [1–4, 7]. Even reduction of the initial dose to a few percent of the nominal dose doesn't lead to any significant enrichment of the gas-air mixture, which would assure correct combustion of the gas. It results from method of adjustment of self-ignited engine, in which partial loads are accomplished through reduction of quantity of the gas supplied to the engine at constant quantity of the air. Choking of the air at inlet can be a solution of this problem. It results, however, in worsening of conditions of liquid fuel self-ignition, what in turn leads to reduction of engine efficiency and growth of exhaust gases temperature. Due to the above reasons, choking of the air is limited to a small extent and can be used at lower engine speeds [8, 9].

The investigations performed in the Department of Combustion Engines and Vehicles have shown that additional post-injection of the Diesel oil in time of combustion of gaseous mixture could be a good solution to improve combustion of the gaseous mixtures [5, 6, 10, 11]. Then, additional liquid fuel immediately goes into oxidation reactions, supplying additional portion of energy and activates fading process of combustion of gas.

During performed investigations the dose of Diesel oil was divided into two equal parts, injected in different time, what is presented schematically in the Fig. 1. The first dose initiated ignition of the gas, while the second dose injected with delay Δα delivered additional energy, activating process of combustion of the gas.

In course of the investigations one used two arbitrary assumed delay angles of 10 °CA and 15 °CA, basing on preliminary tests of the engine operated at rotational speed of 1400 rpm, corresponding to rotational speed of maximal torque. The angles were constant on complete range of change of engine loads and rotational speeds. Injection advance angle was maintained constant α_{ww} = 22 °CA before TDC, the same like in case of the engine run on pure Diesel oil, in case of the engine equipped with high pressure common rail system.

2. Test bed

The tests were performed on a single cylinder, self-ignition, direct injection research engine of SB3.1 type,

niny gazowej jedynie przez stopniowe zmniejszanie dawki inicjującej [1–4, 7]. Nawet ograniczenie dawki inicjującej do kilku procent dawki znamionowej nie prowadzi do znaczącego wzbogacenia mieszaniny gaz–powietrze, które prowadziłoby do prawidłowego spalania gazu. Wynika to ze sposobu regulacji silnika o zapłonie samoczynnym, w którym częściowe obciążenia uzyskuje się przez zmniejszenie ilości gazu dostarczanej do silnika przy stałej ilości powietrza. Pewnym rozwiązaniem tego problemu może być dławienie powietrza na dolocie. Powoduje ono jednak pogorszenie warunków samozapłonu paliwa ciekłego, co z kolei prowadzi do zmniejszenie sprawności silnika i wzrostu temperatury spalin. Z tych powodów dławienie powietrza jest ograniczone do niewielkich stopni i może być stosowane przy mniejszych prędkościach obrotowych silnika [8, 9].

Przeprowadzone w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów badania pokazały, że dobrym rozwiązaniem poprawy spalania mieszanin gazowych może być zastosowanie dodatkowego dotrysku oleju napędowego w czasie spalania mieszanin gazowych [5, 6, 10, 11]. Dodatkowe paliwo ciekłe wchodzi wtedy natychmiast w reakcje utleniania i dostarczając dodatkowej porcji energii aktywizuje zanikający proces spalania gazu.

W przeprowadzonych badaniach dawka oleju napędowego była dzielona na dwie równe części wtryskiwane w różnym czasie, co schematycznie przedstawiono na rys. 1. Pierwsza dawka inicjowała zapłon gazu, a druga wtryskiwana z opóźnieniem Δα dostarczała dodatkowej energii aktywizującej proces spalania gazu.

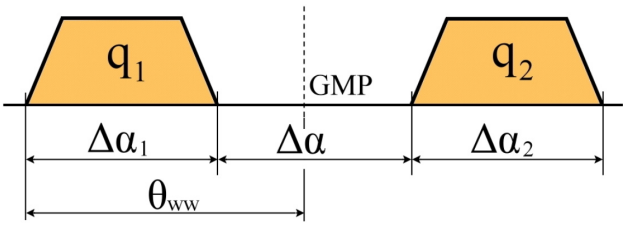


Fig. 1. Scheme of division of initial dose of the Diesel oil

Rys. 1. Schemat podziału dawki inicjującej oleju napędowego

a) b)

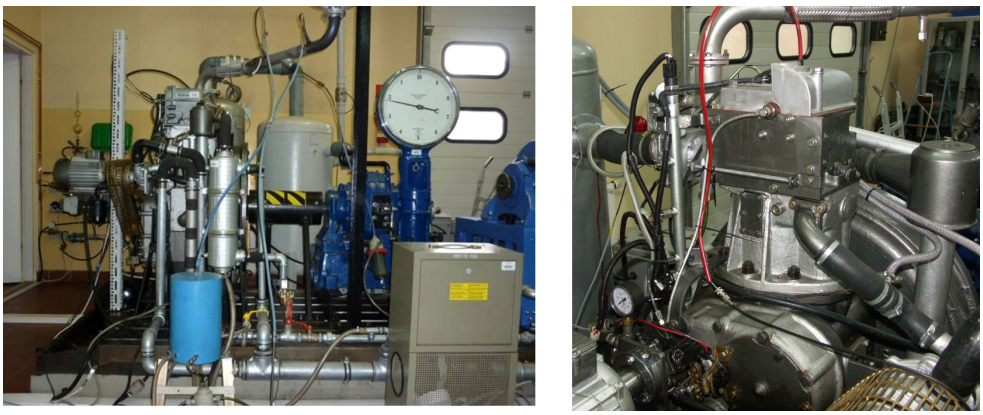


Fig. 2. General view of the test bed

Rys. 2. Widok ogólny stanowiska badawczego

W badaniach stosowano dwa arbitralnie przyjęto kąty opóźnienia 10 °OWK i 15 °OWK na podstawie badań wstępnych silnika pracującego przy prędkości obrotowej 1400 obr/min odpowiadającej prędkości maksymalnego momentu obrotowego. Kąty te były stałe dla całego zakresu zmian obciążenia silnika i prędkości obrotowej.

Kąt wyprzedzenia wtrysku był stały α_{ww} = 22 °OWK przed GMP, taki jak przy za-

Table 1. Technical data of the SB3.1 engine

Tabela 1. Dane techniczne silnika SB3.1

Number of cylinders/*liczba cylindrów*	1
Bore/*średnica cylindra*	127 mm
Stroke/*skok tłoka*	146 mm
Displacement volume/*objętość skokowa*	1848 cm^3
Compression ratio/*stopień sprężania*	15.8
Rated power/*moc znamionowa*	22.8 kW
Engine speed of rated power/*prędkość obrotowa mocy znamionowej*	2200 rpm/*obr/min*
Type of combustion chamber/*typ komory spalania*	Direct injection to toroidal chamber in piston crown/*wtrysk bezpośredni do toroidalnej komory w tłoku*
Injection system of initial dose/*układ wtryskowy dawki inicjującej*	Common Rail, produced by Bosch/*Common Rail f-my Bosch*
Diesel oil injector, produced by Bosch/*wtryskiwacz ON firmy Bosch*	0986435 004 090
CNG injection system/*układ wtryskowy CNG*	IC
Injector of gas, produced by Bosch/*wtryskiwacz gazu Bosch*	F465 151 72
Injection pressure of gas/*ciśnienie wtrysku gazu*	1 MPa

produced by WSK Mielec. Technical data of the engine are listed in the Table 1.

3. Analysis of test results

Division of initial dose effects advantageously on concentrations of nitrogen oxides in the exhaust gases, recorded

silaniu samym olejem napędowym silnika z wykorzystaniem wysokociśnieniowego systemu common rail.

2. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na jednocylindrowym silniku badawczym o zapłonie samoczynnym i wtrysku bezpośred-

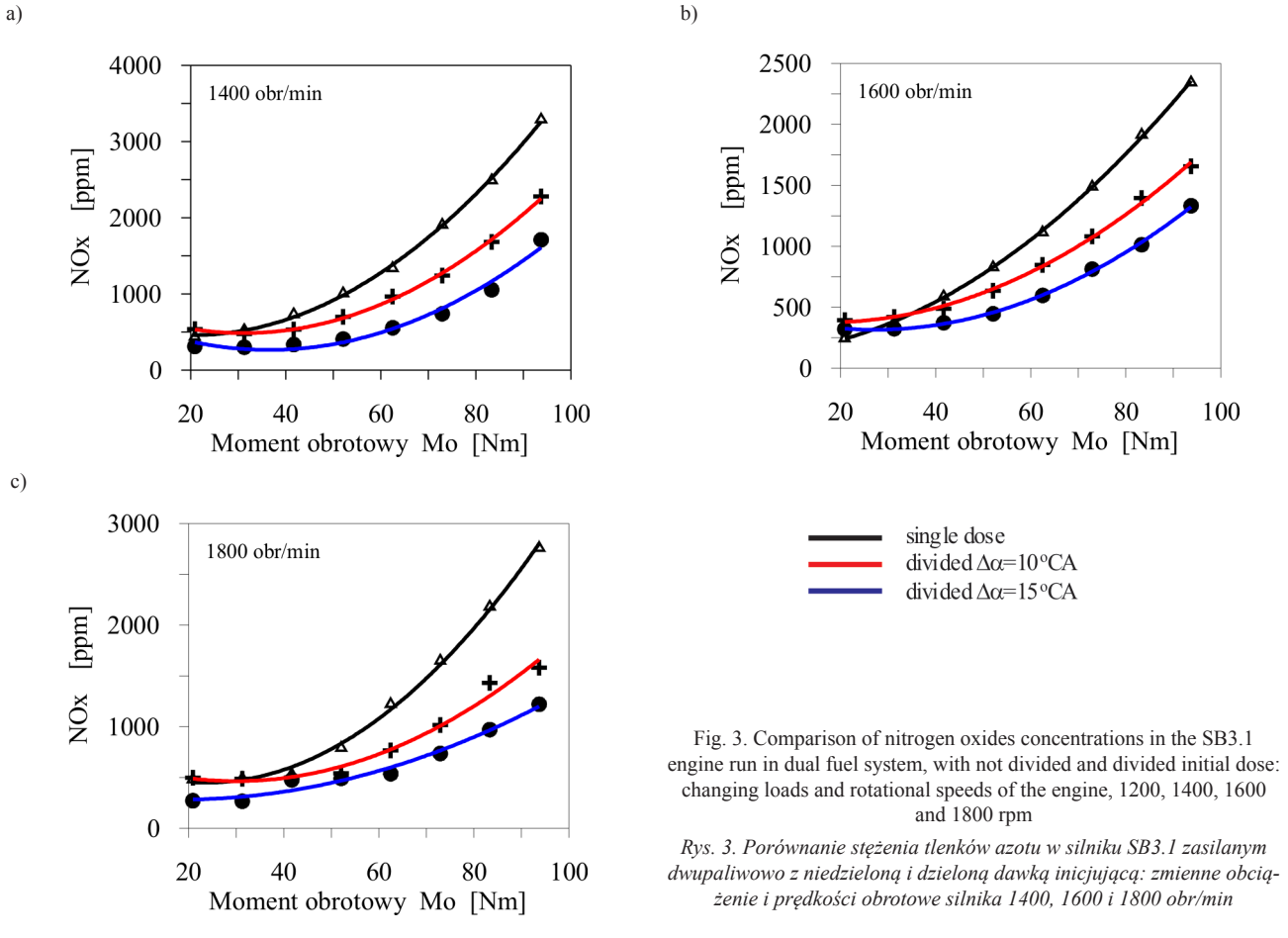


Fig. 3. Comparison of nitrogen oxides concentrations in the SB3.1 engine run in dual fuel system, with not divided and divided initial dose: changing loads and rotational speeds of the engine, 1200, 1400, 1600 and 1800 rpm

Rys. 3. Porównanie stężenia tlenków azotu w silniku SB3.1 zasilanym dwupaliwowo z niedzieloną i dzieloną dawką inicjującą: zmienne obciążenie i prędkości obrotowe silnika 1400, 1600 i 1800 obr/min

downstream the exhaust valve (upstream the catalyst) – Fig. 3. In case of all investigated rotational speeds, one confirmed substantial differences with respect to the concentrations with a single initial dose. Simultaneously, increase of ignition delay of the additional dose leads to a further reduction of NO_x concentrations. It results from the fact that in case of dual fuel engines, essential quantity of nitrogen oxide NO, as the main component of the NO_x, is formed in zone of combustion of the Diesel oil, where combustion occurs at low air excess number and high temperatures of working medium. Temperature of flame's front in the gas-air mixture is significantly lower, and additionally, high air excess number λ_o has a high impact on this temperature. Worsening of combustion conditions of additional dose of the Diesel oil leads to reduction of temperature of its combustion, and in consequence to reduced quantity of produced NO. For this reason, delaying of additional dose's injection leads to gradual reduction of NO_x concentrations downstream the exhaust valve, what has been confirmed by performed investigations.

Simultaneously, however, at minimal engine loads, division of the dose negligibly effects on recorded concentrations of the NO_x, and even tendency to slight increase of the concentrations was confirmed. It results from the fact, that reduction of engine load leads to gradual leaning of combustible mixture, what in consequence causes that additional dose of liquid fuel is burnt at a higher λ_o numbers (higher concentrations of oxygen) with respect to medium nim SB3.1 produkcji WSK Mielec. Dane techniczne silnika przedstawiono w tabeli 1.

3. Analiza wyników badań

Podział dawki inicjującej wpływa korzystnie na stężenia tlenków azotu w spalinach rejestrowane za zaworem wylotowym (przed katalizatorem) – rys. 3. Dla wszystkich badanych prędkości obrotowych stwierdzono znaczne różnice w stosunku do stężeń z pojedynczą dawką inicjującą. Równocześnie zwiększanie opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej prowadzi do dalszego zmniejszenia stężeń NO_x. Wynika to z faktu, że w silnikach dwupaliwowych zasadnicza ilość tlenku azotu NO, podstawowego składnika NO_x tworzona jest w strefie spalania oleju napędowego, gdzie spalanie odbywa się przy niskim współczynniku nadmiaru powietrza i wysokich temperaturach czynnika. Temperatura frontu płomienia w mieszaninie gaz–powietrze jest znacznie mniejsza, a dodatkowo istotny wpływ na tę temperaturę ma duży współczynnik nadmiaru powietrza λ_o. Pogorszenie warunków spalania dodatkowej dawki oleju napędowego prowadzi do zmniejszenia temperatur jej spalania a w konsekwencji do obniżenia ilości produkowanego NO. Z tego powodu opóźnianie wtrysku dawki dodatkowej powoduje zmniejszanie stężenia NO_x za zaworem wylotowym co potwierdziły przeprowadzone badania.

Równocześnie jednak przy minimalnych obciążeniach silnika podział dawki nieznacznie wpływa na rejestrowane stężenia NO_x, a nawet stwierdzono tendencję do niewielkiego

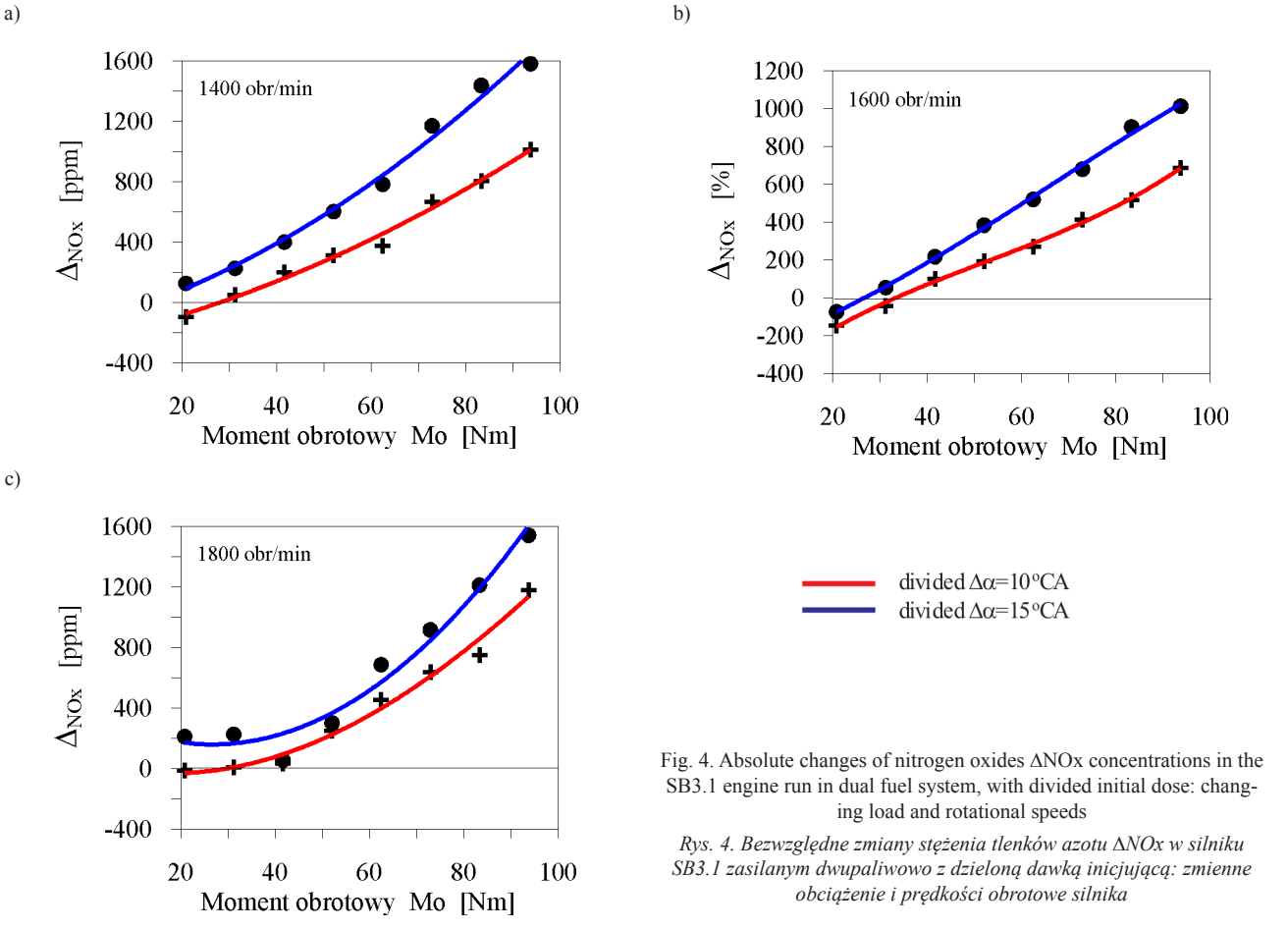


Fig. 4. Absolute changes of nitrogen oxides ΔNOx concentrations in the SB3.1 engine run in dual fuel system, with divided initial dose: changing load and rotational speeds

Rys. 4. Bezwzględne zmiany stężenia tlenków azotu ΔNOx w silniku SB3.1 zasilanym dwupaliwowo z dzieloną dawką inicjującą: zmienne obciążenie i prędkości obrotowe silnika

and maximal loads. Additionally, activation of combustion of the gaseous mixture in these conditions is relatively higher, what also can have an effect on quantity of produced NO.

Absolute change of NO_x concentrations was calculated from the formula:

$$\Delta NO_x = (NO_x)_p - (NO_x)_d \quad (1)$$

where: $(NO_x)_p$ – volumetric concentrations of the NO_x in exhaust gases at single dose [ppm], $(NO_x)_d$ – volumetric concentrations of the NO_x in exhaust gases at divided dose [ppm].

According with the formula (1) positive values of the ΔNO_x denote reduction of nitrogen oxides concentrations at division of the dose, negative ones denote increase. Runs of the ΔNO_x shown in the Fig. 4 point at significant reduction of NO_x concentrations in area of medium and maximal engine loads, when the engine is fuelled with divided initial dose. Absolute change of the concentrations grows monotonically together with growth of engine load, while character of the changes is similar for the both delay angles of the initial dose. For all tested rotational speeds, bigger delay injection angle of the additional dose results in bigger differences in recorded concentrations of the NO_x.

Relative change of the NO_x concentrations in exhaust gases at divided dose of the Diesel oil was calculated from the formula:

ich wzrostu. Wynika to z faktu, że zmniejszanie obciążenia silnika prowadzi do stopniowego zubażania mieszaniny palnej, co w konsekwencji powoduje, że dodatkowa dawka paliwa ciekłego spalana jest przy większych współczynnikach λ_o (większych stężeniach tlenu) w stosunku do średnich i maksymalnych obciążeń. Dodatkowo aktywizacja spalania mieszaniny gazowej w tych warunkach jest relatywnie większa, co również może wpływać na ilości tworzonego NO.

Bezwzględną zmianę stężenia NO_x obliczono ze wzoru (1), gdzie: $(NO_x)_p$ – objętościowe stężenie NO_x w spalinach przy dawce pojedynczej [ppm], $(NO_x)_d$ – objętościowe stężenie NO_x w spalinach przy dawce dzielonej [ppm].

Zgodnie z wzorem (1) dodatnie wartości ΔNO_x oznaczają zmniejszenie stężenia tlenków azotu przy podziale dawki, ujemne zwiększenie. Przebiegi ΔNO_x pokazane na rys. 4 wskazują na istotne zmniejszenie stężenia NO_x w zakresie średnich i maksymalnych obciążeń silnika zasilanego dzieloną dawką inicjującą. Bezwzględna zmiana stężenia rośnie monotonicznie wraz ze zwiększaniem obciążenia silnika, a charakter zmian jest podobny dla obydwu kątów opóźnienia dawki dodatkowej. Dla wszystkich badanych prędkości większy kąt opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej powoduje większe różnice rejestrowanego stężenia NO_x.

Względną zmianę stężenia NO_x w spalinach przy dzielonej dawce oleju napędowego obliczono ze wzoru (2).

Przebiegi względnej zmiany stężenia tlenków azotu δNO_x pokazane na rys. 5 wskazują na możliwość zwiększenia emisji NO_x przy minimalnych obciążeniach silnika

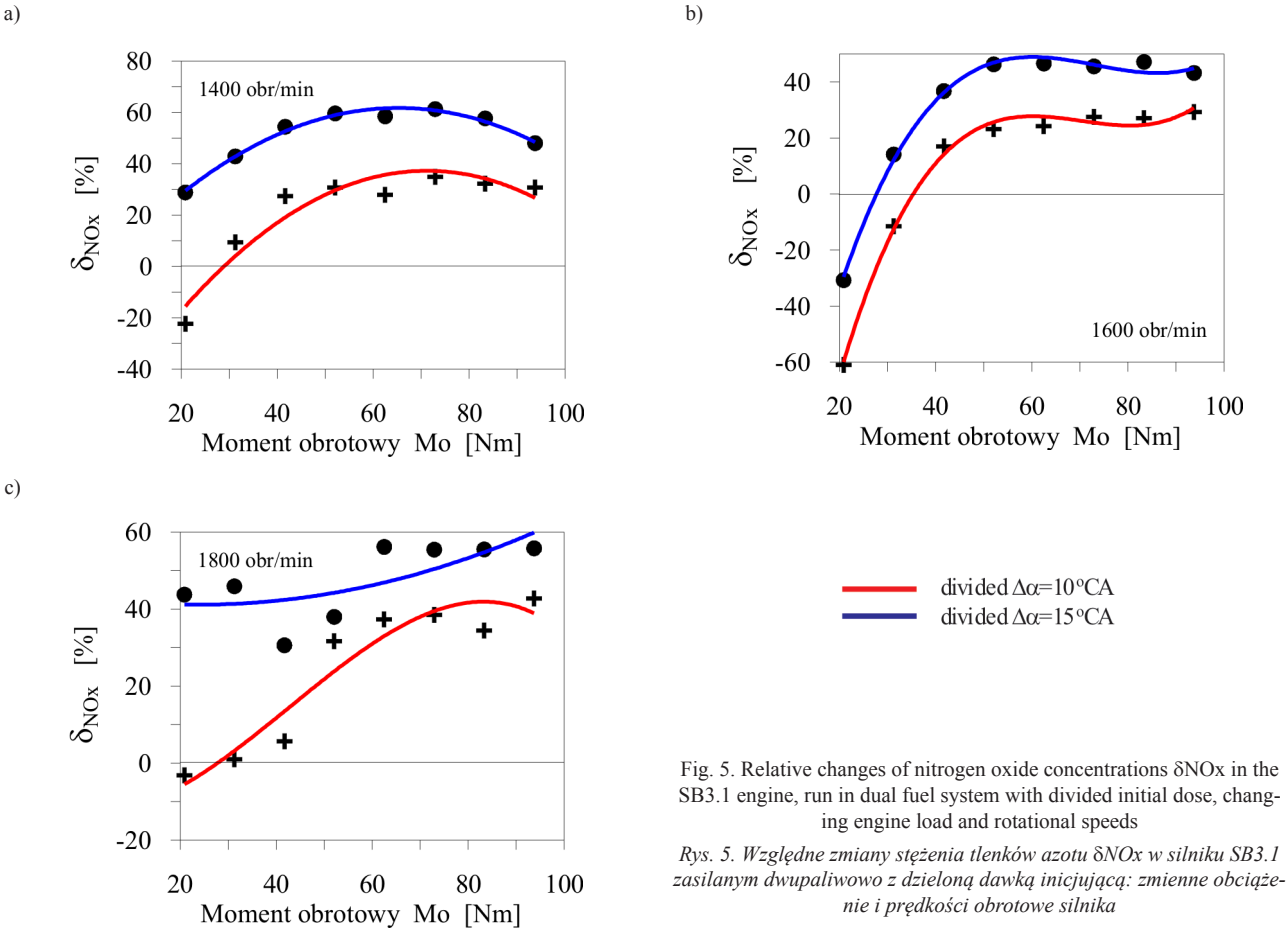


Fig. 5. Relative changes of nitrogen oxide concentrations δNOx in the SB3.1 engine, run in dual fuel system with divided initial dose, changing engine load and rotational speeds

Rys. 5. Względne zmiany stężenia tlenków azotu δNOx w silniku SB3.1 zasilanym dwupaliwowo z dzieloną dawką inicjującą: zmienne obciążenie i prędkości obrotowe silnika

$$\delta_{NOx} = \frac{(NO_x)_p - (NO_x)_d}{(NO_x)_p} \cdot 100\% \qquad (2)$$

Runs of relative change of nitrogen oxides concentrations δNO_x shown in the Fig. 5 point at a possibility of increased emission of the NO_x at minimal engine loads and delay angle of 10 °CA. However, it should be underlined that in such case absolute values of the NO_x concentrations are slight, while engine operation under such load is highly unlikely (size of the investigated engine corresponds with an engines used in trucks and buses, what determines application of a higher loads). Increased emission in this range shouldn't be a problem in case of reduction catalysts, mounted today in all vehicles equipped with self-ignition engines. In range of medium and maximal engine loads, division of the dose discussed here results in reduction of NO_x concentrations in scope of 20–40 %, what at a higher level of the concentrations should be considered as substantial reduction. Even bigger extent of the reduction occurs for the delay of 15 °CA and is equal to 40–65 %. It should be highlighted, that such significant reduction of NO_x concentrations is attained without any loss of engine efficiency, and even with its distinct growth, what has been signaled earlier. Nowadays, emission of the NO_x belongs to the main concerns related to self-ignition engines, difficult to be fulfilled due to permanent reduction of the limits imposed by the international regulations. Due to it, in range of engine loads applied during research tests, i kącie opóźnienia 10 °OWK. Należy jednak zaznaczyć, że bezwzględne wartości stężenia NO_x są wtedy niewielkie, a praca silnika z takim obciążeniem mało prawdopodobna (wielkość badanego silnika odpowiada silnikom do napędu samochodów ciężarowych lub autobusów co determinuje stosowanie większych obciążeń). Zwiększona emisja w tym zakresie nie powinna stanowić problemu dla katalizatorów redukcyjnych, w które są obecnie wyposażone wszystkie pojazdy z silnikami ZS. W zakresie średnich i maksymalnych obciążeń silnika omawiany podział dawki powoduje zmniejszenie stężenia NO_x w zakresie 20–40 %, co przy większym poziomie stężenia, należy uznać za znaczące zmniejszenie. Jeszcze większy zakres zmniejszenia występuje dla opóźnienia 15 °OWK i wynosi 40–65 %. Należy podkreślić, że tak znaczne zmniejszenie stężenia NO_x jest osiągane bez straty sprawności silnika, a nawet z wyraźnym jej wzrostem co sygnalizowano wcześniej. Emisja NO_x jest obecnie głównym problemem silników ZS trudnym do spełnienia z uwagi na ciągłe obniżanie limitów przez przepisy międzynarodowe. Z tego powodu w zakresie obciążeń występujących podczas testów badawczych stosuje się opóźnianie wtrysku paliwa lub zwiększony stopień recyrkulacji spalin. W obydwu przypadkach prowadzi to jednak z reguły do zmniejszenia sprawności silnika.

Podział dawki oleju napędowego wpływa na zwiększenie stężenia węglowodorów THC w spalinach za zaworem

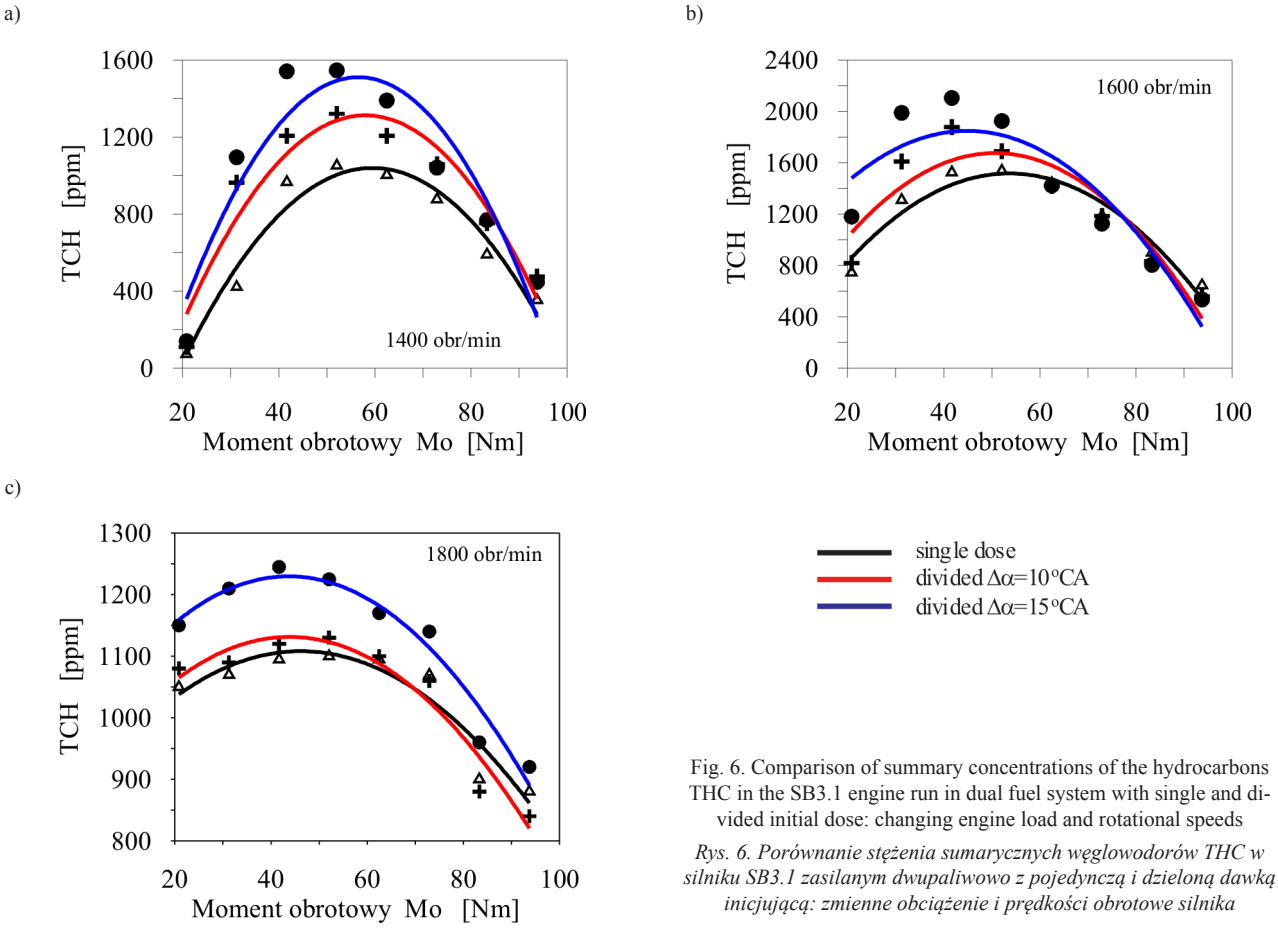
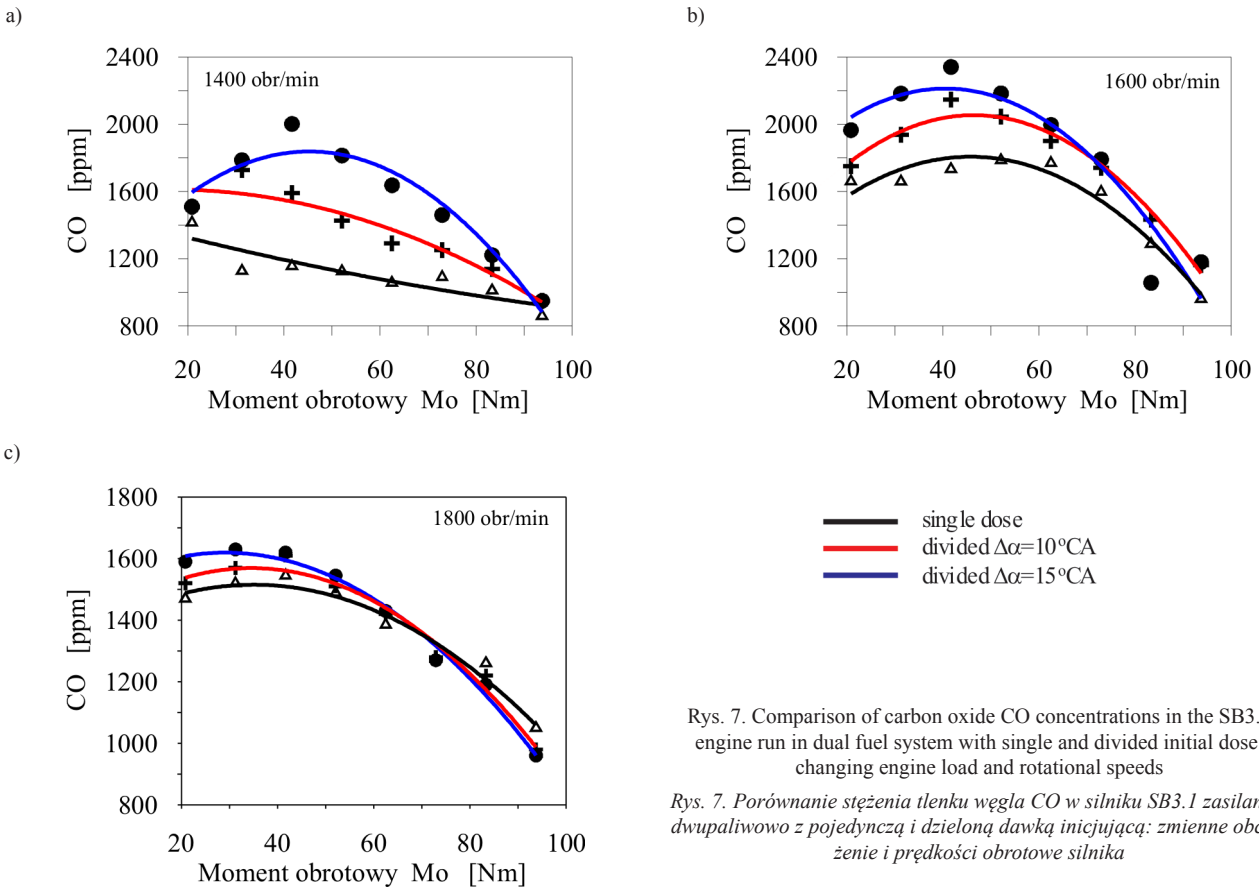


Fig. 6. Comparison of summary concentrations of the hydrocarbons THC in the SB3.1 engine run in dual fuel system with single and divided initial dose: changing engine load and rotational speeds

Rys. 6. Porównanie stężenia sumarycznych węglowodorów THC w silniku SB3.1 zasilanym dwupaliwowo z pojedynczą i dzieloną dawką inicjującą: zmienne obciążenie i prędkości obrotowe silnika



Rys. 7. Comparison of carbon oxide CO concentrations in the SB3.1 engine run in dual fuel system with single and divided initial dose: changing engine load and rotational speeds

Rys. 7. Porównanie stężenia tlenku węgla CO w silniku SB3.1 zasilanym dwupaliwowo z pojedynczą i dzieloną dawką inicjującą: zmienne obciążenie i prędkości obrotowe silnika

there are implemented delaying of fuel injection or increased degree of exhaust gases recirculation. However, in the both cases it leads, as a rule, to reduction of engine efficiency.

Division of dose of the Diesel oil results in growth of the hydrocarbons THC concentrations in exhaust gases downstream the exhaust valve, Fig. 6. Such growth depends mainly on injection delay angle of the additional dose, but depends also on engine load. Delay of 10 °CA results in a slight growth of the THC concentrations in complete range of engine loads.

With the delay angle of 15 °CA differences in THC concentrations are bigger, especially in area of medium engine loads. In case of the dual fuel engines, the main reason of hydrocarbon emissions is combustion of the Diesel oil, mixture of higher hydrocarbons with big number of carbon atoms. Combustion of the Diesel oil occurs in heterogeneous zones of rich mixtures having $\lambda < 1$. Injection of delayed dose of the Diesel oil in course of the combustion additionally worsens process of its oxidation due to reducing quantity of oxygen and increased concentrations of the CO_2 delaying process of oxidation. It can explain observed growth of THC concentrations at division of Diesel oil dose. Gas-air mixture is homogenous with high air excess $\lambda >> 1$. Moreover, to the main combustible components of the natural gas belongs methane CH_4 which is burnt rapidly and completely according to a few simple molecular reactions. The hydrocarbons, CH_4 mainly, can belong to effects of not complete combustion of the natural gas, however, their contents results from near-wall zone, slot effect and at extreme leaning of the wylotowym rys. 6. Wzrost ten zależny jest głównie od kąta opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej, ale zależy również od obciążenia silnika. Opóźnienie 10 °OWK powoduje niewielki wzrost stężenia THC w całym zakresie zmian obciążenia.

Przy kącie opóźnienia 15 °OWK różnice w stężeniach THC są większe szczególnie w zakresie średnich obciążeń silnika. W silnikach dwupaliwowych główną przyczyną emisji węglowodorów jest spalanie oleju napędowego, mieszaniny węglowodorów wyższych o dużej liczbie atomów węgla. Proces spalania ON przebiega w heterogenicznych strefach bogatych mieszanin o $\lambda < 1$. Wtrysk opóźnionej dawki ON w trakcie spalania pogarsza dodatkowo proces jej utleniania z powodu malejącej ilości tlenu, oraz zwiększonego stężenia CO_2 zwalniającego proces utleniania. Może to tłumaczyć obserwowany wzrost stężenia THC przy podziale dawki ON.

Mieszanina gaz–powietrze jest homogeniczna o dużym nadmiarze powietrza $\lambda >> 1$. Ponadto głównym składnikiem palnym gazu ziemnego jest metan CH_4 spalający się szybko i zupełnie według kilku prostych reakcji cząstkowych. Efektem niecałkowitego spalania gazu ziemnego mogą być również węglowodory, głównie CH_4, ale ich zawartość wynika ze strefy przyściennej, efektu szczelinowego oraz przy skrajnym zubożeniu mieszaniny z zaniku płomienia w okolicach ścianek komory spalania. Wydaje się, że dostarczenie dodatkowej porcji energii ze spalanego ON drugiej dawki aktywizuje spalanie mieszaniny gazowej o czym świadczy wzrost sprawności ogólnej silnika.

mixture, from fading of flame in areas near to walls of combustion chamber. It seems that supply of additional portion of energy from burnt Diesel oil in the second dose activates combustion of gaseous mixture, what can be evidenced by growth of overall efficiency of the engine. Observed growths of the THC concentrations indicate, however, that process of worsening of combustion conditions of the Diesel oil has a stronger effect on quantity of generated hydrocarbons than activation of combustion of the gaseous mixture.

The differences in course of combustion of the fuels described above have also an effect on concentrations of the CO shown in the Fig. 7, which are bigger for the divided doses. Also in this case, bigger injection delay angle of the additional dose has more strong effect on differences in concentrations of the CO.

Absolute differences in concentrations of the CO are bigger than THC, however in this point it should be underlined that such differences are present in area of very low levels of concentrations characteristic for self-ignition engines. These are an order of magnitude lower than the concentrations present in exhaust gases of self-ignition engines.

Growths of the THC and CO should not be a problem, because these ingredients are easily oxidized in catalytic converters used today in vehicles with high inversion factor, also in range of lower temperatures of exhaust gases. It can be supposed, that concentrations of the THC and CO in dual fuel engine are lower than in the engine fuelled traditionally, what was confirmed by the investigations publisher earlier [12–15].

4. Summary

From investigations of dual fuel SB3.1 engine with divided dose of the Diesel oil result the following observations, which can be implemented in another type engines adapted to dual fuel feeding:

To advantageous effects of division of the dose can be included:

- greater the bigger injection delay angle of the additional dose. For the delay angle of 10 ^{o}CA, relative reduction of the NO_x concentrations amounted to 20–40 %, while for the angle of 15 ^{o}CA with 40–65%, comparing to the engine fuelled with single dose. Such high effects were obtained with maintained, and even increased, overall efficiency of the engine.
- The highest reduction of the NO_x concentrations was observed in range of high engine loads, and hence in range where the maximal emissions of the NO_x occur. Basing on it, one can suppose that usage of division of the Diesel oil dose can contribute to significant reduction of the NO_x emissions, i.e. ingredient the most restricted recently by the regulations and the most difficult to removal from exhaust gases of self-ignition engines.
- Reduction of smokiness, what is connected with effective combustion of a part of liquid fuel in high temperatures, promoting oxidation of generated particles of soot.
- To disadvantageous phenomena, connected with division of the dose can be counted a slight growth of the CO and THC concentrations in the exhaust gases. It shouldn't be

Obserwowane wzrosty stężenia TCH wskazują jednak, że proces pogorszenia warunków spalania ON silniej wpływa na ilość tworzonych węglowodorów od aktywizacji spalania mieszaniny gazowej.

Opisane wyżej różnice w przebiegu spalania paliw wpływają również na stężenia CO pokazane na rys. 7, które są większe dla dawek dzielonych w stosunku do zasilania z dawka niedzieloną. Również w tym przypadku na różnice stężenia CO silniej wpływa większy kąt opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej.

Bezwzględne różnice stężeń CO są większe od THC ale należy w tym miejscu zaznaczyć, że występują one w zakresie bardzo małych poziomów stężeń charakterystycznych dla silników ZS. Są one o rząd wielkości mniejsze od stężeń występujących w spalinach gazowych silników ZI.

Wzrosty stężenia THC i CO nie powinny stanowić problemu, bowiem składniki te są łatwo utleniane w katalizatorach stosowanych obecnie w samochodach o dużych współczynnikach inwersji, również w zakresie mniejszych temperatur spalin. Można również przypuszczać, że stężenia THC i CO silnika dwupaliwowego są mniejsze od silnika zasilanego tradycyjnie co potwierdziły badania opublikowane wcześniej [12–15].

4. Podsumowanie

Z badań dwupaliwowego silnika SB3.1 z dzieloną dawką oleju napędowego wynikają następujące spostrzeżenia, które mogą być wykorzystane w innych silnikach adoptowanych do zasilania dwupaliwowego.

Do korzystnych skutków podziału dawki można zaliczyć:

- Zmniejszenie stężenia NO_x w spalinach, tym większe im większy jest kąt opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej. Dla kąta opóźnienia 10 ^{o}OWK względne zmniejszenie stężenia NO_x wynosiło 20–40 %, a dla kąta 15 ^{o}OWK 40–65 % w stosunku do silnika zasilanego dawka pojedynczą. Tak duże efekty uzyskano z zachowaniem, a nawet wzrostem, sprawności ogólnej silnika.
- Największe zmniejszenia stężenia NO_x obserwowano w zakresie dużych obciążeń silnika a więc w zakresie występowania maksymalnych emisji NO_x. Można na tej podstawie sądzić, że zastosowanie podziału dawki oleju napędowego przyczyni się do istotnego zmniejszenia emisji NO_x, składnika najsilniej ograniczanego w ostatnim czasie przez normy i najbardziej trudnego do usunięcia ze spalin silników o zapłonie samoczynnym.
- Zmniejszenie zadymienia spalin co związane jest z efektywnym spalaniem części paliwa ciekłego w wysokich temperaturach sprzyjających utlenianiu tworzonych cząsteczek sadzy.
- Do niekorzystnych zjawisk związanych z podziałem dawki należy zaliczyć nieznaczny wzrost stężenia CO i THC w spalinach. Nie powinno to jednak stanowić dużego problemu wobec powszechnego stosowania w silnikach katalizatorów utleniających, szczególnie z

a problem in case of common usage of oxidation catalysts in combustion engines. Especially due to fact, that recorded concentrations of the CO were considerably smaller than reported in the bibliography concerning gaseous engines with spark ignition.
– Obtained results encourage application in contemporary dual fuel engines of the system with divided dose of the Diesel oil. Its adaptation should be preceded by optimization of parameters of the additional dose in complete range of engine operation.

uwagi na fakt, że rejestrowane stężenia CO były znacznie mniejsze od podawanych w literaturze dla gazowych silników z zapłonem iskrowym.
– Uzyskane wyniki zachęcają do aplikacji systemu z dzieloną dawką ON w nowoczesnych silnikach dwupaliwowych. Jego zastosowanie powinno być poprzedzone optymalizacją parametrów dawki dodatkowej w całym polu pracy silnika.

Bibliography/*Literatura*

1. Badr O., Karim G.A., Liu B.: An examination of the flame spread limits in a dual fuel engine. Applied Thermal Engineering 19(1999) 1071–1080, 1999.
2. Mtui P.L., Hill P.G.: Ignition delay and combustion duration with natural gasfueling of diesel engines. SAE Paper 961933, 1996.
3. Saito H., Sakurai T.: Study on Lean Burn Gas Engine Ignited by Pilot Fuel Injection (Part 3). Annual Technical Report Digest Vol. 9, 1999.
4. Stelmasiak Z., Larisch J., Gilowski T., Matyjasik M.: The optimization of combustion process in a dual fuel engine with Common Rail and gas injection systems, International Congress on Combustion Engines PTNSS KONGRES-2007 „The Development of Combustion Engines", 2007.
5. Pietras D.: Evaluation the sound pressure level of the small CI engine. Combustion Engines SC1 (Powertrain, Design, Ecology&Diagnostics) 2009, s. 204–207.
6. Pietras D., Gilowski T., Knefel T.; A program to analyze the combustion process in diesel engine, Combustion engines No. 3/2011 (146), ISSN 0138-0346.
7. Pietras D.; Evaluation of the fuel dose distribution on the combustion process in a small diesel engine, Combustion engines No. 3/2011 (146), ISSN 0138-0346.
8. Liu Z., Karim G.A.: The Ignition Delay Period in Dual Fuel Engines. SAE Paper 950466, 1995.
9. Stelmasiak Z., Larisch J., Gilowski T., Matyjasik M.: Możliwości poprawy składu mieszaniny gazowej przez dławienie powietrza przy częściowych obciążeniach silnika dwupaliwowego, Archiwum Motoryzacji nr 1/2007.
10. Birch S.: Diesel: The fuel of the future. Automotive engineering, May 2002.
11. Luft S. Analiza wpływu dławienia powietrza zasysanego w dwupaliwowym silniku ZS zasilanym parami metanolu na jego parametry eksploatacyjne. Journal of Kones Internal Scientific Conference on Combustion Engines KONES'97, 1997.
12. Beroun S., Martins J.: The Development of Gas (CNG, LPG and H2) Engines for Buses and Trucks and their Emission and Cycle Variability Characteristics. SAE Paper 2001-01-0144, 2001.
13. Bielaczyc P., Szczotka A.: An analysis of exhaust emission from vehicle fuelled with CNG. VI Międzynarodowa Konferencja Gazowa "SILNIKI GAZOWE 2003", Częstochowa 2003.
14. Daisho Y., Takahashi K.: Controlling Combustion and exhaust emissions in a direct-injection diesel engine dual fueled with natural gas. SAE Paper 952436, 1995.
15. Stelmasiak Z.: Studium procesu spalania gazu w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym gazem ziemnym i olejem napędowym, Wydawnictwo ATH w Bielsku-Białej, Rozprawy naukowe Nr 5, Bielsko-Biała, 2003.

Zdzisław Stelmasiak, DSc, DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Sciences at Technical University of Bielsko-Biala.

Dr hab, inż. Zdzisław Stelmasiak – profesor na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humansitycznej w Bielsku-Białej.

e-mail: *zstelmasiak@ath.bielsko.pl*

Marcin Matyjasik, DEng. – doctoral student in the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Sciences at Technical University of Bielsko-Biala.

Dr inż. Marcin Matyjasik – doktorant Katedry Silników Spalinowych i Pojazdów Akademii Techniczno-Humansitycznej w Bielsku-Białej.