

LEAN MIXTURES COMBUSTION IN SI GAS ENGINE WITH PRECHAMBER

Arkadiusz Jamrozik, Karol Cupiał, Arkadiusz Kociszewski

Politechnika Częstochowska

Instytut Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania

42-200 Częstochowa, Al. Armii Krajowej 21,

tel.: (034) 3250503, tel./fax: (034) 3250501

jamrozik@imc.pcz.czest.pl, cupial@imc.pcz.czest.pl, kocisz@imc.pcz.czest.pl

Abstract

Engines of heterogeneous mixtures two-stage combustion system with sectional combustion chamber give the possibility of significantly greater fuel depletion (average $\lambda \approx 2$) than it is possible in classical engines of homogeneous mixtures single-stage combustion system (maximum $\lambda \approx 1.5$). The paper presents the results of research of experimental engine with two-stage combustion system powered by propane-butane for three different values of energetic share of fuel delivered to the prechamber in total energy delivered in fuel to the inlet system and to prechamber: $Q_{in}/Q_{tot} = 2.5\%$, 5% and 8% . Values of indicated work, indicated efficiency, non-repeatability factor of indicated work were obtained as a result of the research. Toxic components emission in exhaust gases of the two-stage combustion engine was measured and compared with current standards of those components emission applying to gas engines dedicated to HDV (Heavy Duty Vehicle) and stationary SI engines powered by gaseous fuel.

SPALANIE MIESZANEK UBOGICH W GAZOWYM SILNIKU ZI Z KOMORĄ WSTĘPNĄ

Streszczenie

Silniki z dzieloną komorą spalania realizujące dwustopniowy proces spalania mieszanek heterogenicznych dają możliwość znacznie większego zubożenia mieszanki palnej (średnio $\lambda \approx 2$) niż jest to możliwe w silnikach konwencjonalnych spalających ładunki homogeniczne w systemie jednostopniowym (maksymalnie $\lambda \approx 1.5$). W pracy przedstawiono rezultaty badań silnika eksperymentalnego z dwustopniowym systemem spalania zasila- nego gazem propan-butan dla trzech wartości udziału energii dostarczonej w paliwie do komory wstępnej, do sumy energii dostarczonej w paliwie do układu dolotowego i do komory: $Q_{in}/Q_{tot} = 2.5\%$, 5% i 8% . W wyniku badań otrzymano wartości jednostkowej pracy indykowanej, sprawności indykowanej, współczynnika niepowtarzalności jednostkowej pracy indykowanej. Zmierzone na stanowisku badawczym wartości emisji toksycznych składników spalin silnika z dwustopniowym systemem spalania porównano z obowiązującymi normami emisji tych składników dotyczącymi gazowych silników przeznaczonych do pojazdów HDV (Heavy Duty Vehicle) i stacjonarnych silników ZI zasilanych paliwem gazowym.

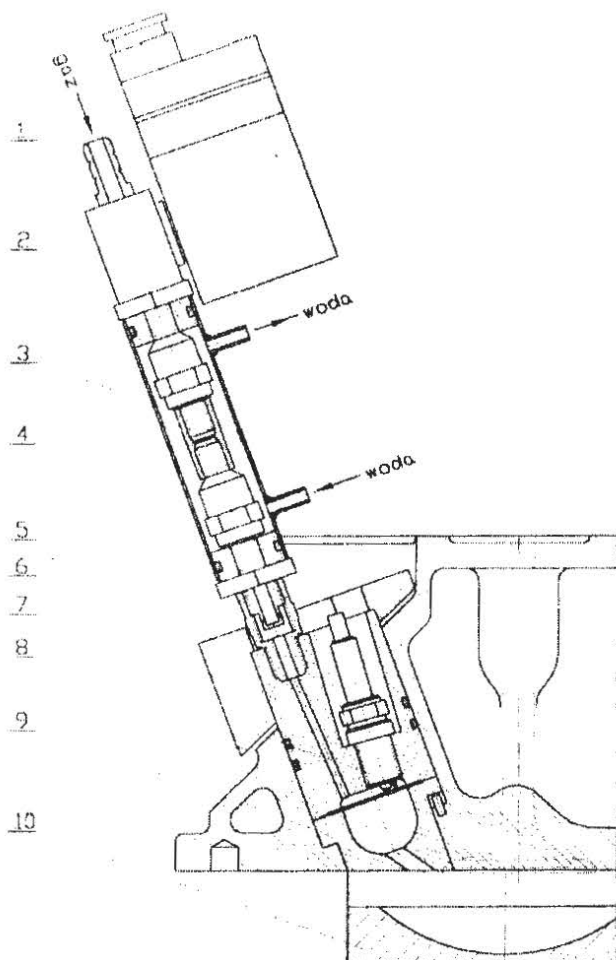
1. Wstęp

Problem zanieczyszczenia atmosfery spalinami silników tłokowych jest obecnie jednym z najważniejszych działów walki o ochronę naturalnego środowiska człowieka. Spośród licznych szkodliwych składników spalin najtrudniejsze jest ograniczenie emisji tlenków azotu NO_x . Spalanie mieszanek ubogich prowadzi do obniżenia temperatury procesu spalania w cylindrze i jest jedną z metod ograniczenia emisji tlenków azotu oraz poprawy sprawności silnika tłokowego. Silniki konwencjonalne o zapłonie iskrowym, spalające ubogie mieszanki homogeniczne, pracują prawidłowo jedynie w wąskim zakresie współczynnika nadmiaru powietrza [8],[9]. Przekroczenie tych granic w stronę mieszanek bogatszych, z jednej strony związane jest ze zjawiskiem spalania stukowego i wzrostem emisji NO_x , a przekroczenie w

stronę mieszanek uboższych, wiąże się z narastającą niepowtarzalnością kolejnych cykli pracy silnika oraz wypadaniem zapłonów i wzrostem emisji HC i CO. Silniki z dzieloną komorą spalania realizujące dwustopniowy proces spalania mieszanek heterogenicznych dają możliwość znacznie większego zubożenia mieszanki palnej (średnio $\lambda \approx 2$) niż jest to możliwe w silnikach konwencjonalnych spalających ładunki homogeniczne w systemie jednostopniowym (maksymalnie $\lambda \approx 1,5$). Uwarstwienie i spalanie mieszanki palnej w systemie dwustopniowym wykorzystują nowoczesne stacjonarne silniki gazowe dużej mocy, zasilane mieszanekami ubogimi, w których osiąga się znaczne ograniczenie emisji toksycznych składników spalin, zwłaszcza NO_x . Lepsze poznanie procesu spalania dwustopniowego ma istotny wpływ na konstrukcje i eksploatacje tych silników.

2. Opis silnika badawczego

Silnik badawczy powstał na bazie czterosuwowego silnika wysokoprężnego S320 ER, wyprodukowanego przez Andrychowską Wytwórnę Silników Wysokoprężnych „ANDORIA”, który po zmianach konstrukcyjnych dzięki nowemu układowi zasilania oraz wykonaniu instalacji zapłonowej został przystosowany do spalania paliwa gazowego jako silnik z zapłonem iskrowym. Głównym elementem podlegającym modernizacji w silniku była głowica. Dokonane zmiany umożliwiły montaż specjalnie skonstruowanej wkładki z dodatkową komorą spalania (komorą wstępną) w nowo wykonanej głowicy silnika S320 ER ustalając stopień sprężania na 8,6.



Rys. 1. Głowica silnika badawczego z komorą wstępną

- 1 – cewka elektromagnetyczna
- 2 – zawór elektromagnetyczny
- 3 – płaszcz wodny
- 4 – zawór zwrotny
- 5 – wygaszacz płomienia
- 6 – nakładka ustalająca
- 7 – głowica komory wstępnej
- 8 – świeca zapłonowa
- 9 – korpus komory wstępnej
- 10 – tłok

Fig. 1. Test engine head with prechamber

- 1 - solenoid coil
- 2 - solenoid valve
- 3 - water jacket
- 4 - non-return valve
- 5 - flame suppressor
- 6 - retaining cover
- 7 - prechamber head
- 8 - spark plug
- 9 - prechamber body
- 10 - piston

Wykonano, zgodnie ze sporządzonym projektem, możliwą do zamontowania w nowej głowicy silnika wkładkę z dodatkową komorą spalania. Wkładka ta składała się z dwóch czę-

ści: głowicy i korpusu komory wstępnej. Głowica komory wstępnej wykonana została ze stali 35, a korpus komory ze stopu żaroodpornego o podwyższonych własnościach wytrzymałościowych w wysokich temperaturach o nazwie Nimonic 90. Objętość komory wstępnej o kształcie kulisto-walcowym stanowiła 4,5% całkowitej objętości nad tłokiem w ZZP. W głowicy komory wykonano gniazdo świecy zapłonowej o gwincie M14×1,25 oraz gniazdo piezokwarcowego czujnika ciśnienia M7×0,75. Ponadto, w głowicy komory wstępnej wywiercono kanał o średnicy 3 mm służący do doprowadzania gazowej dawki paliwa wzbogacającego. W korpusie komory wstępnej został wykonany kanał o średnicy 6 mm łączący główną komorę spalania w cylindrze silnika z komorą dodatkową w głowicy.

Mieszanka palna w komorze wstępnej wzbogacana była pod koniec suwu sprężania paliwem gazowym LPG poprzez dodatkowy układ zasilania, którego głównymi elementami były dwa zawory zwrotne oraz elektromagnetyczny zawór dolotowy. Umieszczone w specjalnym płaszczu wodnym zawory zwrotne były chłodzone wodą (rys. 1).

Zastosowano mieszalnikowy system zasilania komory głównej propanem-butanem, który dostarczany był z butli pod własnym ciśnieniem wynoszącym około 0,8 MPa. Stanowiący element instalacji reduktor-parownik podgrzewano za pomocą wody pochodzącej z układu chłodzenia silnika badawczego, której obieg zapewniała odpowiednio dobrana pompa cyrkulacyjna. Mieszalnik gazu z otworami wykonanymi promieniowo umieszczono w kolektorze dolotowym silnika. Regulacja składu mieszanki palnej możliwa była dzięki znajdującemu się między reduktorem a mieszalnikiem zaworowi dozującemu sterowanemu ręcznie.

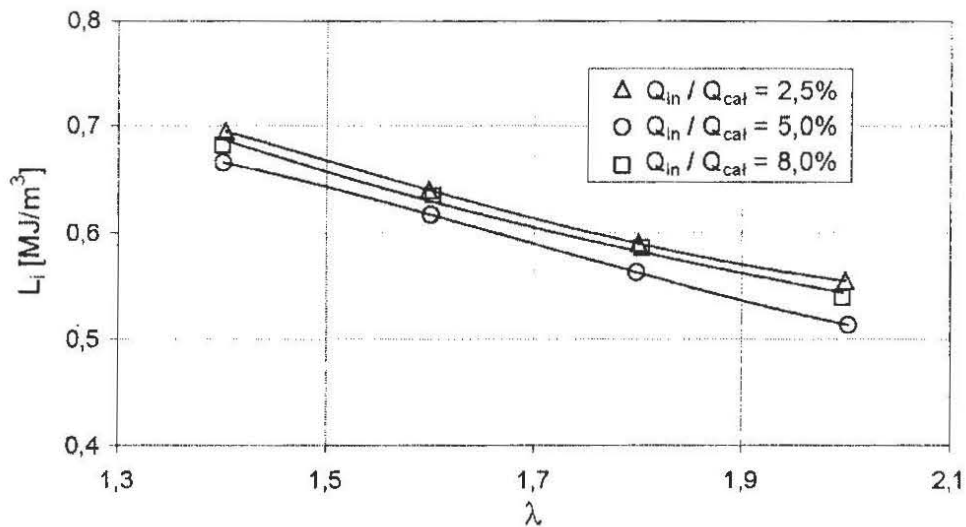
3. Przebieg badań

Badania gazowego silnika z dwustopniowym systemem spalania objęły trzy serie pomiarowe, uwzględniające różny stosunek energii dostarczonej w paliwie do komory wstępnej Q_{in} , do sumy energii dostarczonej w paliwie do układu dolotowego i do komory Q_{cat} . Przeprowadzono indykowanie silnika dla $Q_{in}/Q_{cat} = 2.5\%$, dla $Q_{in}/Q_{cat} = 5\%$ oraz dla $Q_{in}/Q_{cat} = 8\%$, uwzględniając zmianę średniego współczynnika nadmiaru powietrza w zakresie od 1.4 do 2.0, a także zmianę kąta wyprzedzenia zapłonu w zakresie od 6° do 18° OWK przed ZZP. Rejestracji dokonano dla 95-u kolejnych cykli pracy co 1° OWK, przy wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania [7]. Jednocześnie dokonywano pomiaru innych wielkości, które są niezbędne do dalszej analizy wyników indykowania programem SILNIK [5], takich jak: prędkość obrotowa, zużycie powietrza, zużycie paliwa gazowego w komorze głównej silnika, zużycie paliwa gazowego w komorze wstępnej silnika, temperatura powietrza, temperatura gazowej mieszanki palnej, temperatura paliwa gazowego komory wstępnej, temperatura spalin oraz ciśnienie i temperatura otoczenia. Rejestrowano także zmiany emisji toksycznych składników w gazach wylotowych silnika takich jak: NO_x , HC i CO.

4. Wyniki badań

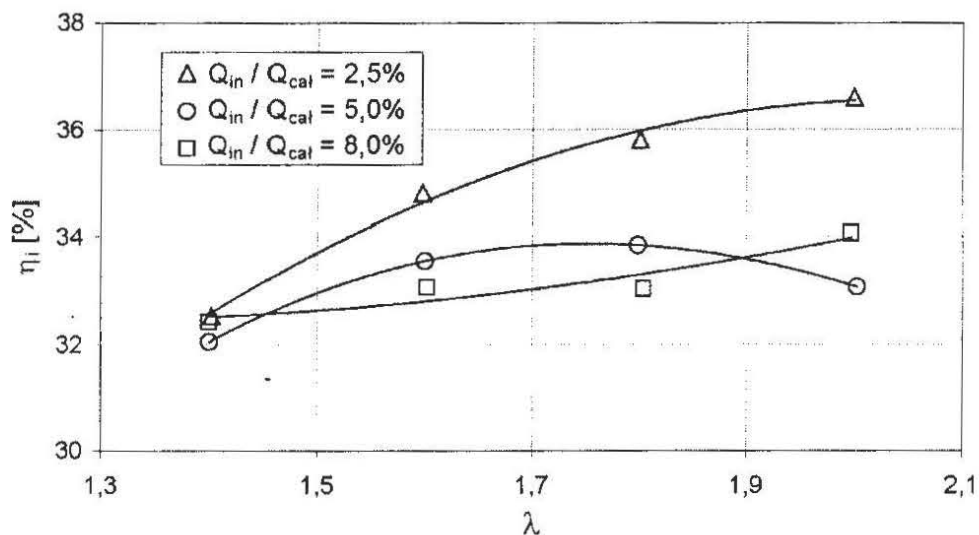
W wyniku analizy przeprowadzonych pomiarów wyznaczono wartości jednostkowej pracy indykowanej L_i , sprawności indykowanej η_i , współczynnika niepowtarzalności jednostkowej pracy indykowanej COV_{L_i} oraz stężeń toksycznych składników w spalinach silnika badawczego. Zmiana udziału energetycznego paliwa doprowadzanego do komory wstępnej Q_{in} w całkowitej ilości energii Q_{cat} doprowadzonej w paliwie miała znaczący wpływ na jednostkową pracę (rys.3) i sprawność indykowaną (rys.4) silnika badawczego. W przypadku kiedy udział ten był najmniejszy i wynosił 2,5%, jednostkowa praca indykowana malejąc ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza zawierała się w przedziale od 0,69 do 0,55

MJ/m³. Dla $Q_{in}/Q_{cat} = 5\%$ przy podobnym spadku ze wzrostem λ przedział ten wynosił od 0,66 do 0,51 MJ/m³, a dla $Q_{in}/Q_{cat} = 8\%$ od 0,68 do 0,53 MJ/m³.



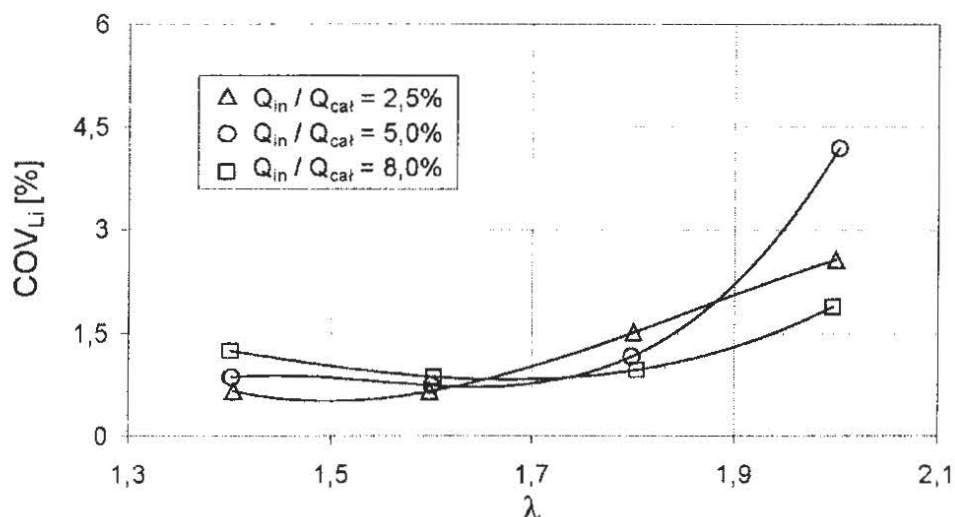
Rys. 3. Jednostkowa praca indykowana silnika gazowego z dwustopniowym systemem spalania
Fig. 3. Indicated work of gas engine with two-stage combustion system

Najwyższą sprawność indykowaną η_i równą 36,5% silnik badawczy osiągnął spalając najuboższą mieszankę o średnim współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 2,0$, dla przypadku kiedy udział paliwa wzbogacającego mieszankę w komorze wstępnej wynosił 2,5%. Maksymalną sprawność indykowaną dla $Q_{in}/Q_{cat} = 5\%$ równą 33,8% silnik osiągnął przy $\lambda = 1,8$, a dla $Q_{in}/Q_{cat} = 8\%$ około 34% przy $\lambda = 2,0$ (rys. 4).



Rys. 4. Sprawność indykowana silnika gazowego z dwustopniowym systemem spalania
Fig. 4. Indicated efficiency of gas engine with two-stage combustion system

Najmniejsze wartości współczynnika niepowtarzalności jednostkowej pracy indykowanej COV_{L_i} , wynoszące od 0,66% dla $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$ i 0,75% dla $Q_{in}/Q_{cat} = 5\%$ do 0,88% dla $Q_{in}/Q_{cat} = 8\%$, uzyskano dla każdego z trzech rozpatrywanych udziałów ładunku wzbogacającego w komorze wstępnej przy $\lambda = 1,6$ (rys. 5).

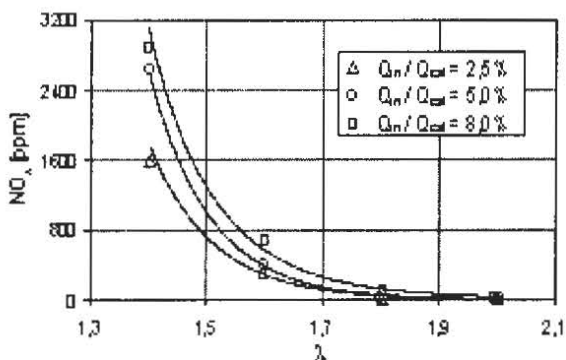


Rys. 5. Współczynnik niepowtarzalności jednostkowej pracy indykowanej COV_{Li} silnika gazowego z dwustopniowym systemem spalania

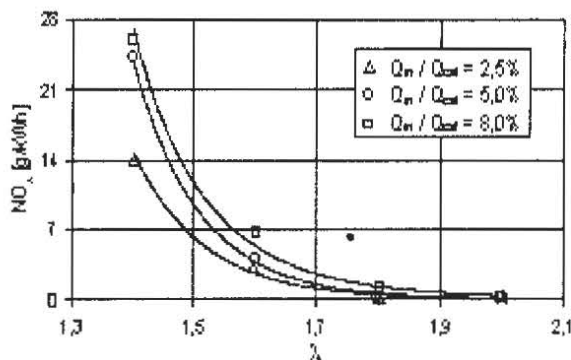
Fig. 5. Non-repeatability factor of indicated work COV_{Li} of gas engine with two-stage combustion system

W ramach pracy na stanowisku badawczym dokonano również pomiaru i analizy toksyczności spalin silnika gazowego z dwustopniowym systemem spalania. Zmierzone wartości emisji NO_x i HC w ppm oraz CO w % odniesiono do pracy efektywnej silnika (g/kWh).

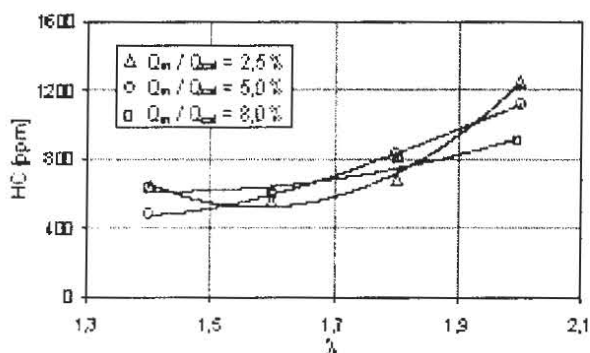
Analiza przeprowadzonych pomiarów pokazała, że emisja toksycznych składników spalin była zależna od składu mieszanki palnej i od stosunku Q_{in}/Q_{cat} . Ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza malała zawartość tlenków azotu w spalinach silnika, natomiast rosła ilość węglowodorów i tlenku węgla. Spadek udziału energii paliwa komory wstępnej w całkowitej energii paliwa dostarczonego do silnika, okazał się dla gazowego silnika z dwustopniowym systemem spalania korzystny w przypadku emisji wszystkich analizowanych składników spalin. Zawartość zarówno NO_x (rys. 6 i rys. 7), HC (rys. 8 i rys. 9), jak i CO (rys. 10 i rys. 11) w spalinach silnika była najniższa dla najmniejszego z badanych stosunku $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$.



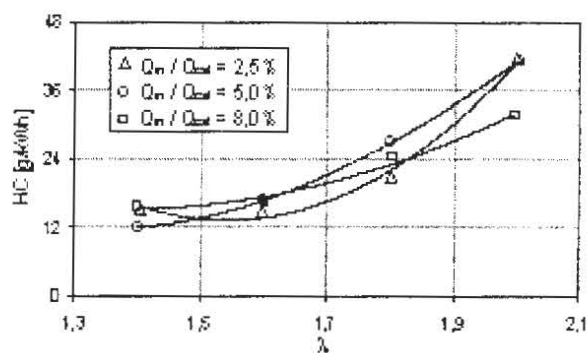
Rys. 6. Stężenie NO_x w spalinach silnika w ppm
Fig. 6. Nitric oxide concentration in exhaust gases of engine in ppm



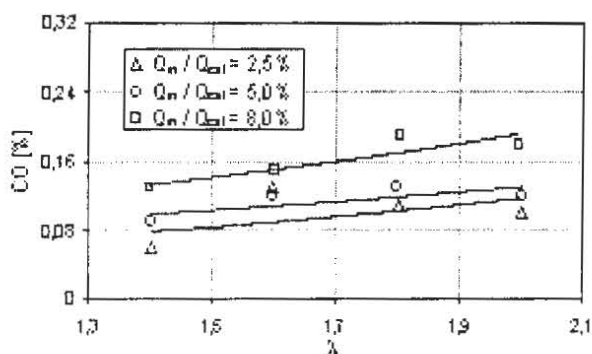
Rys. 7. Emisja NO_x silnika gazowego w g/kWh
Fig. 7. Nitric oxide emission of engine in g/kWh



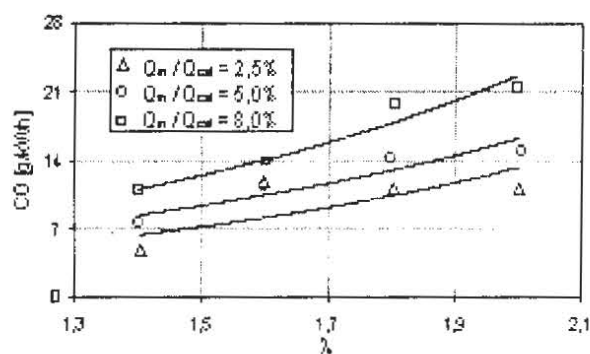
Rys. 8. Stężenie HC w spalinach silnika w ppm
Fig. 8. Hydrocarbons concentration in exhaust gases of engine in ppm



Rys. 9. Emisja HC silnika w g/kWh
Fig. 9. Hydrocarbons emission of engine in g/kWh



Rys. 10. Stężenie CO w spalinach silnika w %
Fig. 10. Carbon monoxide concentration in exhaust gases of engine



Rys. 11. Emisja CO silnika w g/kWh
Fig. 11. Carbon monoxide emission of engine in % in g/kWh

Otrzymane wyniki toksyczności spalin gazowego silnika badawczego z dwustopniowym systemem spalania, pracującego bez katalizatora, wyrażone w g/kWh pracy efektywnej oraz w g/m³, zestawiono z obowiązującymi normami emisji toksycznych składników spalin, dotyczącymi gazowych silników przeznaczonych do pojazdów HDV (Heavy Duty Vehicle) (EURO III, EURO IV) (tabela 1) [10] i stacjonarnych silników ZI zasilanych paliwem gazowym (TA-Luft) (tabela 2) [6]. W celu porównania emisji silnika badawczego z rozporządzeniem TA-Luft, uzyskane stężenia NO_x oraz CO, wyrażone w g/m³, zredukowano do 5% zawartości tlenu w spalinach.

Tabela 1. Dopuszczalne wartości emisji toksycznych składników spalin wg EURO III i EURO IV dotyczące silników gazowych pojazdów HDV i emisja gazowego silnika badawczego z komorą wstępną
Table 1. Acceptable values of toxic components emission in exhaust gases according to EURO III i EURO IV applying to gas engines dedicated to HDV and emission of test gas engine with perchamber

		CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]
EURO III		5,5	0,78	5,0
EURO IV		4,0	0,55	3,5
Silnik badawczy z dwustopniowym systemem spalania	λ			
	1,4	4,89	15,28	13,92
	1,6	11,84	14,91	3,13
	1,8	11,33	20,81	0,22
	2,0	11,28	41,52	0,02

Tabela 2. Dopuszczalne wartości emisji toksycznych składników spalin wg TA-Luft dotyczące silników stacjonarnych ZI zasilanych paliwem gazowym i emisja gazowego silnika badawczego z komorą wstępną
 Table 2. Acceptable values of toxic components emission in exhaust gases according to TA-Luft applying to stationary SI engines powered by gaseous fuel and emission of test gas engine with prechamber

		NO _x [g/m ³]	CO [g/m ³]
TA-Luft		0,25	0,3
Silnik badawczy z dwustopniowym systemem spalania	λ		
	1,4	2,11	0,74
	1,6	0,48	1,83
	1,8	0,034	1,75
	2,0	0,0038	1,8

5. Podsumowanie

W silniku gazowym z dwustopniowym systemem spalania, udział energetyczny paliwa wzbogacającego mieszankę palną w komorze wstępnej, ma wpływ na poziom emisji toksycznych składników spalin, jednostkową pracę i sprawność indykowaną, a także na stabilność jego pracy i niepowtarzalność obiegów. Najlepsze efekty osiągnięto dla 2,5% udziału energetycznego dawki paliwa wzbogacającego, była to wartość najmniejsza z badanych. Silnik gazowy dla $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$ najwyższą sprawność 36,5% osiągnął przy $\lambda = 2,0$. Minimalną, bardzo dobrą wartość współczynnika niepowtarzalności jednostkowej pracy indykowanej $COV_{I,1}$ wynoszącą 0,66%, osiągnięto dla $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$ przy $\lambda = 1,6$. W przypadku 2,5% udziału ładunku wzbogacającego mieszankę palną w komorze wstępnej, jednostkowa praca indykowana malała ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza i zawierała się w przedziale od 0,69 MJ/m³ dla $\lambda = 1,4$ do 0,55 MJ/m³ dla $\lambda = 2,0$. Maksymalną zawartość NO_x - 1590 ppm (13,92 g/kWh) w spalinach silnika gazowego dla $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$ zmierzono przy $\lambda = 1,4$. Pomiar ilości NO_x analizatorem spalin przy błędzie pomiaru analizatora wynoszącym 32 ppm, w przypadku kiedy silnik pracował na mieszance najuboższej o $\lambda = 2,0$, pokazał, że w gazach wydechowych poziom emisji tlenu azotu był bliski zeru. Maksymalna wartość stężenia tlenu węgla w spalinach dla $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$ występowała przy $\lambda = 1,6$ i wyniosła 0,13% (11,84 g/kWh). Najniższe stężenie HC w spalinach równe 558 ppm (14,91 g/kWh) silnik gazowy dla $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$ osiągnął przy $\lambda = 1,6$, a najwyższe 1254 ppm (41,52 g/kWh) przy $\lambda = 2,0$.

Emisja NO_x silnika badawczego realizującego dwustopniowy proces spalania, zasilanego całkowicie paliwem gazowym LPG i pracującego bez katalizatora, przy $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$ w zakresie $\lambda = 1,6 \div 2,0$, nie przekracza wartości granicznych emisji NO_x, określonych w EURO III oraz EURO IV dla silników gazowych przeznaczonych do pojazdów HDV. Poziom emisji HC i CO, w całym zakresie współczynnika nadmiaru powietrza (z wyjątkiem emisji CO przy $\lambda = 1,4$), dla gazowego silnika z komorą wstępną przekracza wartości dopuszczalne zawarte w tych normach. Należy jednak zaznaczyć, że pomiary toksyczności spalin silnika eksperymentalnego prowadzone były w warunkach odbiegających od wymogów norm, gdyż przeprowadzono je tylko w jednym punkcie pracy silnika przy pełnym obciążeniu, a nie w cyklu programowych zmian obciążenia wymaganym w testach w ramach EURO III i EURO IV.

Emisja NO_x silnika badawczego z dwustopniowym systemem spalania, zasilanego gazem LPG w zakresie λ od 1,8 do 2,0, nie przekracza wartości granicznych emisji NO_x określonych w TA-Luft, dotyczących gazowych silników stacjonarnych ZI. W zakresie λ od 1,4 do 1,6 emisja tlenków azotu silnika badawczego przekracza wartości podane w rozporządze-

niu TA-Luft. Poziom emisji CO w całym zakresie współczynnika nadmiaru powietrza dla gazowego silnika z dzieloną komorą spalania przekracza dopuszczalne wartości emisji CO zawarte w TA-Luft.

Optymalna wartość współczynnika nadmiaru powietrza mieszanki spalanej w wolnoścącym silniku gazowym z dwustopniowym systemem spalania dla $Q_{in}/Q_{cal} = 2,5\%$ wyniosła około 2,0. Dla tej wartości λ praca silnika gazowego z dzieloną komorą spalania charakteryzowała się największą sprawnością indykowaną $\eta_i = 36,5\%$, małą niepowtarzalnością obiegów pracy ($COV_{Li} < 3\%$), oraz najmniejszą, bliską zeru, emisją NO_x w spalinach. Do obniżenia, zwiększonego przy tym współczynnika nadmiaru powietrza, stężenia HC wynoszącego około 1250 ppm (41,52 g/kWh) w gazach wydechowych takiego silnika można wykorzystać najprostszy katalizator oksydacyjny. Spadkowi wartości jednostkowej pracy indykowanej towarzyszącemu spalaniu mieszanek ubogich można przeciwdziałać przez zastosowanie doładowania silnika i korygować przez powiększanie ciśnienia doładowania. Rozwiązanie to jest powszechnie stosowane w stacjonarnych silnikach gazowych dużej mocy, napędzających generatory prądotwórcze.

Podczas pracy silnika na mieszance optymalnej o średnim współczynnika nadmiaru powietrza 2,0, zawartość tlenków azotu w spalinach suchych silnika badawczego realizującego dwustopniowy system spalania (zredukowana do 5% tlenu), równa $0,0041 \text{ g/m}^3$ (0,039 g/kWh) była mniejsza około 60 razy od wielkości emisji określonej w rozporządzeniu TA-Luft ($0,25 \text{ g/m}^3$) i prawie 90 razy mniejsza od dopuszczalnej w normie EURO IV ($3,5 \text{ g/kWh}$), która obowiązywać będzie od 2005 roku.

Literatura

- [1] Cupiał K., Jamrozik A., Kociszewski A.: *Research of the gas engine with two-stage combustion system*. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, Lublin - Kijów 2004, 51-61.
- [2] Cupiał K., Jamrozik A., Kociszewski A.: *Dwustopniowy system spalania w silniku gazowym*. VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa – Silniki Gazowe 2003. Konstrukcja – Badańia – Eksploatacja – Paliwa odnawialne, Częstochowa - Szczyrk 2003, 213-227.
- [3] Cupiał K., Jamrozik A., Kociszewski A.: *Vergleich von Gasmotoren, die mit verschiedenen Verbrennungssystemen arbeiten*. Erste Internationale Fachthemenkonferenz Gasmotoren, MOTORTECH GmbH, Celle 2003.
- [4] Cupiał K., Jamrozik A., Spyra A.: *Single and two - stage combustion system in the SI test engine*. Journal of Kones, Internal Combustion Engines, Vol 9, No 3-4, Warsaw - Gdansk 2002, 67-74.
- [5] Cupiał K.: *SILNIK – wersja 2001.5 – program do opracowywania wykresów indykatorowych*. Instytut Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania, Częstochowa 2002.
- [6] *Die Novellierung der TA-Luft 2002*. Bedeutung für KWK-Anlagen. TA-Luft 5.4.1.4, 2002.
- [7] Gruca M.: *LCTXR – program do rejestracji i analizy sygnałów*, Instytut Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania, Częstochowa 2001.
- [8] Kowalewicz A., Luft S., Różycki A., Gola M.: *Wybrane aspekty zasilania silnika o ZI ubogimi mieszankami benzynowo-powietrznymi*. Journal of Kones, Internal Combustion Engines, Vol 6, No 3-4, 1999, 156-162.
- [9] Kowalewicz A., Różycki A.: *Analiza możliwości ubożego spalania homogenicznych mieszanin paliwowo-powietrznych*. Journal of Kones, Internal Combustion Engines, Vol 6, No 3-4, 1999, 163-170.
- [10] Merksiz J.: *Ekologiczne problemy silników spalinowych*, Tom I. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.