

A.S. KHATCHIYAN\*  
V.E. KUZNETSOV  
I.G. SHISHLOV

## **Analiza sposobów zapewnienia małej emisji (w tym metanu) z silników spalinowych zasilanych gazem ziemnym**

*W artykule przedstawiono wyniki badań wolnossących i turbodoładowanych silników typu V zasilanych gazem ziemnym. W celu zmniejszenia emisji z tych silników opracowano i przebadano oryginalny system zasilania zapewniający dokładne sterowanie składem mieszanki gazowo-powietrznej w obu rzędach cylindrów. Stwierdzono, że zmniejszenie emisji związków toksycznych wymaga precyzyjnego sterowania składem mieszanki gazowo-powietrznej, zastosowania mieszanki ubogiej na obciążeniach częściowych, regulowanego turbodoładowania i odpowiedniego doboru reaktorów z palladową warstwą katalityczną.*

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, silnik gazowy, gaz ziemny, sterowanie, układ zasilania, emisja

### **The analysis of ways to ensure low emission (methane inclusive) from natural gas fuelled engines**

*The results of research work on unsupercharged and turbocharged V-type engines with natural gas fuelling system have been presented in the paper. For lower emission the original gas supply system has been designed which ensures very proper control of air-fuel ratio in both cylinder banks. It was stated, that lowering the emission needs very precise control of gas-air ratio, application of lean mixture on partial loads, control of turbocharging and appropriate choice of converters with palladium catalytic coach.*

Key words: IC engine, gas engine, natural gas, engine control, fuel supply system, emission

#### **1. Wprowadzenie**

Przeróbka silników ZS na pracę na gazie ziemnym ma wiele zalet:

- zwiększenie światowych rezerw energii;
- zmniejszenie emisji hałasu i cząstek stałych z silnika;
- zmniejszenie wydatków na paliwo i olej smarujący (w wielu krajach);
- zwiększenie żywotności silnika.

Jednakże zmniejszenie gazowej emisji, szczególnie emisji tlenków azotu i węglowodorów (głównie metanu) okazuje się poważnym problemem. Artykuł omawia ten problem w dla silników doładowanych i niedoładowanych. W odniesieniu do silników niedoładowanych występuje konieczność wykorzystania nie tylko dobrze znanych sposobów obniżenia emisji (praca na mieszance stechiometrycznej z katalizatorem trójfunkcyjnym i czujnikami zawartości tlenu), lecz także – w przypadku silników typu V – konieczność opracowania nowego typu układów zasilania gazem i ich sterowania, aby zapewnić skład mieszanki paliwowo-powietrznej bardzo zbliżony do składu stechiometrycznego na dużych obciążeniach i przy pracy na biegu jałowym w obu rzędach cylindrów.

#### **2. Wykorzystanie reaktorów katalitycznych dla małej emisji tlenków azotu, tlenku węgla i węglowodorów, w tym metanu**

Na obciążeniach częściowych uboga mieszanka zapewnia zwiększenie sprawności pracy silnika. Zwraca się uwa-

#### **1. Introduction**

The conversion of diesels to operate on natural gas brings about several advantages:

- increase of world energy reserves;
- decrease of engine noise emission and emission of particles;
- lowering of expenses on lubricating oil and fuel (in many countries);
- increase of engine life.

However, the lowering of the gaseous emissions, particularly emission of nitrogen oxides and hydrocarbons (particularly methane) turn out to be a serious problem. The paper deals with the above mentioned problem for the unsupercharged and turbocharged engines. As regards the unsupercharged engines, it turns out necessary to use not only the well known ways (operation on stoichiometric mixture with three way catalytic converters and oxygen sensors), but also in the case of V-type engine to develop a new type of gas supply and gas supply control systems to keep air fuel mixture strength close to stoichiometry at high loads and at idle condition in both engine blocks.

#### **2. Application of catalysts for low emission of nitrogen, carbon oxides and hydrocarbon, methane inclusive**

At part loads, lean mixture is ensured to increase engine operating efficiency. Attention was paid to the development of catalysts that may be effective in oxidizing methane. This

gę na rozwój reaktorów katalitycznych, które mogłyby być skuteczne w utlenianiu metanu. Takie prace rozwojowe przeprowadzono we współpracy z Centralnym Naukowym Instytutem Badawczym NAMI w Moskwie. Wyniki badań zweryfikowały podjęte prace rozwojowe.

W odniesieniu do silników turbodoładowanych praca na ubogich mieszankach okazuje się korzystna pod względem niskiej emisji tlenków azotu. Podczas pracy na ubogich mieszankach temperatura spalin jest raczej niska i – z tego względu – utlenianie metanu staje się dużym problemem. Badania przyczyniły się do jego rozwiązania poprzez skonstruowanie dwustopniowego reaktora katalitycznego z paladową warstwą katalityczną.

Jest wiele wolnossących silników ZS, które nie są przystosowane do kontroli emisji. Jeżeli przeróbka tych silników do zasilania gazem ziemnym jest przeprowadzona prawidłowo, staje się możliwe nie tylko zmniejszenie hałaśliwości i emisji cząstek stałych, lecz także zapewnienie istotnego obniżenia emisji tlenków azotu i tlenku węgla, podobnie jak węglowodorów, w tym także metanu.

Weźmy pod uwagę jakie trudności występują przy przeróbce wolnossącego silnika ZS na zasilanie gazem ziemnym. W przypadku centralnego układu zasilania z mieszalnikiem gazu zapewnienie takiej samej mocy i momentu obrotowego jak w przypadku silnika wyjściowego wymaga zmniejszenia współczynnika nadmiaru powietrza. Średnie ciśnienie użyteczne  $p_e$  w przypadku silnika z wewnętrznym tworzeniem mieszanki można wyznaczyć ze wzoru:

$$p_e = \frac{H_u \eta_i}{\alpha l_0 (1+d)} \eta_v \rho_0 \eta_m \quad (1),$$

gdzie:  $H_u$  – wartość opałowa paliwa,  $\lambda_0$  – współczynnik składu stechiometrycznego,  $\eta_i$  – sprawność indykowana,  $\lambda$  – względny współczynnik składu mieszanki,  $d$  – masa pary wodnej zawartej w 1 kg powietrza,  $\eta_v$  – współczynnik napełnienia,  $\rho_0$  – gęstość powietrza na wlocie do silnika,  $\eta_m$  – sprawność mechaniczna silnika.

W przypadku silników z zewnętrznym tworzeniem mieszanki wyrażenie to ma postać:

$$p_e = \frac{H_u}{\alpha l_0 (1+d)+1} \eta_i \eta_v \rho_{ch} \eta_m. \quad (2)$$

Współczynnik napełnienia w tym przypadku jest określany z uwzględnieniem faktu, że do silnika zasysana jest mieszanka powietrzno-gazowa. W równaniu (2)  $\rho_{ch}$  jest gęstością ładunku gazowo-powietrznego w warunkach otoczenia.

W obu przypadkach tworzenia mieszanki palnej równanie może zostać zapisane w postaci (1), jeżeli współczynnik napełnienia jest określany na podstawie wydatku powietrza dolotowego. Może ono być wykorzystane do określenia składu mieszanki niezbędnego do zapewnienia wymaganej wartości średniego ciśnienia użytecznego.

Powody zmniejszenia wartości współczynnika nadmiaru powietrza dla zapewnienia wartości mocy i momentu obrotowego w silniku zasilanym gazem ziemnym takich samych jak w silniku ZS są następujące:

1. Zauważalne zmniejszenie zużycia powietrza; z tego względu współczynnik napełnienia określony na podstawie za-

development has been done in cooperation with Central Scientific Research Institute (NAMI, Moscow). The results of the experiments justified the undertaken development.

In the case of turbocharged engines operation on lean mixture seems to be beneficial to get low nitrogen oxides emission. At lean mixture, the temperature of exhaust gases is rather low and, hence, the oxidation of methane turns out to be a serious problem. Investigations helped to solve the problem by design of a two-stage catalytic converter with palladium catalyst.

There are many unsupercharged diesel engines that are not suitable for emission control. At the same time if conversion of those engines into natural gas engines were properly done it would be possible to not only decrease noise and particle emission, but also ensure considerable improvement in the emission of nitrogen and carbon oxides as well as hydrocarbon emission, methane inclusive.

Let us first consider what kind of difficulties one encounters while converting an unsupercharged diesel engine into a natural gas engine. In the case of central gas supply with the help of gas air mixture device, to get the same power and torque as in the base diesel engine, air fuel ratio is to be decreased. Mean effective pressure of the engine  $p_e$  in the case of engines with internal mixture formation may be given as in eq. (1),

where  $H_u$  – is lower calorific value,  $\lambda_0$  – stoichiometric ratio,  $\eta_i$  – indicated efficiency,  $\lambda$  – relative air fuel ratio,  $d$  – amount of water vapor mass contained in one kg of air,  $\eta_v$  – volumetric efficiency,  $\rho_0$  – density of air at engine inlet,  $\eta_m$  – mechanical efficiency of engine.

In the case of engines with external air fuel mixture formation mode the equation (2) can be applied.

Here the volumetric efficiency is being determined taking into account the fact that air – gas mixture is sucked into engine. In this equation,  $\rho_{ch}$  is density of air gas charge at in the ambient conditions.

For both modes of the air fuel mixing, the equation may be written in the form (1), if the volumetric efficiency is determined on the basis of air supply. The equations may be used to assess the necessary mixture strength change to preserve the value of mean effective pressure.

The reasons for the air fuel ratio decrease to keep the power and torque of a natural gas engine the same for the base diesel engine are as follows:

1. Considerable decrease of air supply and, hence, air determined volumetric efficiency owing to high partial volume of natural gas;
2. Decrease of indicated efficiency as a result of lower compression ratio and lower air fuel ratio;
3. Increase of inlet duct resistance due to the application of a diffuser.

The distributed gas injection into the manifold ducts instead of central gas supply may help in the increase in relative air fuel ratio. However, numerical analysis with the help of computer model revealed that this increase is insufficient to get very low nitrogen oxides emission, as the adoptable value of relative air fuel ratio to ensure a considerable de-

- wartości powietrza zawiera dużą objętość cząstkową gazu ziemnego;
2. Zmniejszenie sprawności indykowanej jako wynik mniejszego stopnia sprężania i mniejszego współczynnika nadmiaru powietrza;
  3. Zwiększenie oporów dolotu w wyniku zastosowanie dyfuzora.

Wtrysk gazu do poszczególnych przewodów dolotowych, w przeciwieństwie do doprowadzania gazu do kolektora zbiorczego, może pomagać w zwiększeniu współczynnika nadmiaru powietrza. Jednakże analiza numeryczna wykorzystująca model komputerowy pozwoliła stwierdzić, że ten wzrost jest niewystarczający do uzyskania bardzo małej emisji tlenków azotu, a bieżąca wartość współczynnika nadmiaru powietrza dla zapewnienia istotnego obniżenia tlenków azotu wynosi ok. 1,5–1,55. Zdecydowanym rozwiązaniem może być użycie wewnętrznego tworzenia mieszanki gazowo-powietrznej, lecz wymaga to zmiany odlewu głowicy cylindrowej, co nie jest uzasadnione we wszystkich przypadkach. W przypadku niektórych składów mieszanki, wartość opałowa mieszanki może być nieznacznie niższa, niż w przypadku zasilania olejem napędowym.

Jak wykazują nasze badania utrzymanie mocy i momentu obrotowego wyjściowego silnika ZS wymaga zmniejszenia współczynnika nadmiaru powietrza z wartości 1,55–1,6 do wartości 1,1–1,2 w silniku zasilanym gazem ziemnym. Przy takiej wartości  $\lambda$ , w przypadku mieszanki jednorodnej, stężenie tlenków azotu w spalinach jest bardzo duże. Chłodzona recyrkulacja spalin okazała się niezbyt skuteczna. Przy pełnym obciążeniu recyrkulacja 4,1–4,5% spalin odniesiona do masy świeżego ładunku powoduje zmniejszenie stężenia tlenków azotu o ok. 15–30% (przy różnej prędkości obrotowej silnika). Jednakże wówczas zauważalne było zmniejszenie mocy silnika o 4–11%.

Przebadano również doprowadzenie rozpylonej wody do mieszanki gazowo-powietrznej w przewodzie dolotowym. Ilość wtryskiwanej wody wynosiła 5% masy świeżego ładunku. Takie postępowanie była bardzo skuteczne i pozwoliło obniżyć stężenie tlenków azotu 2,5–3,9 razy przy różnych prędkościach obrotowych silnika. Jednakże równocześnie moc silnika zmniejszyła się o 7–8%. Zmniejszenie mocy można wyjaśnić częściowym parowaniem wody w przewodzie dolotowym, zwiększeniem pojemności cieplnej ładunku doprowadzanego do cylindra i odparowaniem wody w czasie spalania mieszanki powietrzno-gazowej. Biorąc pod uwagę konieczność posiadania zbiornika wody w samochodzie lub autobusie, ten sposób obniżania emisji tlenków azotu nie może być zaakceptowany w rosyjskich warunkach klimatycznych.

Z tego względu postanowiono postąpić w następujący sposób. Skonstruowano system zasilania gazem i jego sterowania w taki sposób, aby uzyskać mieszankę stechiometryczną przy dużym obciążeniu silnika i przy biegu jałowym, zastosować trójfunkcyjny reaktor katalityczny i przełączać tryb pracy na mieszankę ubogą na obciążeniach częściowych ( $\lambda = 1,5–1,55$ ). Zastosowanie ubogich mieszanek na obciążeniach częściowych może jednocześnie obniżyć emisję tlen-

crease of nitrogen oxides is around 1.5–1.55. A radical solution may be the use of internal air gas mixing but this requires a change cylinder head casting which is not economically justified in all cases. In the case of some natural gas compositions, the calorific value of gas air mixture may be slightly lower than in the case of diesel fuel.

As our experiments show, to preserve power and torque of the base diesel engine, the relative air fuel ratio should be decreased from 1.55–1.6 in diesel version to 1.1–1.2 for the natural gas modification. At this value of the relative air fuel ratio in the case of homogeneous mixture concentration of nitrogen oxides in the exhaust gases is quite high. Cooled exhaust gas recirculation turned out not to be very effective. At full load, the recirculation of 4.1–4.5 percent of cooled exhaust gases related to the fresh charge (on mass bases) decreased the concentration of nitrogen oxides by 15–30% (at different engine speeds). However, the decrease of engine power was quite considerable – 4–11%.

The atomized water supply to air-gas mixture in the inlet manifold has been tried as well. The amount of water injected was 5% of the fresh charge mass. This way was very efficient as the concentration of  $\text{NO}_x$  decreased by 2.5–3.9 times at different engine speeds. However the engine power decreased by 7–8% at the same time. The decrease of engine power may be explained by partial evaporation of water in the inlet manifold, by the increase of in-cylinder charge heat capacity and by the evaporation of water during air-gas mixture combustion. Taking into account the necessity to keep water tank aboard of automobiles (or buses) at the climatic conditions of Russia, this way to get low nitrogen oxides emission cannot be approved.

Hence it was decided to try the following way. To design gas supply and gas supply control systems in such a way as to obtain stoichiometric charge at high engine loads and idle conditions, to use three way catalyst, and to switch to lean mixtures at part loads ( $\lambda = 1.5–1.55$ ). The application of lean mixtures at part loads may at the same time decrease nitrogen oxides and improve bus or truck efficiency in big towns operating conditions.

One of the more difficult tasks to be solved was the development of a three-way catalyst, that could efficiently decrease the amount of methane in the exhaust gases. Several catalysts have been tried.

### 3. Results obtained for palladium catalyst

Experiments were carried out on the KAMAZ engine (power output 145 kW, rated speed 2200 rpm, 8 cylinders V-type, bore and stroke in mm 120 x 120). In Table 1 the results of the experiments are shown demonstrating the efficiency of palladium catalyst in terms of HC, methane inclusive emissions, at part loads and lean mixtures.

In Table 1 the second set of values of gas concentration are measured for the right block has been presented. We may see that the catalyst is quite efficient as regards the decrease of CO and HC content. The concentration of  $\text{NO}_x$  is low as a result of the lean homogeneous mixture combustion.

ków azotu i poprawić sprawność samochodów ciężarowych i autobusów w warunkach ruchu w dużych aglomeracjach miejskich.

Jednym z najtrudniejszych zadań, które należało rozwiązać było opracowanie trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego, który mógłby wydawnie zmniejszyć zawartość metanu w spalinach. Przebadano wiele różnych reaktorów katalitycznych.

### 3. Wyniki badań palladowego reaktora katalitycznego

Badania przeprowadzono na silniku KAMAZ (moc 145 kW, znamionowa prędkość obrotowa 2000 obr/min, 8 cylindrów w układzie V, średnica i skok (w mm) – 120 x 120. W tablicy 1 pokazano wyniki badań wskazujące na sprawność palladowego reaktora katalitycznego w odniesieniu do emisji węglowodorów (w tym metanu), na obciążeniach częściowych i na biegu jałowym.

In Table 2 the results of the experiments are shown, demonstrating the efficiency of palladium catalyst in terms of  $\text{NO}_x$  decrease in the block of the V-type engine which most probably gets the proper air-fuel mixture strength. One should keep in mind that the interval of mixture strengths at which the catalysts operate effectively is very narrow in the case of natural gas.

The conclusions made from these experiments are as follows

1. Mixture strength may be considerably different for each of the blocks of a V-type engine.
2. It seems that palladium catalyst is more universal as regards the decrease in component concentrations other than platinum.

In Table 3 the results of experiments at minimum idle speed are given (for 750 rpm).

It is clear from the Table 3 that to obtain temperature of exhaust gases sufficiently high to effectively decrease  $\text{CH}_x$

Tablica 1. Wyniki badań wskazujące na skuteczność palladowego reaktora katalitycznego w zakresie emisji węglowodorów

Table 1. The results of the experiments, demonstrating the efficiency of palladium catalyst in terms of HC emissions

n [obr/min] / [rpm]	Zużycie gazu / Gas consump- tion [kg/h]	Zużycie powietrza / Air consump- tion [kg/h]	Współ- czynnik nadmiaru powietrza / Relative air fuel ratio	Moment obr. / Torque [Nm]	Temperatura na wlocie do reaktora / Temperature at catalyst inlet [°C]	Zawartość składników toksycznych na wlocie do reaktora / Content of exhaust gas components in ppm at the inlet of catalyst	Zawartość składników toksycznych na wlocie z reaktora / Content of exhaust gas components in ppm at outlet of catalyst
1400	12,45	318,56	1,497	348	420	CO - 800 HC - 5400-4800 $\text{NO}_x$ - 380-410	CO - 50 HC - 640 $\text{NO}_x$ - 410
	6,25	160,58	1,507	68	430-440	CO - 820-780 HC - 3900-4200 $\text{NO}_x$ - 38-40	CO - 50 HC - 225-300 $\text{NO}_x$ - 50-60

W tablicy 1 przedstawione zostały wartości koncentracji składników toksycznych zmierzone dla prawego rzędu cylindrów. Można zauważyć, że reaktor katalityczny wykazuje dużą skuteczność w odniesieniu do obniżenia zawartości CO i HC w spalinach. Zawartość  $\text{NO}_x$  jest mała ze względu na spalanie mieszanki ubogiej.

W tablicy 2 pokazane są wyniki badań sprawności palladowego reaktora katalitycznego w odniesieniu do obniżenia

it is necessary to retard the ignition considerably. It also seems that even at temperatures at the inlet of the catalyst that amount to 450°C, the platinum catalyst is ineffective in terms of hydrocarbons (methane) oxidation. It is also evident that both the catalysts are effective as regards the decrease in CO concentration. Taking into account all the experiments, it seems that palladium catalyst is preferable. Retarding the ignition is not a good solution. It is getting the temperature

Tablica 2. Wyniki badań wskazujące na skuteczność palladowego reaktora katalitycznego w odniesieniu do emisji  $\text{NO}_x$

Table 2. Results of experiments, demonstrating the efficiency of palladium catalyst in terms of  $\text{NO}_x$  emission

Mo [N·m]	Współczynnik nadmiaru powietrza / Relative air fuel ratio	CO, lewy dolot / left inlet	Kolektor wylotowy / block outlet	CO, prawy dolot / right inlet	Kolektor wylotowy / block outlet	HC, lewy dolot / left inlet	Kolektor wylotowy / block outlet
690	1,03-1,05	1800	80	4400	1650	1620	75
720	0,95-1,01	2700	100	1310	420	1500	990
Mo [N·m]	Współczynnik nadmiaru powietrza / Relative air fuel ratio	HC, prawy dolot / right inlet	Kolektor wylotowy / block outlet	$\text{NO}_x$ , lewy dolot / left inlet	Kolektor wylotowy / block outlet	$\text{NO}_x$ , prawy dolot / right inlet	Kolektor wylotowy / block outlet
690	1,03-1,05	1680	210	1850	1500	1800	90
720	0,95-1,01	1500	75	1700	250	2500	1500

emisji NO<sub>x</sub> dla rzędu cylindrów silnika typu V, w którym prawdopodobnie mieszanka miała właściwy skład. Należy pamiętać, że dla gazu ziemnego zakres zmienności składu mieszanki, w którym reaktor pracuje skutecznie jest bardzo wąski.

of the exhaust gases, necessary for methane oxidizing by the use of stoichiometric mixture at idle conditions that seems appropriate. The final decision, however, will depend on the fuel consumption resulting in both the cases.

Tablica 3. Wyniki badań przy prędkości obrotowej biegu jałowego  
 Table 3. Results of experiments at minimum idle speed

Lp.	Kąt zapłonu $\phi_{ign}$ , [°OWK] przed GMP / degrees before TDC [CA]	Reaktor katalityczny / Catalyst		Stężenie składników toksycznych / Concentration of components [ppm]			$\lambda$	Temperatura spalin / exhaust temp. $t_{exh}$ [°C]
		Rząd cyl. / Block	Punkt pomiaru / Point of measurement	CO	HC	NO <sub>x</sub>		
1	0	Lewy / left (Pt)	dolot / inlet	500	194	17	1,46	295
			wylot / outlet	100	-	25		200
		Prawy / right (Pd)	dolot / inlet	500	1440	39	1,53	285
			wylot / outlet	10	1440	63		200
2	0	Lewy / left (Pt)	dolot / inlet	600	940	6	1,48	310
			wylot / outlet	0	-	12		190
		Prawy / right (Pd)	dolot / inlet	500	720	10	1,45	310
			wylot / outlet	10	550	24		190
3	-5	Lewy / left (Pt)	dolot / inlet	600	940	8	1,5	360
			wylot / outlet	10	680	19		190
		Prawy / right (Pd)	dolot / inlet	400	440	9	1,52	370
			wylot / outlet	10	400	26		190
4	-7,5	Lewy / left (Pt)	dolot / inlet	500	820	9	1,59	450
			wylot / outlet	10	570	15		195
		Prawy / right (Pd)	dolot / inlet	400	540	10	1,6	460
			wylot / outlet	10	10	16		200

Wnioski wynikające z tych badań są następujące:

1. Skład mieszanki może być istotnie różny w obu rzędach cylindrów silnika typu V;
2. Wydaje się, że palladowy reaktor katalityczny jest bardziej uniwersalny w odniesieniu do zmniejszenia emisji składników toksycznych spalin niż reaktor z pokryciem platynowym.

W tablicy 3 podano wyniki badań przy prędkości obrotowej biegu jałowego (750 obr/min).

Z tablicy 3 wynika, że dla uzyskania temperatury spalin wystarczająco wysokiej do skutecznej redukcji CH<sub>2</sub> konieczne jest odpowiednie opóźnienie zapłonu. To oznacza także, że nawet przy temperaturze na wlocie do reaktora wyno-

Tablica 4. Wyniki badań w warunkach stacjonarnego testu 13-fazowego

Table 4. The results of the experiments at steady 13-step cycle operating conditions

Rodzaj silnika / Engine type	Emisja / Emission [g/(kW·h)]		
	CO	HC	NO <sub>x</sub>
Silnik z regulowanym turbodoładowaniem i jednym reaktorem katalitycznym / Engine with controlled turbocharging and one catalytic converter	0,584	17,06	2,06
Silnik z regulowanym turbodoładowaniem i dwoma reaktorami katalitycznymi / Engine with controlled turbocharging and two catalytic converters	0,5	1,00	1,7

szącej 450°C reaktor platynowy jest nieskuteczny w utlenianiu węglowodorów (metanu). Jest także wyraźne, że oba reaktory katalityczne są skuteczne w zakresie redukcji stężenia CO. Biorąc pod uwagę wszystkie badania wydaje się, że reaktor palladowy jest skuteczniejszy. Opóźnianie zapłonu nie jest dobrym rozwiązaniem. Występuje wówczas wzrost temperatury spalin konieczny do utleniania metanu przy spalaniu mieszanki stechiometrycznej w warunkach biegu jałowego. Ostateczna decyzja zależy jednak od zużycia paliwa występującego w obu tych przypadkach.

#### 4. Koncepcja systemu sterowania układem zasilania gazem

Rysunek 1 przedstawia schemat systemu zasilania gazem opracowanego dla potrzeb stabilizacji wartości współczynnika nadmiaru powietrza w niektórych warunkach pracy silnika zbliżonych do warunków stechiometrycznych.

Zawór 22 pozostaje zamknięty przy wszystkich warunkach pracy z wyjątkiem biegu jałowego. Przepustnice 16 są sterowane ręcznie dla uzyskania mieszanki stechiometrycznej w obu rzędach cylindrów na dużym obciążeniu. Napędzany elektromagnetycznie zawór 26 utrzymuje wymagany skład mieszanki w obu rzędach cylindrów poprzez dodatkowe zasilanie gazem przez zawór 9, który otwiera się elektronicznie przy głównym położeniu przepustnicy 7 bliskim pełnemu otwarciu. Przy częściowych otwarciach przepustnicy 7 zawór 9 pozostaje zamknięty, a uboga mieszanka jest uzyskiwana w wyniku ręcznego sterowania przepustnicy 14. Ręcznie sterowane iglice 24 służą do stabilizacji zasilania gazem w warunkach bliskich stechiometrycznym na biegu jałowym w obu rzędach cylindrów.

Silniki autobusów miejskich pracują na obciążeniach częściowych w różnych warunkach. Rozwój wspomnianych powyżej silników zasilanych gazem ziemnym zapewnia zasilanie stechiometryczną mieszanką powietrzno-gazową w warunkach pełnego obciążenia i wykorzystanie mieszanki ubogiej na obciążeniach częściowych.

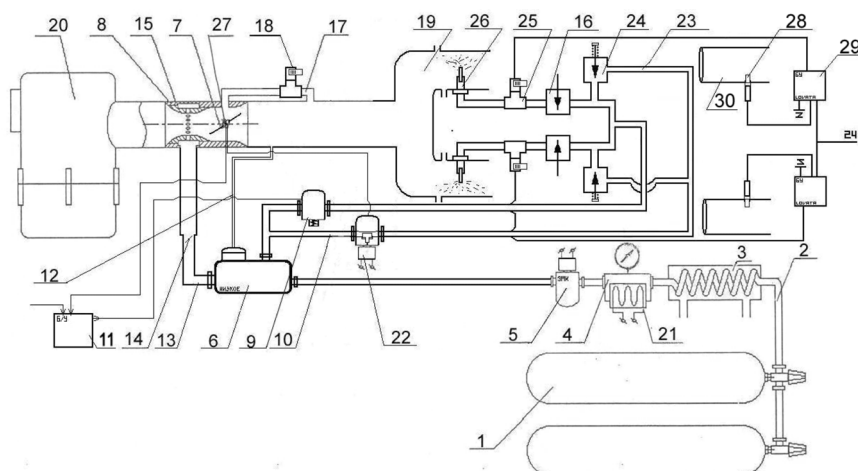
#### 5. Rozwój turbodoładowanych wersji silników na gaz ziemny

Oprócz dobrze znanych zalet silników turbodoładowanych, silniki zasilane gazem ziemnym mają jeszcze jedną zaletę – praca silnika na ubogich mieszankach jednorodnych powoduje bardzo małą emisję tlenków azotu.

W przypadku silników zasilanych gazem ziemnym konstruowanych do dużych autobusów miejskich i samochodów ciężarowych, aby uzyskać duży moment obrotowy na-

#### 4. Conception of gas supply system control

Fig. 1 presents a schematic of a gas supply system developed to establish and stabilize the air fuel ratio in some operating conditions close to stoichiometry.



Rys. 1. Elektroniczny system sterowania układu zasilania gazem: 1–zbiorniki gazu, 2–przewód wysokiego ciśnienia gazu, 3–podgrzewacz gazu, 4–reduktor wysokiego ciśnienia, 5–elektromagnetyczny zawór filtra, 6–dwustopniowy reduktor niskiego ciśnienia, 7–przepustnica, 8–mieszalnik gazowo-powietrzny, 9–zawór dodatkowego zasilania gazem, 10–przewód gazu biegu jałowego, 11–elektroniczny moduł sterowania, 12–przewód podciśnieniowy, 13–główny przewód zasilający, 14–główna przepustnica gazu, 15–dyfuzor, 16–ręcznie sterowana przepustnica, 17–przewód obejściowy, 18–zawór obejściowy, 19–przewód dolotowy, 20–filtr powietrza, 21–ogrzewacz elektryczny, 22–zawór elektromagnetyczny, 23–przewód zasilania gazem na biegu jałowym, 24–iglica regulacji gazu na biegu jałowym, 25–zawór regulacyjny napędzany silnikiem krokowym, 26–wtryskiwacz gazu, 27–czujnik położenia przepustnicy, 28–czujnik zawartości tlenu, 29–elektroniczny moduł sterujący, 30–przewód wylotowy silnika

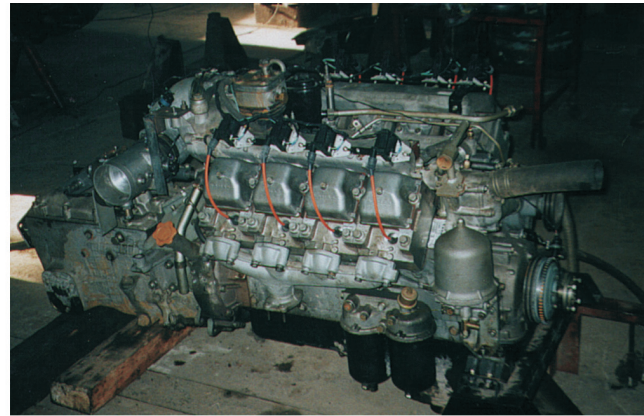
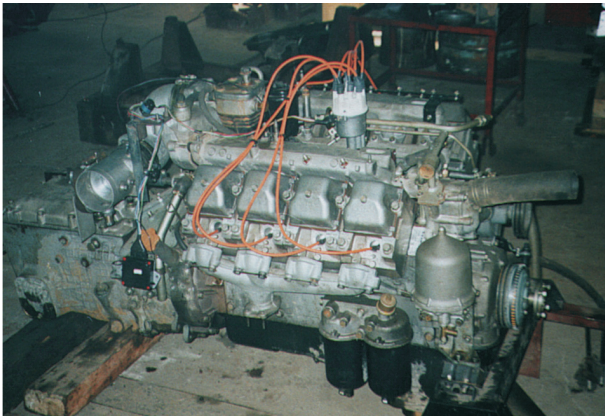
Fig. 1. Electronic gas supply control system: 1–gas vessels, 2–high pressure gas line, 3–gas heater, 4–high pressure reducer, 5–electromagnetic valve-filter, 6–two stage low pressure reducer, 7–throttle, 8–air-gas mixer, 9–valve for additional gas supply, 10–idle gas supply duct, 11–electronic control unit, 12–vacuum duct, 13–main channel, 14–main gas throttle, 15–diffuser, 16–hand operated throttle, 17–by-pass channel, 18–by-pass valve, 19–inlet manifold, 20–air filter, 21–electric heater, 22–electromagnetic valve, 23–channel for gas supply at idle, 24–needle to adjust idle gas supply, 25–control valve with stepper motor drive, 26–gas nozzle, 27–throttle position sensor, 28–oxygen content pick-up, 29–electronic control unit, 30–exhaust manifold

Valve 22 is closed at all operating conditions except idle conditions. Throttles 16 are controlled manually to get close to stoichiometric mixture strength in both blocks at high loads. Valve 26 with electromagnetic drive keeps the necessary mixture strength in both blocks getting additional gas supply through valve 9 which opens electronically at the main throttle position 7 close to full opening. At partial opening of the throttle 7 valve 9 is closed and lean mixture is obtained by hand control of the throttle 14. Hand operated needles 24 are included to establish gas supply close to stoichiometric to both blocks at idle conditions.

City bus engines operate at part loads in a variety of conditions. The development of the above mentioned natural gas engines ensures stoichiometric air-gas mixtures at full load conditions and the use of lean mixture strengths at part loads.

#### 5. The development of turbocharged versions of natural gas engines

In addition to the well-known advantages of turbocharged diesels, natural gas engines have one more advantage – en-



Rys. 2. Widok silnika badawczego

Fig. 2. The view of the test engine

leży stosować regulowane turbodoładowanie. Zdolność do zapewnienia dużego momentu obrotowego poprzez zmianę współczynnika nadmiaru powietrza nie może być wykorzystana w silnikach zasilanych gazem w taki sposób, jak to ma miejsce w silnikach ZS. Dla uzyskania małej emisji tlenków azotu silnik zasilany gazem ziemnym powinien pracować raczej w wąskim zakresie zmienności współczynnika nadmiaru powietrza (1,4–1,65), podczas gdy w silnikach ZS można wykorzystywać znacznie szerszy przedział ok. 1,6–2,4.

Na rysunku 3 przedstawiono schemat silnika zasilanego gazem ziemnym wyposażonego w regulowane turbodoładowanie i pojedynczy reaktor katalityczny dla każdego rzędu cylindrów silnika typu V, skonstruowanego w oparciu o turbodoładowany silnik ZS firmy KAMAZ.

W tym przypadku użyto dwustopniowego reduktora ciśnienia gazu. Gaz ziemny jest wtryskiwany do przewodu

engine operation on lean homogenous mixtures results in very low nitrogen oxides emission.

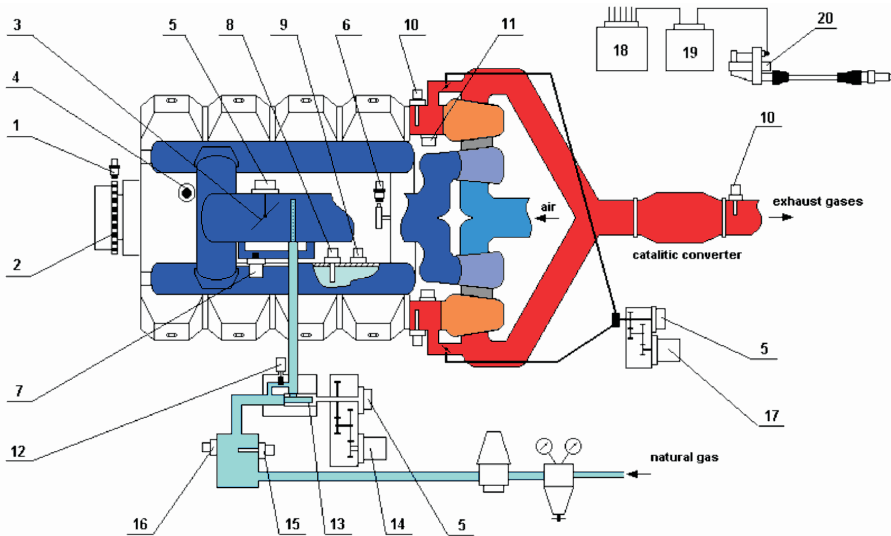
In the case of natural gas engines designed for big city buses and trucks to get high torque one should use controlled turbocharging. The ability to ensure high torque by the change of relative air fuel ratio cannot be utilized in natural gas engines in the way it may be used in diesels. In order to get low nitrogen oxides emission, natural gas engine should operate with a rather short air fuel ratio interval (1.4–1.65), whereas in diesels one may use much longer intervals, say 1.6–2.4.

Fig. 3 presents a drawing of natural gas engine with controlled turbocharging and a single catalytic converter for each engine block of a V-type engine, designed on the basis of a turbocharged “KAMAZ” diesel.

In this case, a two-stage gas pressure reducer is used. Natural gas is injected into the inlet manifold through a controlled profiled valve and nozzles. Catalytic converter is located at a distance equal to 1.5 m. from the exhaust outlet. Table 4 presents the results of the experiments at steady 13-step cycle operating conditions.

Unfortunately, our university has no test bed for transient cycle experiments. It may be seen from the table 4 that the requirements are met as regards carbon oxide and nitrogen oxides emissions of Euro 5. However, the emission of hydrocarbons is very high.

Fig. 4 shows a drawing of second natural gas engine with controlled turbocharging and two catalytic converters for each block of the same V-type engine. In this case 3-stage gas pressure reducer is used. Gas pressure is reduced down to atmospheric.



Rys. 3. Schemat silnika: 1 – cewka zapłonowa, 2 – specjalna tarcza, 3 – tarcza synchronizacji, 4 – czujnik prędkości obrotowej, 5 – czujnik synchronizacji, 6 – czujnik położenia przepustnicy, 7 – elektromagnetyczny zawór rozruchowy, 8 – zawór sterujący przewodu obejściowego dla biegu jałowego, 9 – czujnik temperatury cieczy chłodzącej, 10 – elektromagnetyczny zawór biegu jałowego, 11,12,13 – termopary, 14 – przepustnica

Fig. 3. Sketch of engine: 1 – induction coil, 2 – special disc, 3 – synchronizing disc, 4 – rpm sensor, 5 – synchronization sensor, 6 – throttle position sensor, 7 – starting valve with electromagnetic drive, 8 – controlled valve for idle by-pass line operation, 9 – coolant temperature sensor, 10 – idle valve with electromagnetic drive, 11,12,13 – thermocouples, 14 – throttle

Tablica 4. Wyniki badań w warunkach stacjonarnego testu 13-fazowego  
 Table 4. The results of the experiments at steady 13-step cycle operating conditions

Rodzaj silnika / Engine type	Emisja / Emission [g/(kW·h)]		
	CO	HC	NO <sub>x</sub>
Silnik z regulowanym turbodoładowaniem i jednym reaktorem katalitycznym / Engine with controlled turbocharging and one catalytic converter	0,584	17,06	2,06
Silnik z regulowanym turbodoładowaniem i dwoma reaktorami katalitycznymi / Engine with controlled turbocharging and two catalytic converters	0,5	1,00	1,7

dotowego przez profilowany zawór i wtryskiwacz. Reaktor katalityczny jest umieszczony w odległości 1,5 m od wylotu spalin. W tabelicy 4 przedstawiono wyniki badań w warunkach stacjonarnego testu 13-fazowego.

Niestety, nasza uczelnia nie dysponuje stanowiskiem do badań w stanach nieustalonych. Na podstawie danych z tabelicy 4 można zauważyć, że w odniesieniu do emisji tlenu węgla i tlenków azotu spełnione są wymagania normy Euro 5. Jednakże emisja węglowodorów jest bardzo duża.

Na rysunku 4 pokazano drugi silnik zasilany gazem ziemnym wyposażony w regulowane turbodoładowanie i dwa reaktory katalityczne, po jednym na każdy rząd cylindrów silnika typu V. W tym przypadku zastosowano reduktor ciśnienia gazu. Ciśnienie gazu jest redukowane do ciśnienia otoczenia.

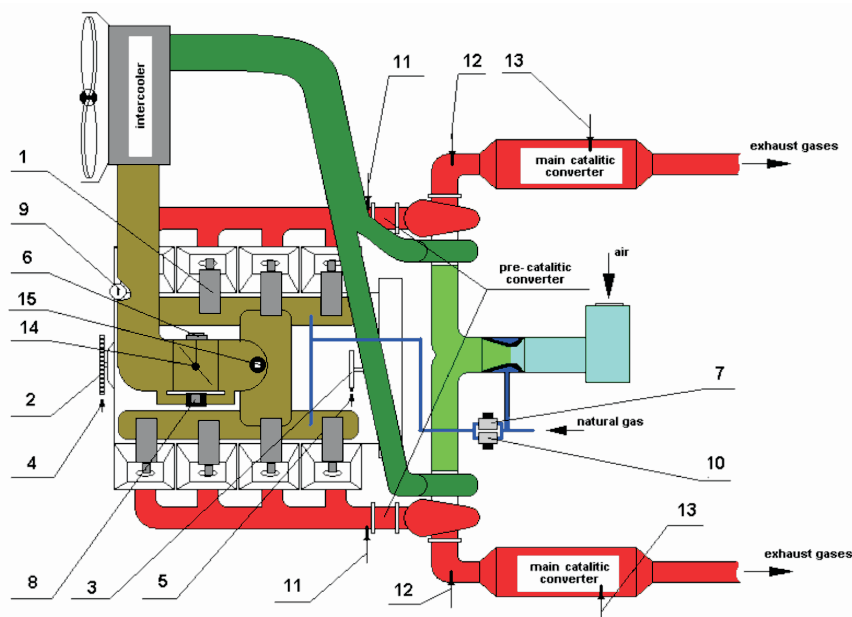
Gaz ziemny jest dostarczany do konwencjonalnego mieszalnika gazowo-powietrznego pomiędzy filtrem powietrza a sprężarką. Przepustnica jest umieszczona za chłodnicą powietrza doładowanego. Reaktory katalityczne niewielkich wymiarów są umieszczone na wlocie spalin do turbin, a główny reaktor w odległości 2 m od wylotu z turbin. Badania wykazały, że reaktory platynowe są znacznie mniej skuteczne w odniesieniu do utleniania metanu niż reaktory palladowe. Okazuje się także, że stężenie toksycznych składników spalin nie zmienia się w reaktorach wstępnych, ale sprawność konwersji reaktorów głównych wzrasta znacznie ze względu na użycie małych reaktorów umieszczonych w pobliżu wylotu spalin, gdzie temperatura spalin jest wysoka. Można przypuszczać, że w reaktorach wstępnych rozpoczynają się niektó-

Natural gas is supplied into conventional gas-air mixer located between the air cleaner and the compressors. Throttle is placed after the inter-cooler. Small size catalytic converters are placed at the inlet of the turbines and main converters at a distance of 2 m from the outlet of the turbines. The experiments revealed that platinum catalysts are much less efficient regarding methane oxidation than palladium catalysts. It also turned out, that the concentrations of the emission components do not change in the pre-converters, but the efficiency of the main converters increase greatly due to the use of small converters located near the exhaust outlet where the gas temperature is high. It may be assumed that in the pre-

converters some preliminary reactions start which help in further oxidation of methane. In comparison to the previous results the content of hydrocarbons decreased by 17 times.

The decrease is still insufficient to meet the requirements of the Euro 3 regulations. New converters of greater volume and with higher palladium concentration are to be designed to meet the Euro 5 demands.

In the experiments with both engines we noticed, that nitrogen oxides concentration is increased in the catalytic converters and the increase is greater in the case of higher hydrocarbons content. The increase is not very harmful and,



Rys. 4. Schemat silnika: 1 – czujnik prędkości obrotowej, 2 – specjalna tarcza, 3 – przepustnica, 4 – czujnik temperatury cieczy chłodzącej, 5 – czujnik położenia, 6 – czujnik kąta OWK, 7 – zawór upustowy, 8 – czujnik temperatury mieszanki na dolocie, 9 – czujnik ciśnienia na dolocie, 10 – termopara, 11 – czujnik temperatury spalin na wlocie do turbiny, 12 – zawór biegu jałowego, 13 – główny zawór sterowania gazem, 14 – silnik krokowy zaworu sterowania gazem, 15 – czujnik temperatury gazu, 16 – czujnik ciśnienia gazu, 17 – silnik krokowy zaworu upustu spalin, 18 – moduł sterujący, 19 – moduł cewki zapłonowej, 20 – cewka zapłonowa

Fig. 4. A drawing of the engine: 1 – rpm sensor, 2 – special disc, 3 – throttle, 4 – coolant temperature sensor, 5 – location sensor, 6 – faze sensor, 7 – by-pass valve, 8 – inlet mixture temperature sensor, 9 – inlet pressure sensor, 10 – thermocouple, 11 – turbine inlet gas temperature sensor, 12 – idle operation valve, 13 – main gas control valve, 14 – stepper motor of gas control valve, 15 – gas temperature sensor, 16 – gas pressure sensor, 17 – exhaust gas by-pass valve stepper motors, 18 – control unit, 19 – ignition control module, 20 – ignition coil



re reakcje wstępne, które następnie ułatwiają utlenianie metanu. W porównaniu do poprzednich wyników zawartość węglowodorów zmniejszyła się 17-krotnie. Ten spadek jest jeszcze niewystarczający do spełnienia wymagań normy Euro 3. Dla spełnienia wymagań normy Euro 5 muszą zostać opracowane nowe reaktory katalityczne o większej objętości i z większym stężeniem palladu.

Podczas badań obu silników stwierdzono, że stężenie tlenków azotu zwiększa się w reaktorach katalitycznych, a wzrost ten jest większy w przypadku większej zawartości węglowodorów w spalinach. Wzrost ten nie jest jednak znaczny, a normy Euro 5 zostały spełnione. Powyższy wniosek wymaga dalszych obserwacji i badań.

## 6. Podsumowanie

W przypadku niedoładowanych silników typu V z centralnym układem zasilania gazem, zmniejszenie emisji okazuje się trudnym problemem. Dla pokonania tych trudności opracowano i przebadano oryginalny system zasilania gazem zapewniający dokładne sterowanie składem mieszanki gazowo-powietrznej w obu rzędach cylindrów. Osiągnięto spełnienie norm Euro 3.

W przypadku stosowania rosyjskiego gazu ziemnego o dużej zawartości metanu jest możliwa praca silnika bez spalania stukowego mimo dużych wartościach stopnia sprężania. To, w połączeniu z pracą silnika na mieszanekach ubogich i na obciążeniach częściowych, zapewnia raczej nieznaczne zużycie energii cieplnej w warunkach użytkowania autobusu.

W przypadku silników turbodoładowanych mała emisja tlenków azotu jest uzyskiwana poprzez pracę na mieszanekach ubogich (współczynnik nadmiaru powietrza w zakresie 1,45–1,65). Problem małej emisji metanu może zostać rozwiązany przez odpowiedni dobór reaktorów katalitycznych.

hence, the Euro 5 regulations are met. The above conclusion needs further observation for future investigations.

## 6. Conclusions

In the case of the unsupercharged V-type engines with a central gas supply system, the decrease of emission turns out to be a rather difficult problem.

To overcome these difficulties, an original gas supply system, ensuring precise control of air gas mixture strength at both engine blocks has been developed and is the test stage. The Euro 3 regulations are met.

In the case of Russian natural gas with stable high content of methane it is possible to work without detonation at high compression ratios. This, combined with lean mixture operation at part loads, ensures a rather low heat consumption in bus operation.

In the case of turbocharged engines, low nitrogen oxides emission is obtained by lean mixture engine operation (relative air-fuel ratio in the range 1.45–1.65). The problem of methane low emission may be solved by appropriate choice of catalytic converters.

Artykuł recenzowany

\* Prof. A.S. Khatchiyani – Moskiewski Państwowy Instytut Konstrukcji Samochodów i Dróg, Politechnika Moskiewska. Moskwa, Rosja.

Mr A.S. Khatchiyani, DSc, MEng – Moscow State Automobile Maintenance and Highway Constr. Technical University, Moscow, Russia.



Inż. V.E. Kuznetsov – Moskiewski Państwowy Instytut Konstrukcji Samochodów i Dróg, Politechnika Moskiewska. Moskwa, Rosja.

Mr V.E. Kuznetsov, MEng – Moscow State Automobile Maintenance and Highway Constr. Technical University, Moscow, Russia.



Inż. I.G. Shishlov – Moskiewski Państwowy Instytut Konstrukcji Samochodów i Dróg, Politechnika Moskiewska. Moskwa, Rosja.

Mr I.G. Shishlov, MEng – Moscow State Automobile Maintenance and Highway Constr. Technical University, Moscow, Russia.



## Literatura / Bibliography

- [1] De Keukeleere D. et al: Technisch-Wetenschappelijke Begeleiding van de 20 MIVB aadgasbussen. Report study for the Brussels Capital Region, 1995.
- [2] De Keukeleere D.: Opvolging energie en milieuaspecten van MIVB bussen met alternatieve brandstoffen i.v.m. verouderingsverschijnselen. Report study for the Brussels Capital Region, 1996.
- [3] Craps R. et al: New energy-saving and environmentally friendly technologies for buses and tracks. Proceedings workshop in Brussels on 29 April 1998.
- [4] Pelkmans L. et al: Real Impact of New Technologies for Heavy Duty Vehicles. Final Report IEA-AMF Study (Annex XVII), 2000.