

Józef PRZYBYLSKI

Marek DYKIER

PERSPEKTYWY STOSOWANIA PALIW GAZOWYCH W TRANSPORCIE SAMOCHODOWYM

Streszczenie. W artykule omówiono cechy charakterystyczne mieszaniny propanu i butanu oraz gazu ziemnego, paliw gazowych najczęściej spotykanych do zasilania silników spalinowych pojazdów samochodowych. Podano głównie sposoby zasilania silników paliwami gazowymi. Omówiono dotychczasowe doświadczenia w zakresie stosowania paliw gazowych, szczególnie w autobusach miejskich.

1. Wstęp

Stosowanie paliw gazowych do zasilania silników pojazdów samochodowych jest znane od wielu lat, również w naszym kraju. W okresie powojennym, w latach 1951-1957 gaz ziemny był stosowany głównie na Śląsku, a także w województwach warszawskim i krakowskim jako paliwo zastępcze, szczególnie do zasilania samochodów ciężarowych Star 20.

Obecnie w wielu krajach świata obserwuje się prawdziwy renesans paliw gazowych w zastosowaniu do transportu samochodowego. Paliwa gazowe są stosowane szczególnie szeroko w Belgii, Holandii, Danii, we Włoszech, w Republice Federalnej Niemiec, a ponadto w Nowej Zelandii, Japonii, Stanach Zjednoczonych. Również w Związku Radzieckim paliwa gazowe są już dość szeroko rozpowszechnione. Planuje się, że w 1990 roku paliwo to znajdzie zastosowanie do zasilania miliona pojazdów. We Włoszech już w 1979 roku eksploatowano ponad 500 tysięcy samochodów, używając paliw gazowych, głównie gazu skroplonego. W tym było około 90% samochodów osobowych. W sumie szacuje się, że aktualnie na świecie paliwa gazowe stosuje się do napędu ponad 2,5 miliona pojazdów samochodowych, przy czym istnieje tendencja wzrostu tej liczby.

2. Charakterystyka paliw gazowych najczęściej stosowanych w transporcie samochodowym

Do zasilania silników spalinowych pojazdów samochodowych można stosować szereg paliw gazowych o różnych własnościach fizycznych i chemicznych. Jednakże, w większości przypadków stosowane są:

- mieszaniny propanu i butanu,
- gaz ziemny.

Gazy te przechowuje się jako skroplone lub sprężone.

Mieszaninę propanu i butanu o temperaturze otoczenia można przechowywać w stanie ciekłym pod stosunkowo niskim ciśnieniem od 0,2 do 1,0 MPa. Paliwo to charakteryzuje się znaczną odpornością na spalanie stukowe, umożliwiającą stosowanie w silniku o zapłonie iskrowym wysokich stopni sprężania. Liczba oktanowa wyznaczona metodą badawczą wynosi 110-115 jednostek, a więc jest wyższa niż dla benzyny. Nie jest zatem wymagane stosowanie dla paliw gazowych tokeycznych dodatków antydetonacyjnych. Wartość opałowa skroplonej mieszaniny propanu i butanu wynosi 48148 kJ/kg, podczas gdy dla benzyny odpowiednio 43961 kJ/kg. Do przechowywania skroplonej mieszaniny propanu i butanu służą zbiorniki ciśnieniowe, spełniające rolę zbiornika paliwa.

Głównym składnikiem gazu ziemnego jest metan. Jego zawartość wynosi najczęściej od 90 do 97% (objętościowo). Gaz ziemny można przechowywać w butlach, sprężając go do ciśnienia około 20 MPa. Można go również skraplać w niskich temperaturach rzędu -162°C . Do przechowywania skroplonego gazu ziemnego w samochodzie stosowane są pojemniki kriogeniczne z izolacją cieplną, najczęściej próżniowo-proszkową. Stosowanie skroplonego gazu ziemnego zamiast gazu sprężonego pozwala na poprawienie niekorzystnego, dla tego ostatniego, stosunku ilości przechowywanej energii do objętości i masy całkowitej paliwa. Równocześnie, eksploatacja samochodów zasilanych skroplonym gazem ziemnym jest bezpieczniejsza, niż w przypadku stosowania gazu sprężonego, bowiem ryzyko eksplozji zbiorników paliwa w razie wypadku jest wówczas o wiele mniejsze.

Przechowywanie sprężonego gazu ziemnego w butlach ciśnieniowych, ze względu na ich znaczny ciężar, ogranicza możliwość jego stosowania do samochodów ciężarowych i autobusów. Masa butli produkcji krajowej o pojemności 80 dm^3 wynosi około 100 kg. W jednej takiej butli można zmagazynować około 15 dm^3 gazu ziemnego w warunkach normalnych. W samochodzie umieszcza się od 4 do 6 butli, co pozwala na przechowywanie w nich od 60 do 90 m^3 gazu. Ta objętość gazu zapewnia przebieg samochodu, w zależności od warunków eksploatacyjnych, wynoszący od 200 do 300 km.

Wartość opałowa gazu ziemnego, w zależności od jego składu, jest rzędu 35587 kJ/m^3 . Stąd też zużycie gazu ziemnego w metrach sześciennych, pod ciśnieniem atmosferycznym, odpowiada w przybliżeniu zużyciu benzyny w litrach na 100 km.

Liczba oktanowa gazu ziemnego wynosi około 105 jednostek, a więc charakteryzuje się on również znaczną odpornością na spalanie stukowe. Zakres zapalności gazu ziemnego jest szeroki, gdyż zawiera się w przedziale wartości współczynnika nadmiaru powietrza od 0,6 do 1,9. Możliwe jest więc osiągnięcie stabilnej pracy silnika na mieszkankach ubogich, co pozytywnie wpływa na jego ekonomiczność. Zarówno skroplona mieszanina propanu

i butanu jak i gaz ziemny są paliwami pełnowartościowymi. Gaz ziemny, przed jego stosowaniem jako paliwa silnikowego, nie wymaga żadnej dodatkowej obróbki technologicznej. Również silniki zasilane gazem ziemnym nie wymagają zasadniczych zmian, w porównaniu z wersją oryginalną.

Do zalet paliw gazowych, a w szczególności mieszaniny propanu i butanu oraz gazu ziemnego, z punktu widzenia ich przydatności do zasilania silników pojazdów samochodowych, należą:

- 1) możliwość zastąpienia paliw płynnych pochodzenia naftowego z równoczesnym zmniejszeniem wydatków dewizowych związanych z ich nabyciem,
- 2) wysoka liczba oktanowa, w granicach 105-115 jednostek,
- 3) znaczne zmniejszenie zawartości toksycznych składników w spalinach,
- 4) łatwość mieszania się paliwa gazowego z powietrzem, wskutek czego mieszankę napływającą do cylindrów cechuje znaczna jednorodność. Pozwala to na uniknięcie wahań w przebiegu spalania i zapewnia jednakowe obciążenie we wszystkich cylindrach,
- 5) spalanie jest bardziej "czyste", bez pozostawienia nagaru na elementach silnika,
- 6) zwiększenie trwałości świec zapłonowych 2-3-krotnie,
- 7) olej silnikowy zachowuje swoje własności smarne przez dłuższy okres, pozwalając na przebiegi bez jego wymiany wynoszące od 25000 do 30000 km, bez szkody dla silnika,
- 8) zwiększenie trwałości cylindrów, tłoków, pierścieni tłokowych i łożysk, gdyż nie zachodzi kondensacja paliwa wpływająca na rozrzedzenie oleju silnikowego. Dodatni wpływ na trwałość silnika ma również wysoka liczba oktanowa paliwa, zapewniająca spalanie bezstukowe,
- 9) wydatki na utrzymanie i naprawę pojazdu są mniejsze.

Paliwa gazowe, w przypadku ich stosowania do zasilania silników samochodowych, wykazują następujące cechy ujemne:

- 1) wymagane są znaczne nakłady inwestycyjne związane głównie z koniecznością zorganizowania sieci stacji napełniania butli gazem,
- 2) przystosowanie pojazdu do eksploatacji na paliwie gazowym wymaga poniesienia dodatkowego wydatku na zakup i zainstalowanie niezbędnych urządzeń,
- 3) dodatkowa masa instalacji paliwowej zmniejsza masę użytkową pojazdu, a objętość butli wpływa często na ograniczenie efektywnej objętości przestrzeni ładunkowej samochodu,
- 4) w przypadku zachowania w silniku tego samego stopnia sprężania co dla benzyny, występuje zmniejszenie mocy silnika rzędu 10-15%,
- 5) promień działania samochodu jest ograniczony, z uwagi na niedostatecznie gęstą, na ogół, sieć stacji napełniania butli gazem.

3. Sposoby zasilania silników paliwami gazowymi

W praktyce są obecnie spotykane następujące sposoby zasilania:

- sposób jednopaliwowy, pozwalający na zasilanie silnika o zapłonie iskrowym jedynie gazem,
- sposób dwupaliwowy, alternatywny, gwarantujący możliwość zasilania silnika o zapłonie iskrowym, paliwem gazowym lub benzyną,
- sposób dwupaliwowy, równoczesny podczas którego silnik o zapłonie samoczynnym może być zasilany równocześnie olejem napędowym i paliwem gazowym.

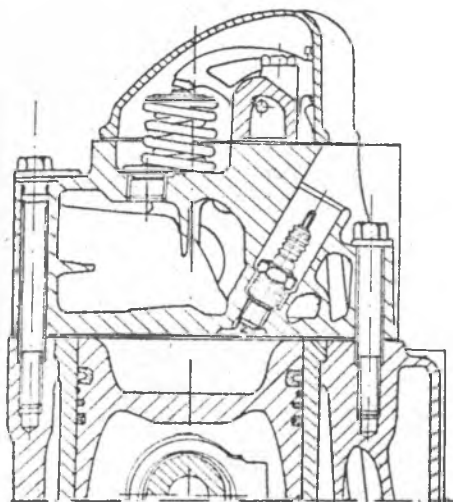
Główna zaleta sposobu jednopaliwowego polega na tym, że jest możliwe w tym przypadku optymalne dostosowanie silnika do spalania paliwa gazowego, głównie przez zwiększenie stopnia sprężania do wartości 10, a nawet 12, zmianę ustawienia zapłonu i modyfikację charakterystyki układu zapłonowego oraz zastosowanie mieszalnika gazu i powietrza o niskich oporach przepływu. Zmiany te gwarantują optymalną pracę silnika, pozwalając na zachowanie jego mocy, osiąganą przy napędzie benzyną.

Natomiast stosowanie sposobu dwupaliwowego alternatywnego pozwala na zwiększenie promienia działania samochodu, gdyż po wyczerpaniu gazu jest możliwe przełączenie układu zasilania na paliwo płynne. Jednakże, ten rodzaj zasilania pozwala uzyskiwać maksymalne wskaźniki pracy silnika tylko dla jednego ze stosowanych paliw. Wiąże się to głównie z tym, że optymalne wielkości stopnia sprężania i współczynnika nadmiaru powietrza są różne dla każdego z tych paliw.

W przypadku zasilania dwupaliwowego równoczesnego, zachowuje się cykl pracy silnika wysokoprężnego, zmniejszając jednakże dawkę oleju napędowego. Samoczynny zapłon tej dawki paliwa zapoczątkowuje spalanie sprężonej w cylindrach mieszanki, składającej się z powietrza i paliwa gazowego. Uzyskiwana, ogólna oszczędność oleju napędowego wynosi od 50 do 80%, w zależności od warunków pracy silnika. Zasilanie dwupaliwowe równoczesne łączy zalety silnika gazowego z zaletami silnika wysokoprężnego. W porównaniu z zasilaniem wyłącznie gazem są one następujące:

- nie występuje strata mocy silnika,
- utrzymuje się regulację jakościową silnika wysokoprężnego,
- nie ma potrzeby przebudowy silnika wysokoprężnego na silnik z zapłonem iskrowym.

Natomiast stosowanie zasilania jednopaliwowego w silniku wysokoprężnym wymaga odpowiedniej jego modyfikacji (rys. 1), polegającej na zmniejszeniu stopnia sprężania oraz zastąpieniu wtryskiwaczy świecami, a pompy wtryskowej rozdzielnikiem zapłonu, pozostawiając jednakże regulator obrotów. Wprowadzie moc maksymalna silnika, w porównaniu z wersją oryginalną,



Rys. 1. Przekrój poprzeczny przez głowicę i komorę spalania, silnika MAN zasilanego gazem ziemnym

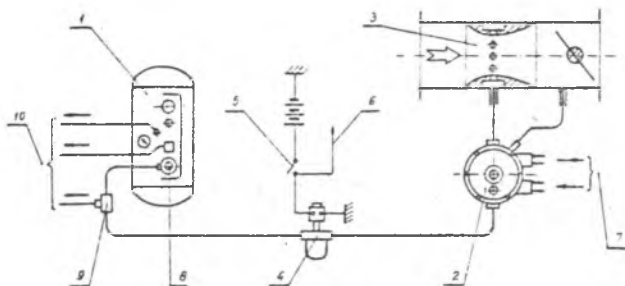
zmniejszy się o około 25%, jednakże jest to rekompensowane przez charakterystyczne dla zasilania paliwem gazowym cechy dodatnie, spośród których takie, jak: zmniejszenie emisji szkodliwych składników spalin, znaczne obniżenie poziomu hałasu silnika (o około 5 dB), mniejsze drgania silnika na niskim i średnim zakresie prędkości obrotowych, są szczególnie istotne w przypadku autobusów miejskich. Zmniejszają one bowiem zagrożenie środowiska oraz podnoszą komfort jazdy.

4. Układy zasilania paliwami gazowymi

Stosowane w silnikach spalinowych układy zasilania paliwami gazowymi stanowią systemy utworzone przez elementy spełniające określone funkcje. Rodzaje wchodzących w skład układu zasilania elementów oraz ich konfiguracje zależą od rodzaju silnika (o zapłonie iskrowym lub samoczynnym), sposobu zasilania (jedno- lub dwupaliwowy) oraz od rodzaju stosowanego paliwa (skroplony propan-butan, sprężony gaz ziemny lub skroplony gaz ziemny). We wszystkich jednak przypadkach występują określone podstawowe elementy układu zasilania, do których należą: butle lub zbiorniki do przechowywania paliwa, filtr gazu, samoczynny zawór odcinający, zawór bezpieczeństwa, reduktor gazu (konwerter-regulator), mieszalnik paliwa gazowego z powietrzem oraz przewody stalowe i elastyczne do łączenia elementów między sobą.

4.1. Zasilanie jednopaliwowe silnika o zapłonie iskrowym skroploną mieszaniną propanu i butanu

Jak można zaobserwować na schemacie (rys. 2), gaz skroplony jest przechowywany w zbiorniku (1) pod maksymalnym ciśnieniem roboczym wynoszącym około 1,6 MPa. Po otwarciu zaworu wylotowego (8) skroplona mieszanina propanu i butanu dopływa przewodem do filtra gazu zespolonego z zaworem elektromagnetycznym (4), a następnie w przypadku gdy zawór jest otwarty, mieszanina w stanie ciekłym dopływa do reduktora (2).



Rys. 2. Schemat zasilania jednopaliwowego silnika o zapłonie iskrowym skroploną mieszaniną propanu i butanu

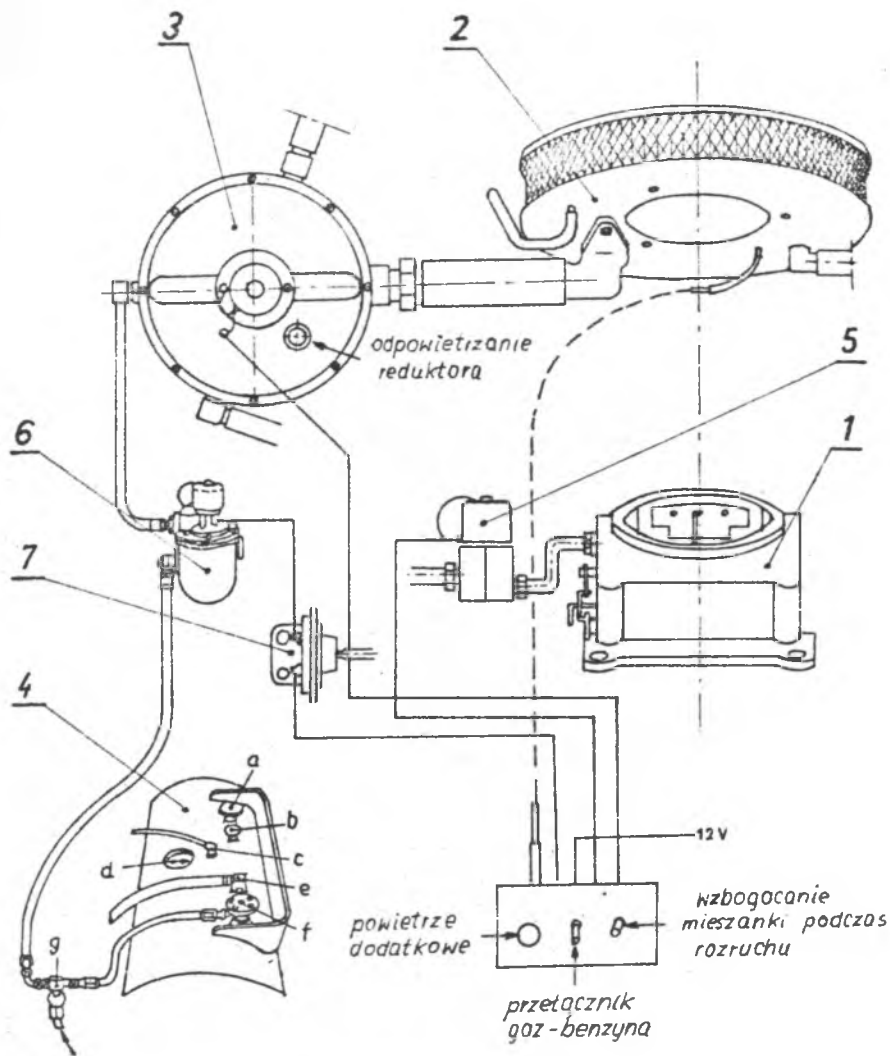
1 - zbiornik gazu skroplonego, 2 - reduktor ciśnienia, 3 - mieszalnik, 4 - elektromagnetyczny zawór odcinający, 5 - wyłącznik zapłonu, 6 - do cewki zapłonowej, 7 - zasilanie wodą chłodzącą silnik, 8 - główny zawór odcinający, 9 - zawór bezpieczeństwa, 10 - przewody elastyczne

W reduktorze następuje zmniejszenie ciśnienia mieszaniny do wartości zbliżonej do ciśnienia atmosferycznego, a ponadto, w wymienniku ciepła wchodzącym w skład reduktora odbywa się odparowanie mieszaniny i ogrzewanie gazu. Wymiennik jest włączony w obieg układu chłodzenia silnika. Ciepło oddane przez ciecz chłodzącą pozwala na uniknięcie nadmiernego ochładzania się korpusu reduktora w wyniku ekspansji gazu. W przypadku gdy silnik nie pracuje, zawory reduktora są zamknięte, odcinając dopływ gazu do rury ssącej. Natomiast w czasie pracy silnika reduktor dostosowuje ilość doprowadzonego do mieszalnika (3) gazu, zależnie od prędkości obrotowej i obciążenia zapewniając odpowiedni skład mieszanki. Uwzględniając obydwie wymienione zasadnicze funkcje urządzenia, a mianowicie przemianę stanu ciekłego mieszaniny propanu i butanu w stan gazowy oraz regulację ciśnienia i ilości doprowadzonego do mieszalnika gazu, w literaturze zagranicznej zamiast nazwy reduktor stosuje się nazwę konwerter-regulator.

W przypadku zasilania jednopaliwowego, jedynie gazem, mieszalnik (3) zastępuje gaźnik silnika benzynowego. Stosownie do obowiązujących w większości krajów przepisów, układ zasilania paliwem gazowym winien być wyposażony w samoczynnie działający zawór odcinający, umieszczony pomiędzy zbiornikiem gazu i mieszalnikiem. Warunek ten wynika z konieczności zapewnienia wymaganego bezpieczeństwa podczas eksploatacji samochodu zasilanego paliwem gazowym.

4.2. Zasilanie dwupaliwowe alternatywne silnika o zapłonie iskrowym benzyna i skroplona mieszanina propanu i butanu

W tym przypadku (rys. 3) układ zasilania składa się z następujących głównych elementów: zbiornik skroplonego paliwa gazowego (4), filtr gazu z elektromagnetycznym zaworem odcinającym (6), włącznik podciśnieniowy (7) zaworu odcinającego, elektromagnetyczny zawór odcinający benzynę (5),



Rys. 3. Schemat zasilania dwupaliwowego silnika o zapłonie iskrowym benzyną i skroploną mieszaniną propanu i butanu

1 - gaźnik, 2 - filtr powietrza, 3 - reduktor ciśnienia, 4 - zbiornik gazu, 5 - elektromagnetyczny zawór odcinający benzynę, 6 - filtr gazu z elektromagnetycznym zaworem odcinającym, 7 - pneumatyczny wyłącznik zaworu odcinającego gazu

a - zawór do napełniania, b - zawór zwrotny pary, c - zawór poziomy maksymalnego (90%), d - wekaźnik poziomy, e - zawór bezpieczeństwa, f - główny zawór odcinający, g - zawór bezpieczeństwa

wówczas gdy silnik jest zasilany paliwem gazowym, reduktor ciśnienia gazu (3), mieszalnik (2), przewody doprowadzające paliwo oraz elementy sterujące przełączaniem układu zasilania, stosownie do wybranego rodzaju paliwa.

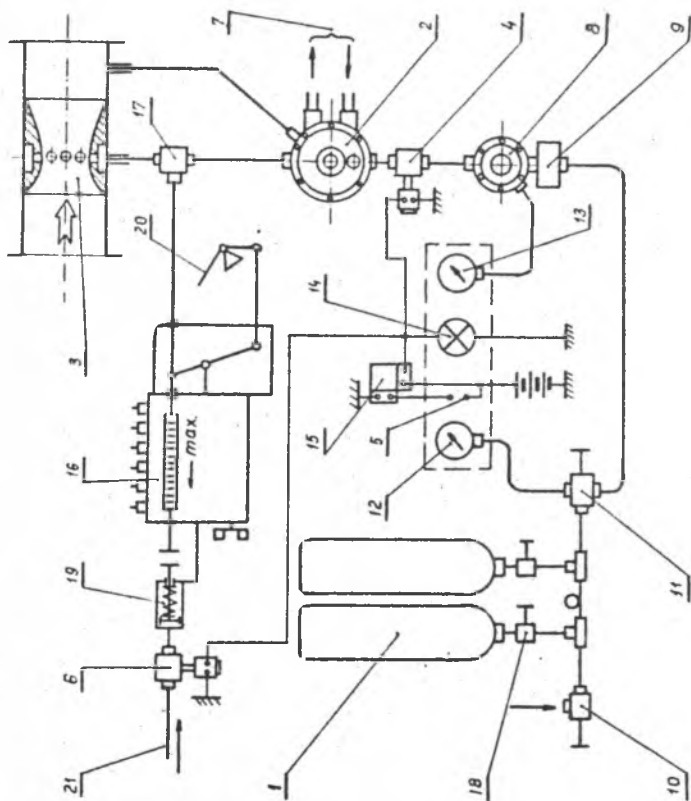
Mieszalnik paliwa gazowego z powietrzem uzupełnia w tym układzie zasilania klasyczny gaźnik silnika benzynowego. Mieszalnik ten może być usytuowany nad gaźnikiem, wewnątrz odpowiednio dostosowanego filtra powietrza. Przepustnica gaźnika spełnia jednocześnie funkcję przepustnicy mieszalnika gazu z powietrzem. Cewki elektromagnesów obydwu zaworów odcinających są połączone z przełącznikiem trzypołożeniowym, połączonym z wyłącznikiem zapłonu samochodu. Równoczesne zasilanie silnika benzyną i gazem nie jest możliwe. Przycisk znajdujący się po prawej stronie płytki czołowej umożliwia, za pośrednictwem elektromagnesu przymocowanego do środkowej części korpusu reduktora ciśnienia, wzbogacenie mieszanki dla ułatwienia rozruchu zimnego silnika.

4.3. Zasilanie dwupaliwowe równoczesne silnika o zapłonie samoczynnym olejem napędowym i sprężonym gazem ziemnym

Zachowując cykl pracy silnika o zapłonie samoczynnym zmniejsza się w tym przypadku wielkość dawki oleju napędowego wtryskiwanego do cylindra. Równocześnie jednak silnik zasysa wraz z powietrzem zmieszane z nim paliwo gazowe. Z dotychczasowej praktyki eksploatacyjnej wynika, że najkorzystniej jest zasilać silnik paliwem gazowym dostarczając je jedynie w górnym zakresie obciążeń. Ten warunek można spełnić w przypadku stosowania układu zasilania przedstawionego na schemacie (rys.4). Przełączając układ na zasilanie dwupaliwowe, należy otworzyć zawór elektromagnetyczny gazu (4) oraz zawór elektromagnetyczny sterujący dopływ powietrza (6) do cylindra siłownika pneumatycznego (19). Ten ostatni przesunie w kierunku pompy wtryskowej zderzak listwy zębatej ograniczając w ten sposób maksymalną dawkę wtryskiwanego paliwa. Przesunięciu listwy zębatej przyporządkowany jest odpowiedni stopień otwarcia zaworu dozującego gaz do mieszalnika (17), zapewniając w ten sposób optymalne warunki pracy silnika. Lampka kontrolna (14) sygnalizuje włączenie zasilania dwupaliwowego.

5. Dotychczasowe doświadczenia w zakresie stosowania paliw gazowych

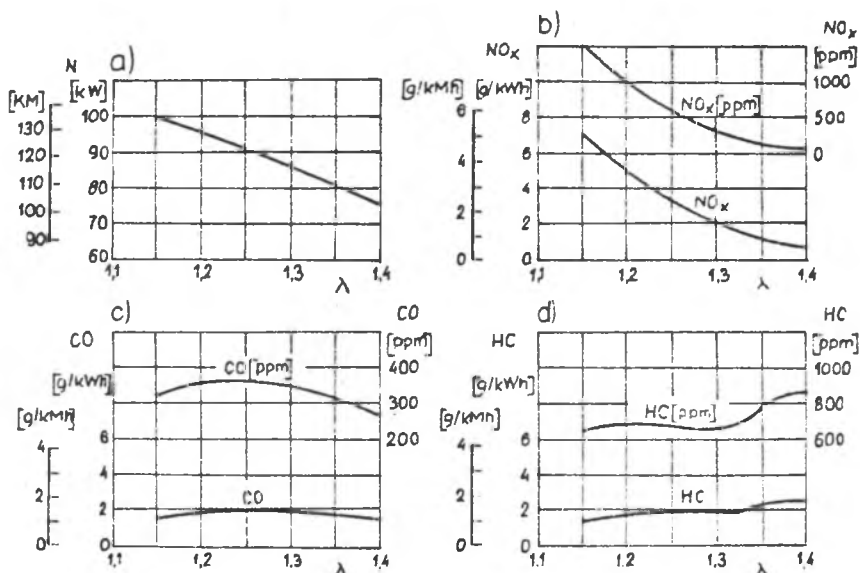
Klasycznym już przykładem pozytywnych wyników eksploatacyjnych i ekologicznych, jakie można uzyskać zasilając zmodyfikowane silniki wysokoprężne gazem, są cytowane wielokrotnie w literaturze [4, 7] doświadczenia firmy MAN, w zakresie stosowania gazu ziemnego do zasilania silników autobusów miejskich. W autobusach stosowano silniki typu G0846 będące modyfikacją silników wysokoprężnych D0846. Są to silniki sześciocylindrowe



Rys. 4. Schemat zasilania dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym olejem napędowym i sprężonym gazem ziemnym

- 1 - butle, 2 - reduktor zasadniczy, 3 - mieszalnik, 4 i 6 - elektromagnetyczne zawory odcinające, 9 -
- 5 - włącznik zasilania dwupaliwowego, 7 - zasilanie wodą chłodzącą silnik, 8 - reduktor wstępny, 9 -
- filtr gazu, 10 - zawór do napełniania butli gazem, 11 - zawór odcinający wysokiego ciśnienia, 12 i 13 -
- 13 - manometry, 14 - lampka kontrolna, 15 - przekładnik elektromagnetyczny, 16 - pompa wtryskowa, 17 -
- zawór dozujący, 18 - zawór bułli, 19 - siłownik pneumatyczny zderzaka listwy zębatej, 20 - pedał
- przyspiesznika, 21 - doprowadzenie sprężonego powietrza

łęzące, o objętości skokowej $7,255 \text{ dm}^3$ i znamionowej prędkości obrotowej wynoszącej 2500 obr/min. Stopień sprężania silnika wyjściowego 16 zmniejszono do 14. Uzyskano to stosując łożki z zagłębieniami w denkach o kształcie odwróconego stożka ściętego (rys. 1). Moc silnika zmniejszyła się z 117,6 kW (160 KM) do 95,6 kW (130 KM), czyli o ok. 19%. Współczynnik nadmiaru powietrza podczas zasilania gazem ziemnym zmienił się w granicach 1,3 - 1,5, a w szczególnym przypadku, dla którego podano moc obu silników wynosił on 1,37 (rys. 5).

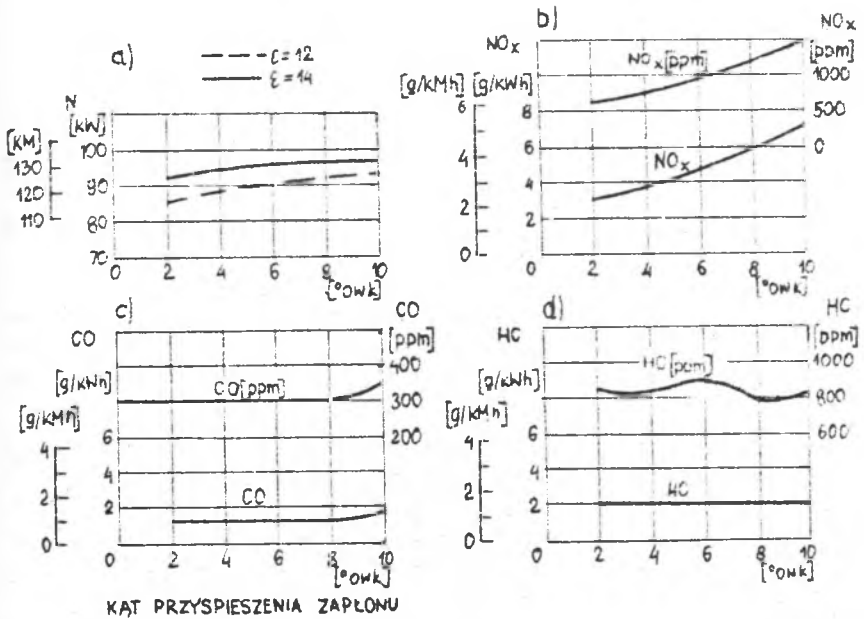


Rys. 5. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na moc efektywną i emisję składników toksycznych spalin dla silnika zasilanego gazem ziemnym
Warunki: $\xi = 14$, $n = 2500$ obr/min, kąt przyspieszenia zapłonu 2° o.w.k. przed GMP, przepustnica całkowicie otwarta

Pomiary emisji składników toksycznych wykonano zgodnie z amerykańskim testem 13-fazowym. Podczas zasilania paliwem gazowym sumaryczna emisja $\text{CH} + \text{NO}_x$ wynosiła $5,13 \text{ g/kWh}$ ($3,77 \text{ g/KWh}$), natomiast emisja $\text{CO} = 2,03 \text{ g/kWh}$ ($1,49 \text{ g/KWh}$). Wartości dopuszczalne są następujące: $\text{CH} + \text{NO}_x = 6,8 \text{ g/kWh}$ (5 g/KWh) i $\text{CO} = 34 \text{ g/kWh}$ (25 g/KWh). Podczas uruchamiania zimnego silnika i w czasie biegu luzem spaliny nie zawierały sadzy i były pozbawione przykrego zapachu. W czasie pomiarów stosowano kąt zapłonu wynoszący 2° obrotu wału korbowego przed GMP.

Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na moc efektywną silnika zasilanego gazem ziemnym i na emisję składników toksycznych spalin jest przedstawiony na rysunku 5. Jak można zaobserwować (rys. 5b) zwiększenie nadmiaru powietrza prowadzi do znacznego zmniejszenia emisji tlenków azotu. Odbywa się to jednak kosztem zmniejszenia mocy efektywnej silnika (rys. 5a). Równocześnie można zauważyć (rys. 5c i 5d), że zmiana wartości współczynnika nadmiaru powietrza w granicach 1,15 - 1,4 wpływa stosunkowo nieznacznie na emisję tlenku węgla i nie spalonych węglowodorów.

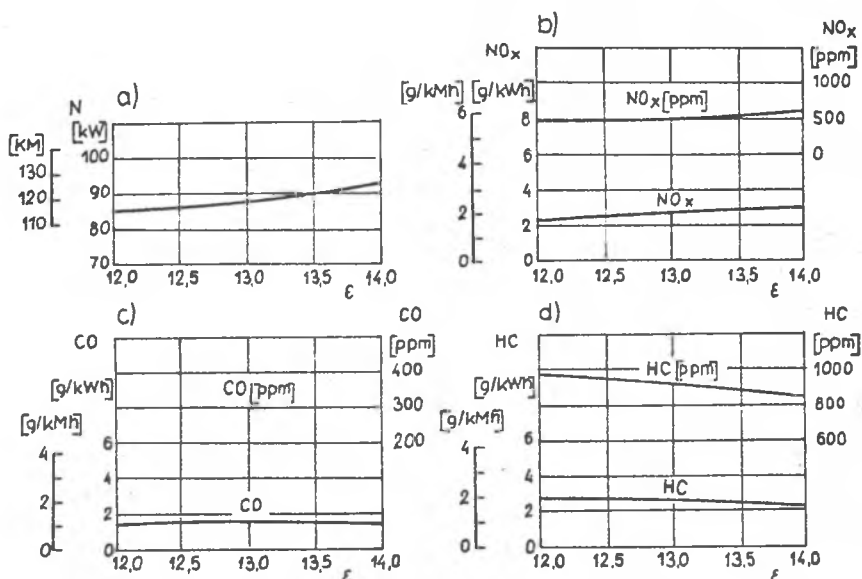
Znaczny wpływ na emisję tlenków azotu ma kąt zapłonu (rys. 6). Opóźnienie zapłonu wpływa korzystnie na obniżenie emisji NO_x . Jak można było oczekiwać, opóźnienie zapłonu powoduje zmniejszenie mocy efektywnej silnika (rys. 6a). Natomiast zmiana kąta zapłonu praktycznie nie wpływa na emisję tlenku węgla (rys. 6c) i ma jedynie niewielki wpływ na zawartość nie spalonych węglowodorów w spalinach (rys. 6d).



Rys. 6. Wpływ kąta przyspieszenia zapłonu na moc efektywną i emisję składników toksycznych spalin dla silnika zasilanego gazem ziemnym

Warunki: $\lambda = 1,31$, pozostałe jak na rys. 5

Z wykresów przedstawionych na rysunku 7 (b, c i d) wynika, że zmiana stopnia sprężania w granicach 12 - 14 ma jedynie niewielki, praktycznie pomijalny wpływ na zawartość NO_x i HC w spalinach. Nie ma natomiast wpływu na emisję CO. Oczywiście, wzrost stopnia sprężania wpływa na zwiększenie mocy efektywnej silnika (rys. 7a).



Rys. 7. Wpływ stopnia sprężania na moc efektywną i emisję składników toksycznych spalin dla silnika zasilanego gazem ziemnym

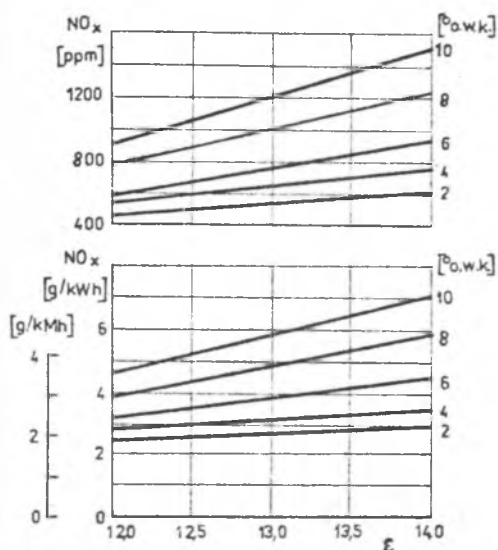
Warunki: $\lambda = 1,31$, pozostałe jak na rys. 5

We wszystkich przypadkach przedstawionych na rysunkach 5, 6 i 7 przepustnica mieszanki była całkowicie otwarta a prędkość obrotowa silnika wynosiła 2500 obr/min. Ponadto w dwóch przypadkach (rys. 5 i 7) kąt zapłonu był stały i wynosił 2° obrotu wału korbowego przed GMP.

Wykres przedstawiony na rysunku 8 obrazuje równoczesny wpływ stopnia sprężania i kąta zapłonu na emisję tlenków azotu przez silnik zasilany paliwem gazowym. Z wykresu wynika, że dla obniżenia emisji NO_x korzystne jest zmniejszenie kąta zapłonu przy równoczesnym zwiększeniu stopnia sprężania. W praktyce, największą wartością stopnia sprężania jest 14. Czynnikiem ograniczającym wielkość stopnia sprężania jest brak odpowiedniego urządzenia zapłonowego.

Doświadczenia firmy MAN związane ze stosowaniem paliw gazowych datują się od początku lat siedemdziesiątych. Już w 1972 roku sześć autobusów MAN zasilanych skroplonym gazem ziemnym eksploatowano w Monachium podczas Olimpiady, przewożąc nimi sportowców i dziennikarzy. Następnie autobusy były eksploatowane w Monachium i innych miastach na normalnych liniach komunikacyjnych.

Firma Daimler-Benz opracowała w 1972 roku silnik typu M407hG zasilany gazem ziemnym, przeznaczony do autobusów miejskich [2]. Jest to silnik sześciocyldrowy o zapłonie iskrowym. Objętość skokowa wynosi $11,05 \text{ dm}^3$, a stopień sprężania 11. Moc maksymalna silnika była równa 190 KM (SAB),



Rys. 8. Emisja tlenku azotu w zależności od stopnia sprężania i kąta przyspieszenia zapłonu dla silnika zasilanego gazem ziemnym
Warunki: $\lambda = 1,31$, $n = 2500$ obr/min, przepustnica całkowicie otwarta

peźniono krzywymi charakteryzującymi zmiany wartości średniego ciśnienia efektywnego p_e i jednostkowego, energetycznego zużycia paliwa g_e , w zależności od stopnia sprężania.

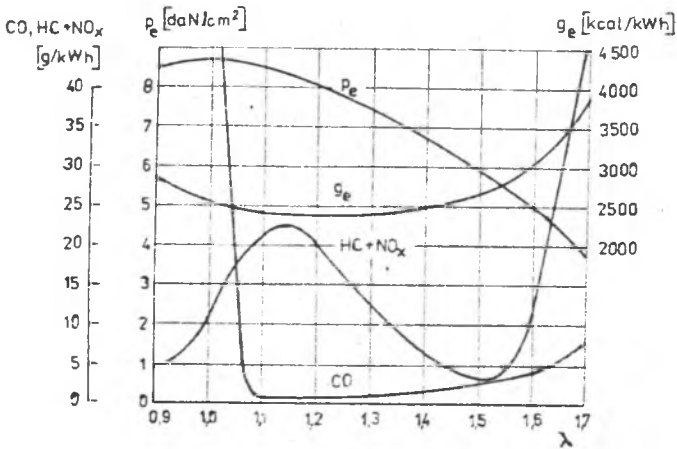
Wiedeńskie Zakłady Komunikacyjne (Wiener Verkehrsbetriebe) już od dwudziestu lat eksploatują, w mniejszym lub większym zakresie, autobusy miejskie z silnikami wysokoprężnymi zasilanymi paliwami gazowymi [3]. Do 1977 roku eksploatowano ogółem 300 takich autobusów. Jedno z zadań, które zrealizowano polegało na doborze odpowiedniego silnika do napędu dwupoziomowego autobusu miejskiego OAF-Gräf and Stift i przystosowanie go do jednopaliwowego zasilania skroploną mieszaniną propanu i butanu. Zastosowano w nich ostatecznie sześciocyndrowe silniki MAN typu C2566-MXUH o objętości skokowej $11,4 \text{ dm}^3$ i mocy maksymalnej 200 KM (147 kW) przy 2100 obr/min. Przebieg autobusu bez napełniania zbiorników wynosił 300 km. Nakłady na paliwo zmniejszyły się o około 55%. W oparciu o pozytywne wyniki dotychczasowych doświadczeń, postanowiono wyposażyć w latach 1977-79 ponadto sto nowych autobusów w silniki zasilane gazem.

Wyniki uzyskane podczas pomiaru zadymienia spalin silnika zasilanego dwupaliwowo olejem napędowym i skroploną mieszaniną propanu i butanu, odpowiednio 60% i 40% wskazują na to, że nie przekracza ono niskiej wartości 10 jednostek Hartridge'a (rys. 10).

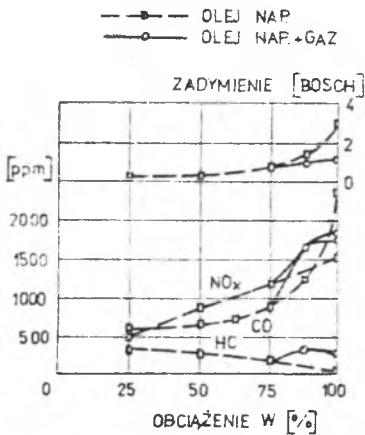
czyli 139,7 kW przy 2200 obr/min. Początkowo silnik zasilano sprężonym gazem ziemnym, a następnie skroplonym gazem ziemnym.

Poziom emisji spalin zmierzony według amerykańskiego testu 13-fazowego wynosił 2,72 g/kWh (2 g/kWh) dla CO i 5,17 g/kWh (3,8 g/kWh) dla HC + NO_x . Obydwa wyniki są niższe od wartości dopuszczalnych (rys. 9).

Zmiana emisji składników toksycznych spalin w zależności od wielkości współczynnika nadmiaru powietrza, zmieniającego się w granicach 0,9 - 1,7 jest przedstawiona na rysunku 9. Wykres uzupełniono



Rys. 9. Emisja składników toksycznych spalin, jednostkowe energetyczne zużycie paliwa i średnie ciśnienie efektywne przy różnych współczynnikach nadmiaru powietrza dla silnika zasilanego gazem ziemnym, $n = 2200$ obr/min



Rys. 10. Wpływ dodatku skroplonego propanu i butanu na zadymienie i emisję spalin

Warunki: Kąt wtrysku 23° o, w, k, przed GMP, pełne obciążenie, udział skroplonego propanu i butanu 25%

Również we Francji wykonano wiele prac związanych z zastosowaniem paliw gazowych w autobusach miejskich. Do bardziej interesujących należą prace wykonane przez R.A.T.P (Regie Autonome des Transports Parisiens) i fabrykę SAVIEM, dotyczące przystosowania sześciocylinrowego silnika typu 797 autobusu SAVIEM SC50 do zasilania jednopaliwowego skroplonym gazem ziemnym. Moc silnika wyjściowego, o objętości skokowej $5,491 \text{ dm}^3$, była równa 100 kW (136 KM) przy 2900 obr/min , która przy zastosowaniu zasilania gazem zmniejszyła się do 88 kW (120 KM), czyli 12%. Stopień sprężania silnika wyniósł 13. Podczas badań stosowano tłoki o różnych kształtach. Zmodyfikowano również wałek rozrządu. Sil-

nik dostosowany do zasilania gazem ziemnym nosił oznaczenie SAVIEM 797-10 GNL.

Pomiary emisji spalin przeprowadzono według testu amerykańskiego (kalifornijskiego), uzyskując następujące wyniki:

1. Dla silnika wysokoprężnego

CO	HC	NO _x	HC + NO _x	
8,16	3,13	12,24	15,37	g/kWh
6,0	2,3	9,0	11,3	g/kWh

2. Dla silnika zasilanego skroplonym gazem ziemnym

CO	HC	NO _x	HC + NO _x	
6,01	7,64	14,16	21,80	g/kWh
4,42	5,62	10,41	16,03	g/kWh

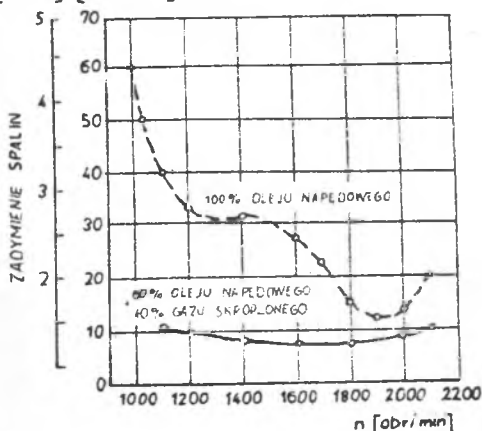
Kąt zapłonu wynosił 5° o.w.k. przed GMP przy 1740 obr/min i 11° o.w.k. przy 2900 obr/min. Współczynnik nadmiaru powietrza był równy 1,03 i 1,18 odpowiednio przy 1740 i 2900 obr/min. Podczas badania stosowano tłoki z komorami współśrodkowymi w denkach, o kształcie jak w silnikach gazowych MAN. Wałek rozrządu był oryginalny. Nie stwierdzono, z punktu widzenia sprawności silnika i możliwości zmniejszenia emisji NO_x, wyższosci innych kształtów denek tłoka lub konieczności modyfikacji krzywek wałka rozrządu, w porównaniu ze stosowanymi podczas testu.

Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na moc silnika uzyskiwaną przy

czterech różnych prędkościach obrotowych jest przedstawiony na rysunku 11. Można zaobserwować, że optymalny zakres współczynnika nadmiaru powietrza wynosi 1,1 - 1,32. Uzyskiwaną przez silnik wysokoprężny i silnik zasilany gazem sprawność obrazuje wykres zamieszczony na rysunku 12.

Zwiększenie zużycia paliwa w kJ/kWh przez silnik gazowy, w porównaniu z silnikiem wysokoprężnym, wynosi 9% dla pracy z pełnym obciążeniem przy 2000 obr/min.

[BOSCH] [HARTRIGE]

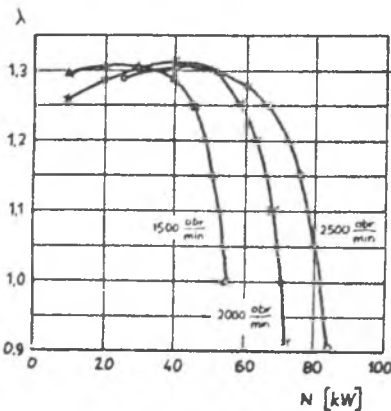


Rys. 11. Wyniki pomiarów zadymienia spalin

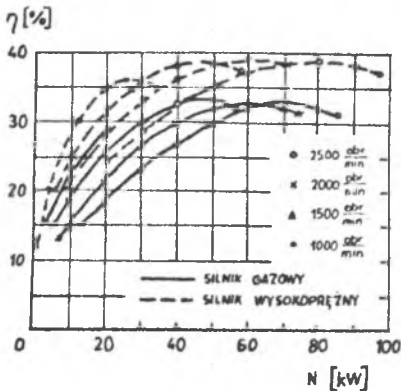
Jednakże zmniejszając obciążenie do około 1/4 przy tej samej prędkości obrotowej, zwiększenie zużycia paliwa wyniesie około 25% (rys. 13).

Wysokie ceny paliw płynnych, a także przepisy ograniczające w sposób drastyczny dopuszczalną emisję składników toksycznych spalin samochodowych, wpłynęły na coraz szersze,

szczególnie w niektórych krajach, stosowanie paliw gazowych. Dla zobrazowania tego rodzaju działalności może służyć przykład firmy Southern California Gas Co., która już w 1969 roku rozpoczęła prace związane z przystosowaniem silników eksploatowanych przez przedsiębiorstwo do zasilania sprężonym gazem ziemnym [2, 6]. W pierwszym roku przebudowano 950 pojazdów. W wyniku przebudowy można było łatwo spełnić wymagania przepisów kalifornijskich, nawet w przypadku starych samochodów. W połowie 1974 roku firma przystosowała już ponad połowę swojego parku samochodowego, w sumie 491 samochodów osobowych i 1771 samochodów ciężarowych, do zasilania dwupaliwowego alternatywnego, gazem lub benzyną. Liczba samochodów przystosowanych do zasilania gazem była ograniczona wydajnością urządzeń sprężarkowych stacji napełniania. Równocześnie można było napełniać butle 20 samochodów. Zwykle ta czynność była wykonywana w porze nocnej. W 1975 roku na paliwie gazowym wykonano około 75% ogólnego przebiegu samochodów przystosowanych do zasilania gazem. W wyniku wieloletniej



Rys. 12. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza na moc silnika



Rys. 13. Porównanie sprawności silnika wysokoprężnego i silnika zasilanego dwupaliwowo olejem napędowym i skropioną mieszaniną propanu i butanu

eksploatacji stwierdzono, iż 1 m³ gazu ziemnego w warunkach normalnych zastępuje 1,35 dm³ benzyny. Wynik ten odpowiada w przybliżeniu wartości obliczeniowej. W ciągu jednego półrocza 1974 roku zaoszczędzono w przedsiębiorstwie 2,15 miliona dm³ benzyny. Na podstawie analizy statystycznej

za okres pięcioletni ustalono, że zużycie silników zasilanych gazem ziemnym jest dużo mniejsze niż w przypadku stosowania benzyny jako paliwa. Firma uważa, że stosowanie gazu ziemnego zamiast benzyny było niewątpliwym sukcesem, przede wszystkim finansowym. Przewiduje się, w związku z tym, dalsze rozszerzenie prac związanych ze stosowaniem paliwa gazowego.

6. Podsumowanie

Wszystkie informacje dotyczące wyników uzyskiwanych podczas eksploatacji silników zasilanych jednopaliwowo gazem lub dwupaliwowo olejem napędowym i gazem są zgodne co do tego, iż paliwa gazowe wpływają na obniżenie składników toksycznych spalin w porównaniu z silnikami wysokoprężnymi. Spaliny są wolne od sadzy, dymu, składników drażniących i nieprzyjemnego zapachu. Stosowany przy zasilaniu jednopaliwowym cykl pracy o zapłonie iskrowym wpływa na znaczne obniżenie poziomu hałasu wywołanego przez silnik, a także na zmniejszenie wibracji, szczególnie na niskim zakresie prędkości obrotowych.

Optymalizując takie parametry, jak stopień sprężania, kąt przyspieszenia zapłonu i współczynnik nadmiaru powietrza można, bez konieczności stosowania dodatkowych urządzeń, zmniejszyć emisję CO, HC i NO_x poniżej wartości dopuszczalnych, określonych przez normy. Tak więc paliwa gazowe pozwalają na bezpośrednie i natychmiastowe spełnienie wymagań dotyczących ochrony środowiska w aglomeracjach miejskich.

Dobre własności przeciwstukowe paliw gazowych umożliwiają stosowanie wysokich stopni sprężania, co wpływa korzystnie na uzyskiwaną sprawność silnika i zapewnia jednocześnie stosunkowo niskie jednostkowe zużycie paliwa. Na zwiększenie ekonomiczności silnika ma również wpływ możliwość stosowania znacznie zubożonych mieszanek paliwowo-powietrznych.

Biorąc pod uwagę powyższe cechy można stwierdzić, że zasilanie paliwami gazowymi jest szczególnie korzystne w odniesieniu do autobusów miejskich i samochodów dostawczych, eksploatowanych w mieście.

Stosowanie paliw gazowych jest celowe przede wszystkim w przedsiębiorstwach o dużej liczbie samochodów, w których można zapewnić centralne napełnianie, najlepiej w porze nocnej, butli gazem oraz zorganizować specjalistyczną obsługę układów zasilania.

Brak współczesnych krajowych doświadczeń dotyczących zasilania silników, szczególnie wysokoprężnych, gazem ziemnym wskazuje na konieczność możliwie natychmiastowego podjęcia prac w tym zakresie. Jest to podyktowane wymaganiami ochrony środowiska i koniecznością zmniejszenia zużycia paliw płynnych. Interesująca jest również możliwość obniżenia kosztów eksploatacji, w przypadku zastąpienia paliw płynnych paliwami gazowymi.

LITERATURA

- [1] Antonucci C., Zadona L.: Motori Diesel "dual fuel" per ridurre la fumesita degli autobus urbani. ATA, Agosto 1974, s. 415-421.
- [2] Mc Jones R.W., Corbell R.J.: Natural gas fuel engines have lower exhaust emissions. SAE Journal Vol. 78, nr 6, June 1970, s. 31-34.
- [3] Knecht W.: Saurer Fahrzeug-Gasmotoren für LPG-Betrieb. ATZ Automobil-technische Zeitschrift, Vol. 80 nr 12, 1978, s. 601-607.
- [4] Neitz A., Knirsch E.: Omnibusantriebe auf der Basis von Erdgas, Propan oder Methanol. Verkehr und Technik, nr 9, 1979, s. 413-415.
- [5] Pavlik E.: Flüssiggas als Fahrzeugtreibstoff. Verkehr und Technik, nr 9, 1979, s. 417-418.
- [6] Przybylski J., Haveda O.: Consideraciones sobre el uso del gas licuado de petróleo (GLP) como combustible para los vehiculos automotors. IV Jornadas Científico-Técnicas. Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela 1983.
- [7] Przybylski J.: Paliwa gazowe. AUTO-Technika Motoryzacyjna, nr 11, 1984.
- [8] Satarov V.A., Goldblat I.I., Kolubaev B.D.: Gazoballonnye avtomobili i avtobusy kak sredstvo anizenija zagraznenija akruajuščej sredy i povyšeniija eksploatacionoi transporta. Avtomobilnaja Promyslennost, nr 6, 1979, s. 29-31.

Recenzent: doc. dr inż. Lech Gasikowski

Wpłynęło do Redakcji w październiku 1984 r.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОВЫХ ТОПЛИВ В АВТОТРАНСПОРТЕ

Р е з ю м е

В статье обсуждаются характеристические черты смеси пропана и бутана, а также природного газа, газовых топлив применяемых чаще всего для питания автомобильных двигателей внутреннего сгорания. Представлены также главные способы питания двигателей газовыми топливами.

Обсуждено существовавшие до сих пор опыты применения газовых топлив, особенно в городских автобусах.

THE PERSPECTIVES OF THE GAS FUELS APPLICATION INTO THE
AUTOMOTIVE TRANSPORT

S u m m a r y

There are discussed the characteristic properties of the propan and butan mixtures, also the natural gas and these gas fuels which are the most often used in the motor car combustion engines. There are also commented the basic methods of the gas fuels application into the combustion engines and up-to-now achievements and experiments, peciulary in their accomodation in the city busses exploitation.