ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996
Seria: TRANSPORT z. 28 Nr kol. 1310

Aleksander UBYSZ

ANALIZA TEORETYCZNA WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH SILNIKA ZI NA JEGO OSIĄGI PRZY ZASILANIU RÓŻNEGO RODZAJU PALIWAMI ZASTĘPCZYMI

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń teoretycznych wpływu stopnia sprężania i stopnia napełniania cylindrów mieszanką paliwowo-powietrzną na moc efektywną silnika ZI małej mocy przy zasilaniu różnego rodzaju paliwami zastępczymi, w odniesieniu do mocy rozwijanej przez silnik zasilany etyliną 94.

THE COMPARISON OF THE 126A.2000 ENGINE POWER FUELLED WITH DIFFERENT ALTERNATIVE FUELS

Summary. The main goal of this work was the comparison of SI engine performance for different alternative fuels. Relatively the least modification is required for feeding with natural gas, liquid gas called propane-butane and fuel based on stabilized gasoline worked out in Institute of Transport.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach w miarę wyczerpywania się surowców energetycznych coraz częściej przy zasilaniu silników stosowane są paliwa zastępcze: ropopochodne (nieodnawialne) i odnawialne. Przy dzisiejszym stanie wiedzy w zasadzie ogólnie znamy wpływ każdego z paliw zastępczych na wymagane zmiany konstrukcyjno-eksploatacyjne silników. Tym niemniej przy zastosowaniu nawet tak znanych paliw zastępczych jak gazy LPG czy CNG niezbędne jest w przypadku każdego modelu silnika określenie jego podstawowych danych regulacyjnych i niektórych parametrów konstrukcyjnychjnych, jak np. stopień sprężania.

W każdym przypadku adaptacji silnika do pracy w warunkach zasilania nowym paliwem ze względów ekonomicznych wskazane jest za pomocą odpowiedniego aparatu matematycznego określić osiągi silnika przy zasilaniu paliwami zastępczymi. Jest to szczególnie korzystne przy badaniach silników małych, nie rozwijających dużej mocy efektywnej,

stawiających pod znakiem zapytania korzyści wypływające z zastosowania przy ich zasilaniu paliw zastępczych.

W artykule autor przed badaniem silnika ZI o małej pojemności skokowej chce dać odpowiedź na temat wpływu poszczególnych parametrów konstrukcyjnych na osiągi silnika przy zasilaniu róznego rodzaju paliwami zastępczymi: gazem sprężonym (CNG), gazem ciekłym (LPG) i paliwem opracowanym w Instytucie Transportu na bazie gazoliny stabilizowanej - GM30.

2. Charakterystyka paliw zastępczych przewidzianych do badań

Do analizy osiągów silnika przyjęto następujące paliwa:

- etylinę 94 jako paliwo odniesienia,
- gaz ziemny, czyli przede wszystkim metan CH_4,
- mieszaninę propan-butan o składzie 30/70, 50/50 i 70/30% C_3H_8 do C_4H_{10},
- GM20: paliwo na bazie gazoliny stabilizowanej z 20% metanolu, stabilizowane dodatkiem 3% izobutanolu [1].

Najważniejsze parametry rozpatrywanych paliw przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

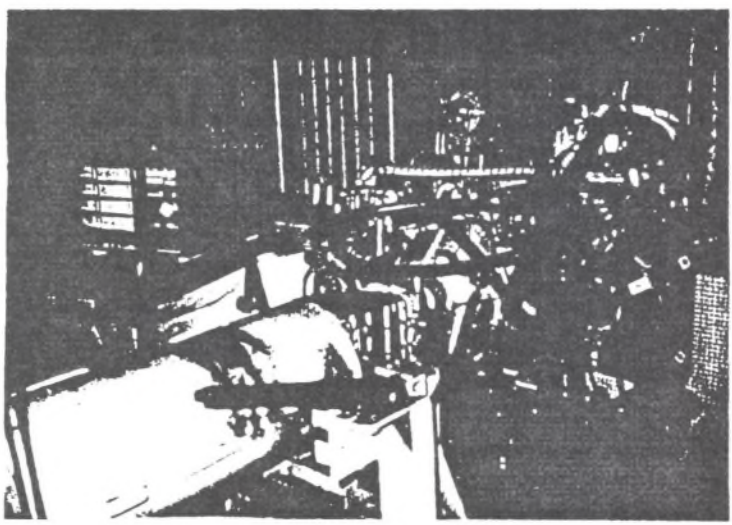
Charakterystyka paliw do silników ZI

Wskaźnik/paliwo	Etylina 94	Gazolina-metanol GM20	Gaz ziemny	Propan-butan 50/50%
1	2	3	4	5
Wartość opałowa Wd, MJ/kg,	43	42	-	49
Wartość opałowa, MJ/dm^3	32	33	36 MJ/m^3	25
Gęstość, kg/m^3 przy t=15°C	745	740	0,655	2,080
Liczba oktanowa motorowa, LO (M)	85	88	102	105
Liczba oktanowa badawcza, LO(B)	94	95	110-130	110
Teoretyczne zapotrzebowanie pow., kg/kg	14,5	12,5	9,75	15,5
Temperatura zapłonu, K	780	-	920	756

3. Charakterystyka silnika

Na rys. 1 przedstawiono silnik ZI 126A2.000 samochodu osobowego PF bis o pojemności 704 cm^3. Silnik o podobnej konstrukcji stosowany jest w samochodach Cinquecento 704. W obu przypadkach silniki zasilane są gaźnikowym systemem zasilania, z tym, że w wersji eksportowej Cinquecento 704 zaopatrzony jest w elektroniczny gaźnik Aisan pracujący w zamkniętym układzie regulacji z sondą LAMBDA i 3-funkcyjnym katalizatorem.

Dwuprzelotowy gaźnik Jikov 30SPDR do zasilania paliwem gazolinowym GM20 wymaga niewielkich zmian dotyczących głównie - z uwagi na inną wartość opałową - układu dysz paliwowych. W przypadku zasilania silnika paliwami gazowymi wymagana jest przeróbka układu zasilania: w miejsce gaźnika lub równolegle z nim należy założyć odpowiednią instalację gazową - rys.1 [2,3].



Rys. 1. Widok stanowiska do badań osiągów silnika ZI 126 A2.000 zasilanego różnego rodzaju paliwami zastępczymi
Fig. 1. The stand for studying the performance of 126 A2.000 engine fed with different kind of alternative fuels

W przypadku zasilania silnika paliwem gazolinowym GM20 wystarczy wymienić dysze gaźnika na nieco większe, a w celu ułatwienia rozruchu zimnego silnika należy przez pewien okres początkowy zasilać silnik etyliną. Prawdopodobnie celem kompensacji wysokiego ciepła parowania metanolu zawartego w paliwie GM20 przy pracy silnika na częściowych obciążeniach należy gaźnik podgrzewać gorącym powietrzem [6].

4. Określenie wpływu poszczególnych parametrów silnika i rodzaju paliwa na jego osiągi

Do obliczeń takich parametrów charakteryzujących osiągi silnika przy zasilaniu różnego rodzajami paliwami, jak średnie ciśnienie indykowane pi i efektywne pe oraz moc indykowana Ni i efektywna Ne wykorzystano odpowiedni program komputerowy służący do obliczeń silnika [4]. Program ten po wprowadzeniu odpowiednich danych oblicza i opracowuje wyniki w postaci tabel i wykresów.

4.1. Charakterystyka danych potrzebnych do obliczeń

Większość danych przyjmowanych do obliczeń wykresu indykatorowego, na podstawie którego następnie wylicza się moc silnika, przyjmuje się z tablic opartych na wieloletnich danych eksperymentalnych [5]. Dane te, jak np. średni wykładnik politropy sprężania i rozprężania, przyjmuje się do obliczeń jako wyważoną wartość średnią z widełek wartości podanych w tablicach.

Drugą grupę danych stanowią stałe, niezmienne dane przyjmowane w toku wszystkich obliczeń dla poszczególnych paliw. Należą do nich niewątpliwie znamionowa prędkość obrotowa, wskaźnik skokowości silnika S/D i pojemność skokowa.

W grupie trzeciej są dane, które zakłada się jako zmienne dlatego, gdyż są trudne do określenia w węższych granicach przy zasilaniu paliwami zastępczymi - jak w przypadku współczynnika napełniania - lub też różna liczba oktanowa (LO) tych paliw wymaga zmiany tak czułego na nią parametru konstrukcyjnego silnika jak stopień sprężania . Dla etyliny 94 współczynnik napełniania obliczono z mocy znamionowej, osiąganej przez silnik i wynosi on 0,73.

4.2. Wyniki obliczeń i ich analiza

Obliczenia procesu napełniania prowadzono w przypadku paliw gazowych (metan i mieszaniny propanu i butanu) jak dla paliw w postaci gazowej. Natomiast dla paliwa gazolinowego GM20 - ze względu na zasilanie gaźnikowe i brak danych, jaka część paliwa przed wejściem do cylindra i jego zamknięciem jest w stanie odparowanym - obliczenia przeprowadzono dla paliwa w fazie gazowej i w fazie ciekłej. Rzeczywisty stan paliwa dla każdych warunków pracy silnika - z uwagi na wysokie ciepło parowania metanolu - będzie inny. W tabeli 2 i na rys. 2 i 3 przedstawiono tabelarycznie i graficznie wyniki obliczeń średnich ciśnień i mocy osiąganych przez silnik zasilany różnego rodzaju paliwami przy najniższym z założonych współczynniku napełniania cylindra.

Na rys. 2 widoczny jest wzrost mocy efektywnej silnika przy jego zasilaniu paliwami gazowymi (GM20 również w postaci gazowej). Z przebiegu charakterystyk wynika, że ze wzrostem ilości węglowodorów ciężkich w paliwie zwiększa się moc silnika. Wszystkie, z

wyjątkiem 20% domieszki metanolu i izobutanolu, są węglowodorami z grupy alifatycznych, otrzymanych w procesie obróbki gazu ziemnego. Występujący w nim w największej ilości metan (także etan) jest najlżejszy, propan -butan jako kolejne węglowodory jest nieco cięższy, natomiast pentan, hektan i oktan (czasem nonan i dekan) są najcięższe, ale i tak o mniejszej gęstości niż najlżejsza benzyna samochodowa. Na rys. 2 umieszczono też parametr mocy silnika zasilanego benzyną. Widoczne na wykresie wyniki potwierdzają wyjątkowe walory eksploatacyjne paliw gazolinowych do silników ZI [6,7].

Zróżnicowana dla tych paliw LO pozwala dla niektórych z nich na znaczne zwiększenie stopnia sprężania bez niebezpieczeństwa pojawienia się spalania stukowego. Ale zastosowanie nawet najwyższego z przyjętych w obliczeniach ε nie pozwala zrekompensować różnicy w wartości opałowej paliw.

Jeszcze większe osiągi mocy może uzyskać silnik przy nieodparowanym paliwie. Na rys. 3 przy najniższym stopniu napełniania cylindrów pokazano dodatkowo moc silnika pracującego przy napełnianiu cylindrów w pełni nieodparowanymi kroplami paliwa GM20. Jest to przy tak wysokiej zawartości lotnych węglowodorów alifatycznych niemożliwe do osiągnięcia, a nawet niewskazane z uwagi na możliwość wystąpienia zakłóceń przebiegu procesu spalania. Na rys. 3 na podstawie wyników z badań własnych nad osiągami silnika PF126-650 cm^3 zasilanego paliwem GM20 [6] zaznaczono przypuszczalną moc rozwijaną przez silnik 126A1.076 zasilany tym paliwem gazolinowym. Na podstawie położenia punktu prawdopodobnie rozwijanej mocy pomiędzy charakterystykami pracy silnika przy napełnianiu silnika paliwem w stanie gazowym i ciekłym nietrudno jest wyliczyć stopień odparowania paliwa GM20 przed zamknięciem zaworów dolotowych silnika.

Znaczny wpływ na osiągi silnika ma, jak ogólnie wiadomo, współczynnik napełniania cylindrów. Jest wiele metod poprawy tego parametru. Najwięcej na tym polu można osiągnąć przez korekty lub zmiany konstrukcyjne układu dolotowo-wylotowego. Na rys. 4 dla paliwa gazolinowego przedstawiono wpływ współczynnika napełniania na moc efektywną silnika.

Jak wynika z rys. 3 i 4, wpływ stopnia napełnienia cylindrów świeżym ładunkiem i stopnia odparowania paliwa w mieszance na rozwijaną moc jest porównywalny i dominujący nad innymi parametrami .

Z punktu widzenia rozwijanej przez silnik mocy widoczna jest na rys. 3 znaczna przewaga paliwa gazolinowego nad pozostałymi paliwami gazowymi, będącymi lżejszymi węglowodorami alifatycznymi. Tak więc, gdyby nie nieznaczny udział masowy gazoliny w masie wydobywanej ropy naftowej i gazu, dalsze prace nad jej wykorzystaniem do zasilania silników spalinowych byłyby ze wszech miar wskazane.

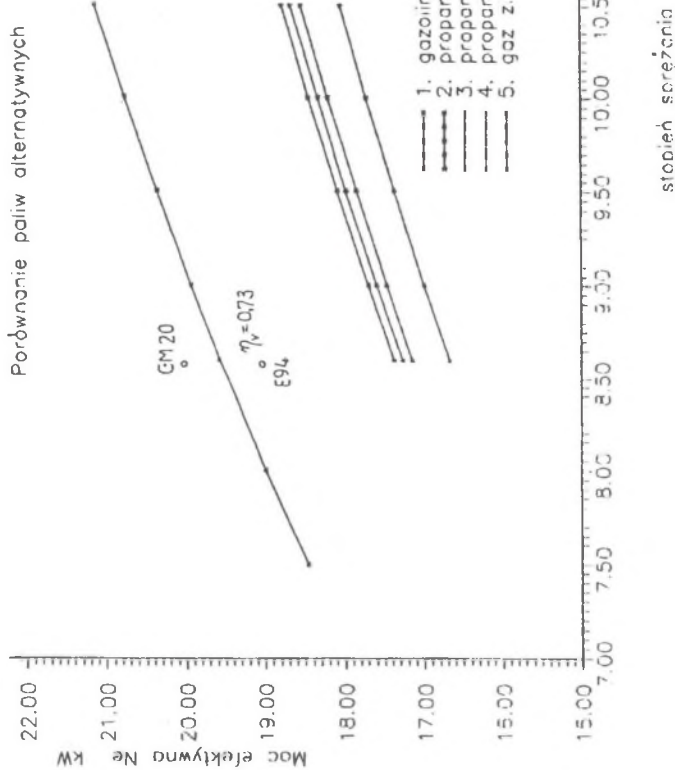
Tabela 2

Przykładowy arkusz tabelarycznych wyników obliczeń z nałożonymi na nie danymi wejściowymi dla etyliny 94

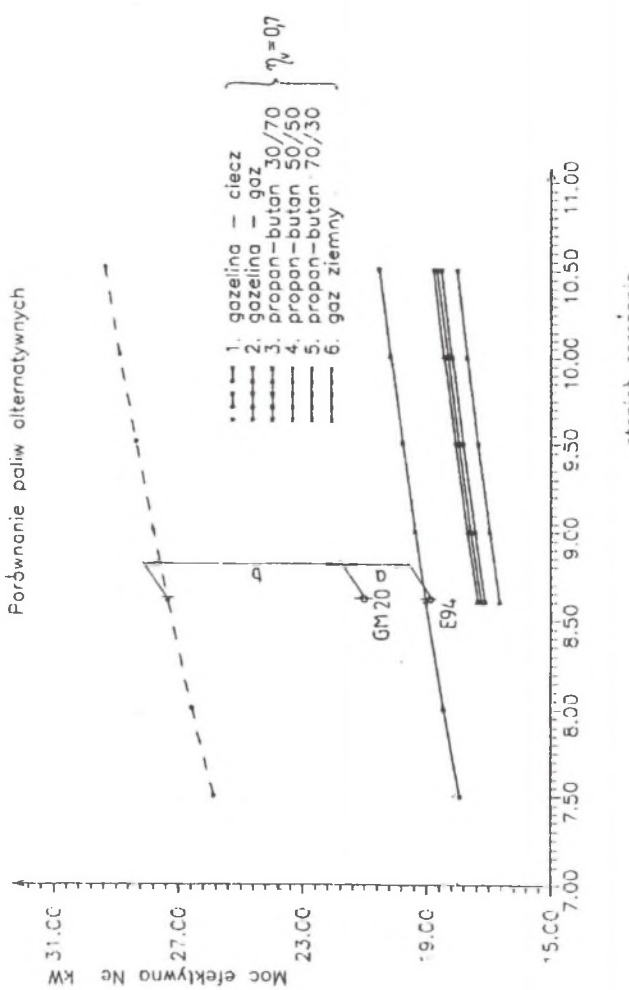
η	ε	pi [kPa]	pe [kPa]	Ni [kW]	Ne [kW]
Benzyna					
0,7	8,6	818.03	689.53	21.57	18.07
0,8		938.76	806.26	24.75	21.26
0,9		1,059.49	927.99	27.93	24.44
Gaz ziemny					
0.7	8,6	764.88	632.38	20.16	16.67
	9	776.9	644.4	20.48	16.99
	9.5	[illegible]	658.51	20.85	17.36
	10	[illegible]	671.69	21.2	17.71
	10.5	[illegible]	684.05	[illegible]	18.03
0.8	8.6	[illegible]	745.52	[illegible]	19.65
	9	[illegible]	759.21	[illegible]	20.01
	9.5	[illegible]	775.27	[illegible]	20.44
	10	[illegible]	790.28	[illegible]	20.83
	10.5	[illegible]	804.35	[illegible]	21.2
0.9	8.6	[illegible]	858.66	[illegible]	22.64
	9	[illegible]	874.02	[illegible]	23.04
	9.5	[illegible]	892.03	27.01	23.52
	10	[illegible]	908.86	27.45	23.96
	10.5	[illegible]	924.65	27.87	24.38
Propan-butan 70/30					
0.7	8.6	782.69	650.19	20.63	17.14
	9	794.98	662.48	20.96	17.46
	9.5	809.39	676.89	21.34	17.84
	10	822.86	690.36	21.69	18.2
	10.5	835.49	702.99	22.03	18.53
0.8	8.6	898.37	765.87	23.68	20.19
	9	912.37	779.87	24.05	20.56
	9.5	928.78	796.28	24.48	20.99
	10	944.11	811.61	24.89	21.4
	10.5	958.49	825.99	25.27	21.78
0.9	8.6	1,014.06	881.56	26.73	23.24
	9	1,029.76	897.26	27.15	23.65
	9.5	1,048.17	915.67	27.63	24.14
	10	1,065.37	932.87	28.09	24.59
	10.5	1,081.49	948.99	28.51	25.02

```
fi:=0.95
R:=287
pa:=100
Ta:=293
ms:=1.34
mr:=1.31
Wu:=43.00
Mt:=14.50
lambda:=1.0
xsr:=1.27
eta:=0.73
E:=0.85
δp:=35.00
p1:=80.00
ε:=8.6
n:=4500
Vs:=0.703
S/D:= 70/80
```

```
Vc:   2.1978
Q :   36.5500
s:    0.0700
p2:   1429.9403
p4:   5920.1857
p5:   353.2990
pi:   854.2499
csr:  10.5000
pt:   132.5000
pe:   721.7499
Ni:   22.5202
Ne:   19.0271
```

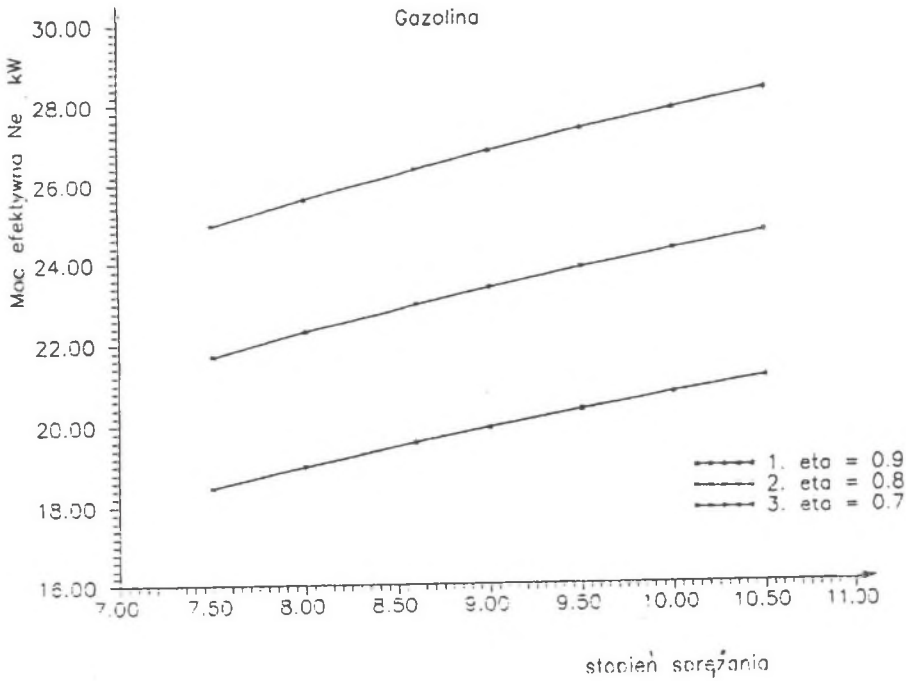


Rys.2. Graficzny obraz teoretycznych obliczeń rozwijanej przez silnik ZI mocy dla paliw w fazie gazowej i współczynnika napełniania bliskim zasilaniu etyliną E94
Fig.2. Comparison of SI engine power fuelled with different alternative fuels natural gasoline-gas, propane-butan and natural gas



Rys.3. Wykreślny obraz rozwijanej przez silnik mocy obliczeniowej przy zasilaniu paliwami w fazie gazowej i dodatkowo paliwem GM20 w fazie ciekłej (dla porównania zaznaczono moc rozwijaną przy zasilaniu benzyną)

Fig. 3. Comparison of SI engine power fuelled with different alternative fuels natural gasoline-liquid and gas, propane -butan and natural gas



Rys. 4. Wpływ stopnia napełniania cylindrów mieszanką palną na rozwijaną przez silnik moc efektywną

Fig. 4. Comparison of SI engine power coefficient η_V fuelled with natural gasoline-gas

5. Wnioski końcowe

Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń obiegu roboczego silnika ZI o małej pojemności skokowej zasilanego różnego rodzaju paliwami zastępczymi można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Z czterech uwzględnionych w obliczeniach paliw najwyższe osiągi uzyskuje silnik zasilany paliwem gazolinowym (GM20), a następnie etyliną 94, propanem-butanem i na końcu gazem ziemnym.

2. Jak wynika ze składu paliw, największy wpływ na moc silnika ma zawartość węglowodorów ciężkich w paliwie (stosunek atomów węgla do wodoru); im jest ich więcej, to rośnie wartość opałowa paliwa i moc rozwijana przez silnik.

3. W przypadku paliw ciekłych istotne ze względu na wzrost mocy silnika jest jak najmniejsze odparowanie paliwa przed zamknięciem zaworów dolotowych; z punktu widzenia przebiegu procesu spalania stan taki paliwa jest mniej wskazany.
4. Pod względem osiągów silnika wzrost stopnia sprężania ma znacznie niższy wpływ niż wzrost współczynnika napełnienia cylindra; wzrost tego ostatniego o 0,1 powoduje zwiększenie mocy silnika o ok. 15%, podczas gdy zwiększenie stopnia sprężania o 2 jednostki pozwala podwyższyć moc o 5%.

Literatura

1. Ubysz A.: Opracowanie na bazie gazoliny stabilizowanej paliw do silników ZI. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. nr 22, Gliwice 1994..
2. Przybylski J: Układy zasilania paliwami gazowymi. Auto- Technika Motoryzacyjna 2'85.
3. Jarczewski M.: Propan-butan jako paliwo silnikowe. Auto-Technika Motoryzacyjna 11/93.
4. Ubysz A.: Teoria trakcyjnych silników samochodowych. Skrypt Uczelniany nr 1516.
5. Jędrzejowski : Obliczenia tłokowego silnika spalinowego. WKŁ, Warszawa 1983.
6. Ubysz A., Filus W., Flekiewicz M.: Badania silnikowe zastępczego paliwa gazolinowego do silników ZI. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. nr 22, Gliwice 1994.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Jarnuszkiewicz

Wpłynęło do Redakcji 30.11.1995 r.

Abstract

The main goal of this work was the comparison of the SI engine (126A.000-PF126 bis) performance for different alternative fuels. Relatively the least modification is required for feeding with natural gas (CNG), liquid gas called propane-butane (LPG) and fuel based on stabilized gasoline (GM20) worked out in Institute of Transport. SI engine fuels based on stabilized gasoline have an increased octane number by adding some quantity of methanol and alkohol stabilizer and ethyl fluid. Using all this constituents we worked out broad selection of fuels with octane number ranging from 70 to 94 whereas natural gasoline is 47 ON fuel. In computations the mixture with the highest ON was taken into accound. It consisted of 20% of methanol, 4% of stabilizer and 0,05% of ethyl fluid.

The computations show that the highest effective power is reached for an engine fed with gasoline fuel GM20 at least 5% higher than for petrol E94. The lower engine performance is showed respectively for propane-butane mixture (30/70, 50/50, 70/30%), and natural gas.

Feeding engines with gas fuels results in relatively much lose of power reaching 10-15% in comparison with engines fed with petrol was treated as the least useful one. In fact just before the whole mixture is closed in a cylinder only some of the fuel is in gas phase but the major part of it is in the form of tiny drops which is the result of carburettoring process and this is why we may expoct engine charge capacity and furthermore output power.