

ANALIZA WYBRANYCH PARAMETRÓW PROCESU SPALANIA OLEJU NAPĘDOWEGO W STANACH NIEUSTALONYCH PRACY SILNIKA SPALINOWEGO

Wincenty Lotko*, Rafał Longwic**, Krzysztof Górski***

*prof. dr hab. inż., Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn Politechniki Radomskiej

**dr inż., adiunkt, Katedra Pojazdów Samochodowych Politechniki Lubelskiej

***mgr inż., asystent, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn Politechniki Radomskiej

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań polegających na indykowaniu silników o ZS w stanach nieustalonych. Nieustalone stany pracy modelowano poprzez gwałtowne rozpędzanie nieobciążonego momentem zewnętrznym silnika, spowodowane skokiem jednostkowym dźwigni sterującej dawką paliwa. Obiektem badań był silnik o ZS z wtryskiem bezpośrednim AD3.152 i komorą wirową 4C90. Silniki zasilano olejem napędowym miejskim ONM oraz porównawczo olejem napędowym letnim ON. W wyniku przeprowadzonej analizy wyników badań ustalono w jakim stopniu zastosowanie paliwa ONM wpływa na podstawowe parametry procesu spalania (p_{cmax} – maksymalne ciśnienie spalania, p_i – średnie ciśnienie indykowane, α_{ps} – kąt początku spalania, $(dp/d\alpha)_{max}$ – maksymalna prędkość narastania ciśnienia) w stanach nieustalonych.

1. Wprowadzenie

Nowe ograniczenia norm emisji związków toksycznych spalin zmuszają do modyfikacji konstrukcji silników spalinowych, sposobu ich sterowania, a także do zmiany własności stosowanych paliw węglowodorowych. W celu ograniczenia emisji spalin pochodzących głównie ze środków komunikacji miejskiej, w roku 1995 wprowadzono olej napędowy miejski ONM [1]. Własności fizykochemiczne tego paliwa są różne w stosunku do standardowego oleju napędowego – tabela 1, co wynika z różnej technologii chemicznej ich produkcji.

Olej napędowy miejski charakteryzuje się większą liczbą cetanową w stosunku do oleju napędowego o około 5 jednostek (ok. 11%). Wskaźnik lepkości kinematycznej w temperaturze 40°C jest mniejszy w stosunku do oleju napędowego o około 20%. Różny jest również skład frakcyjny obu paliw. Różnice w wartości liczby cetanowej winny wpływać za zmniejszenie czasu samozapłonu ONM w stosunku do ON. Mniejsza lepkość ONM w stosunku do ON będzie oddziaływać na zmniejszenie dawki wtryskiwanego paliwa ONM, z uwagi na mniejsze wartości ciśnienia resztkowego w przewodach wtryskowych.

Tabela 1. Zestawienie własności fizykochemicznych oleju napędowego lekkiego ON i miejskiego ONM „Standard”

Numer normy		PN-92/C-96051 na oleje napędowe lekkie			ZN-94/MpiH/NF-213 na olej napędowy miejski ONM „Standard”
		DL	DP	DZ	
Rodzaj/Klasa					
Własności	Jednostka				
Liczba cetanowa n.w.		45			50
Indeks cetanowy n.w.		45			48
Skład frakcyjny: 5% v/v dest. do temp n.n. 50% v/v dest. do temp n.w. 95% v/v dest. do temp n.w.	°C	300	290	280	190 240 290
Do temp. 250 dest. n.w. Do temp. 350 dest. n.w. Do temp. 370 dest. n.w.	% v/v	85	90	-	-
Wskaźnik lepkości kinematycznej w 40°C n.n.	mm ² /s	1,9-4,7		1,7-3,7	1,5
Temperatura mętnienia n.w.	°C	-	0	-10	-25
Temperatura zablokowania zimnego filtra n.w.	°C	0	-12	-20	-30
Temperatura zapłonu n.n.	°C	45			55
Pozostałość po koksowaniu w 10% pozostałości destylacyjnej n.w.	% m/m	0,2			0,1
Pozostałość po spoieleniu n.w.	% m/m	0,01			0,01
Zawartość siarki n.w.	% m/m.	0,3			0,05
Działanie korodujące na płycie miedzianej w 50°C (3h) n.w.	Stopień korozji	wytrzymuje			1
Zawartość wody n.w.	mg/kg	-			500
Zawartość zanieczyszczeń mechanicznych n.w.	mg/kg	nie zawiera			nie zawiera
Gęstość w: 15°C 20°C	g/ml	-			0,80÷0,83 -
Stabilność termooksydacyjna n.w.	g/m ³	-			10

Przedstawione różnice parametrów fizykochemicznych obu paliw wpływają więc na przebieg procesu ich spalania w silniku o ZS. Należy ustalić kierunki tego wpływu zwłaszcza w niestabilnych stanach pracy silnika (rozpędzanie, hamowanie), gdyż stanowią one przeważającą część czasu pracy silników trakcyjnych w warunkach eksploatacji miejskiej [2].

Celem prezentowanej pracy było zatem:

- określenie podstawowych parametrów procesu spalania (p_{cmax} – maksymalnego ciśnienie spalania, p_i – średniego ciśnienie indykowane, α_{ps} – kąta początku spalania, $(dp/d\alpha)_{max}$ –

maksymalnej prędkości narastania ciśnienia) dla oleju napędowego miejskiego ONM i porównawczo oleju napędowego ON w stanach nieustalonych;

- ustalenie wpływu systemu spalania silnika o ZS (wtrysk bezpośredni, komora wirowa) na przebieg procesu spalania oleju napędowego miejskiego ONM.

Przedstawione badania poszerzają również wiedzę na temat przebiegu procesu spalania w silniku o ZS w stanach nieustalonych.

2. Badania doświadczalne

2.1. Metodyka badań

Badania polegały na indykowaniu silnika AD3.152 i 4C90 w stanach nieustalonych [2]. Stany nieustalone modelowano poprzez gwałtowne rozpędzanie nieobciążonego silnika spowodowane skokową zmianą położenia elementu sterującego dawką paliwa. Skok jednostkowy dźwigni sterującej dawką wymuszano siłownikiem elektromagnetycznym w chwili wybranej przez wykonującego pomiar. Czas przesuwu dźwigni sterującej do położenia maksymalnego można zaniedbać, gdyż wynosi on około 0,1 s i jest znikomo mały w stosunku do czasu trwania całego cyklu pomiarowego wynoszącego około 3 s.

Warunki początkowe pomiaru charakteryzuje stałość:

- początkowej prędkości obrotowej wału korbowego silnika - 800 obr/min (AD3.152), 950 obr/min (4C90);
- ustalony stan cieplny silnika - temperatura oleju 70°C.

W chwili gdy prędkość obrotowa wału korbowego i temperatura oleju pracującego silnika były równe wartościom ustalonym dla warunków początkowych operator wyzwał start pomiarów. System pomiarowy rozpoczął pomiar ciśnienia w komorze spalania od punktu określonego górnym zwrotnym położeniem tłoka (początek ssania). Po około 4÷8 cyklach pracy silnika uruchamiano przesuw listwy sterującej dawką paliwa. System pomiarowy rejestrował ciśnienia w komorze spalania dla 30 kolejnych cykli pracy. W zarejestrowanym cyklu pomiarowym (30 kolejnych cykli pracy silnika) można wyróżnić trzy okresy pracy silnika:

- I. $n=800$ obr/min (950 obr/min), $t_{oleju}=70^{\circ}\text{C}$, położenie dźwigni sterującej dawką paliwa $x\cong\text{const}$, przyspieszenie kątowe wału korbowego silnika $\varepsilon=0$;
- II. okres ten można podzielić na dwa podokresy: 1- $n\neq\text{const}$, nieustalony stan cieplny silnika, $x=x_{\text{max}}$, $\varepsilon\neq 0$; 2- rozpoczynający się od chwili zadziałania regulatora pompy wtryskowej $n\neq\text{const}$, nieustalony stan cieplny silnika, $x\neq\text{const}$, $\varepsilon\neq 0$. Dalszej analizie poddano pierwszy z omawianych podokresów.
- III. $n=n_{\text{max}}$, quasi ustalony stan cieplny silnika, $x\cong\text{const}$, $\varepsilon=0$.

Wykonano po 10 powtórzeń pomiarów dla danego stanu pracy silnika określonego rodzajem użytego paliwa. Eliminowano pomiary, w których moment skoku dźwigni sterującej dawką nie przypadła na cykl ssania w indykowanym cylindrze. Dalszej analizie poddano jeden cykl pracy silnika w I okresie (ostatni w tym okresie) i oznaczono go 1, około 9 cykli pracy silnika (AD3.152) w II okresie (17 cykli dla silnika 4C90) i oznaczono je 2..10 (18) oraz jeden cykl pracy silnika w III okresie (ostatni w tym okresie) i oznaczono go np.11 (zależnie od liczby analizowanych cykli w okresie II). Analizowano zatem 11 cykli pracy silnika AD3.152 i 19 cykli pracy silnika 4C90 dla jednego powtórzenia pomiaru.

2.2 Charakterystyka obiektów badań

Obiektem badań był silnik z wtryskiem bezpośrednim AD3.152 i silnik 4C90 z komorą wirową. Podstawowe dane techniczne silników przedstawiono w tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Zestawienie danych technicznych silnika AD3.152 i 4C90

	AD3.152	4C90
Moc	28 kW przy 2000 obr/min	51,5kW przy 4200 obr/min
Rodzaj wtrysku	bezpośredni	pośredni
Maksymalny moment obrotowy	139,6 Nm przy 1300 obr/min	146 przy 2500 obr/min
Prędkość obrotowa biegu jałowego	750 obr/min	800 obr/min
Pojemność silnika	2502 cm ³	2417 cm ³
Liczba cylindrów	3	4
Stopień sprężania	16,5:1	20,6:1
Srednica cylindra	91,4 mm	90 mm
Jednostkowe zużycie paliwa	228 gkW/h	-
Układ paliwowy	pompa rotacyjna CAV-DPA, końcówki rozpylacza typ A.38	pompa wtryskowa rzędowa Motorpal
Nominalny kąt dynamicznego początku tłoczenia - α_{dpt}	15°OWK przed GMP	12°OWK przed GMP
Ciśnienie otwarcia wtryskiwaczy	17,5 MPa	15 MPa

Silniki zasilano olejem napędowym miejskim ONM „Standard” i porównawczo olejem napędowym letnim ON. Parametry fizykochemiczne paliw użytych do badań zamieszczono w tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Parametry fizykochemiczne paliw użytych do badań (oleju napędowego letniego i oleju napędowego miejskiego)

Parametr	Jednostka	ON letni	ONM „Standard”
Indeks cetanowy	-	47,4	49,8
Lepkość kinematyczna w 40°C	mm ² /s	2,25	1,77
Gęstość w 20°C	g/ml	0,8285	0,8135
Temperatura zapłonu	°C	59	73
Temperatura mętnienia	°C	-4	-35
Temperatura zablokowania zimnego filtra	°C	-7	-38
Zawartość siarki	% m/m	0,135	0,028

Badania przeprowadzono za pomocą systemu pomiarowego do pomiaru i rejestracji parametrów szybkozmiennych pracy silnika [4]. System pomiarowy umożliwiał jednoczesną rejestrację: ciśnienia w komorze spalania, ciśnienia przed wtryskiwaczem, wzniosu iglicy wtryskiwacza i prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Rejestracji dokonywano 512 razy w czasie jednego obrotu wału korbowego silnika tj. co około 0,7°OWK.

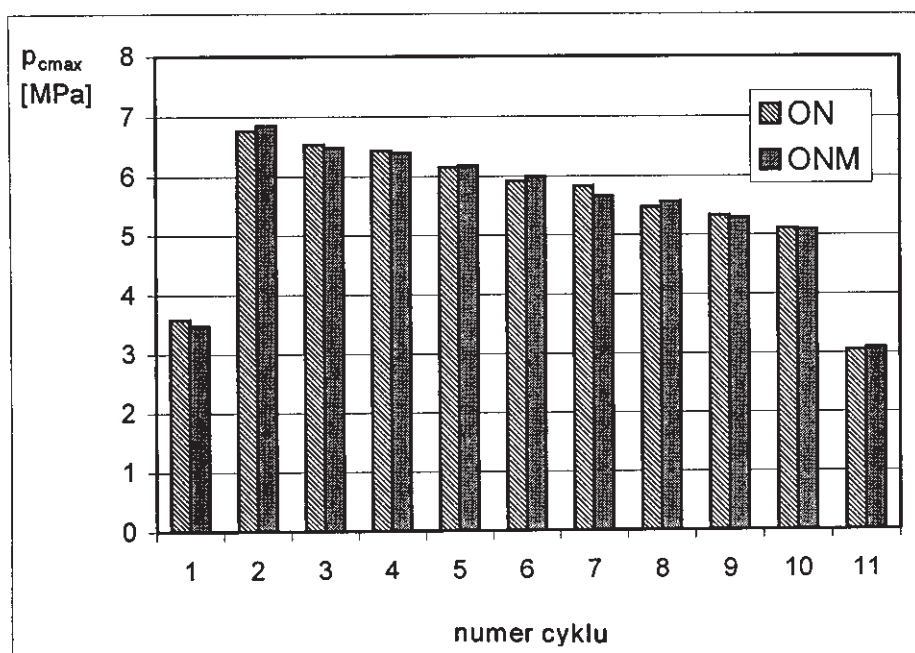
3. Analiza wyników badań

Otrzymane przebiegi wartości ciśnień w komorze spalania poddano numerycznemu całkowaniu, w celu wyznaczenia średniego ciśnienia indykowanego p_i oraz różniczkowaniu, w celu wyznaczenia maksymalnej prędkości narastania ciśnienia $(dp/d\alpha)_{max}$. Dodatkowo określono maksymalną wartość ciśnienia spalania p_{cmax} oraz kąt początku spalania α_{ps} . Wyniki badań uśredniono z 10 powtórzeń rozpędzeń silnika, zgodnie z przyjętą metodyką badań. Otrzymane wyniki badań przedstawiono na kolejnych rysunkach od rys.1 do rys.9.

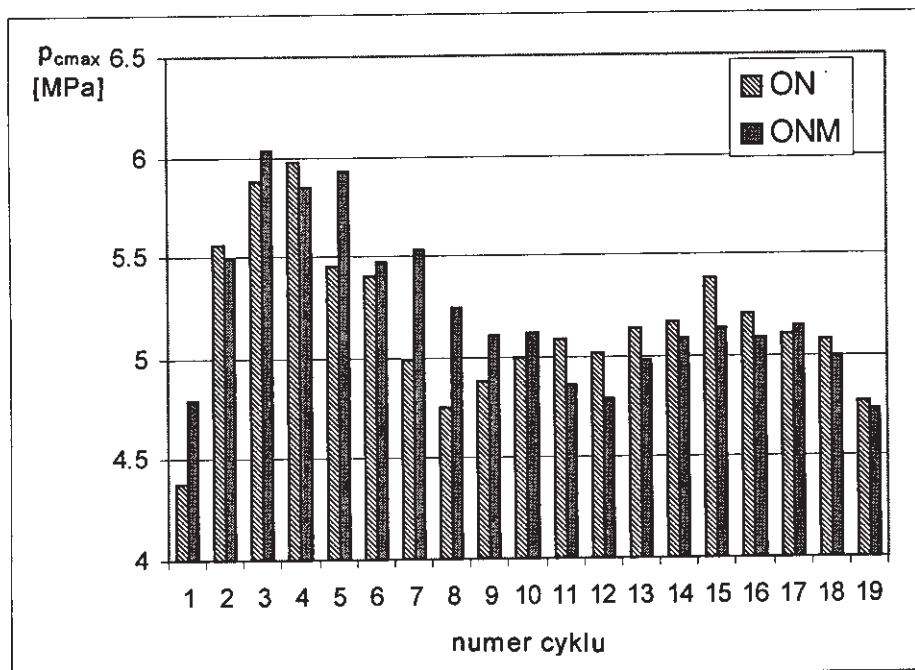
Na rysunkach 1 i 2 zobrazowano wartości ciśnienia maksymalnego p_{cmax} w cylindrze, w kolejnych cyklach pracy silnika AD3.152 i 4C90 podczas swobodnego rozpędzania, przy zasilaniu olejem napędowym ON i olejem napędowym miejskim ONM. Zasilanie silnika AD3.152 olejem napędowym miejskim ONM powodowało nieznaczny wzrost maksymalnych ciśnień spalania w stosunku do zasilania olejem napędowym ON. Dla silnika 4C90 obserwowano większe ciśnienia maksymalne dla ONM do 10 cyklu rozpędzania silnika, w cyklach 11-19 większe wartości ciśnienia maksymalnego uzyskiwano dla oleju napędowego. Maksymalne różnice pomiędzy wartościami maksymalnych ciśnień spalania dla ON i ONM były dla silnika 4C90 znaczące i wynosiły około 0,5MPa.

Na rysunku 3 i 4 przedstawiono wartości średniego ciśnienia indykowanego p_i w cylindrze, w kolejnych cyklach pracy silnika AD3.152 i 4C90 podczas swobodnego rozpędzania, przy zasilaniu olejem napędowym ON i olejem napędowym miejskim ONM. Na rysunku 5 pokazano względne zmiany wartości średniego ciśnienia indykowanego p_i dla oleju napędowego miejskiego w stosunku do oleju napędowego, w kolejnych cyklach pracy silnika AD3.152 i 4C90 podczas swobodnego rozpędzania. Wartości średniego ciśnienia indykowanego silnika AD3.152 były większe przy zasilaniu ONM w stosunku do ON maksymalnie o około 8% podczas całego procesu swobodnego rozpędzania silnika. Dla silnika 4C90 większe średnie ciśnienia indykowane dla ONM w stosunku do ON występowało do 12 cyklu rozpędzania silnika. Maksymalny wzrost średniego ciśnienia indykowanego dla ONM w stosunku do ON wynosił około 17%. W cyklach od 12 do 18 większe średnie ciśnienia indykowane uzyskiwano dla oleju napędowego, maksymalnie o około 27%. Na tak duże różnice wartości średnich ciśnień indykowanych silnika 4C90 ma zapewne wpływ zły stan aparatury wtryskowej badanego obiektu, choć trudno jest na obecnym etapie badań wyjaśnić tak duże różnice w obserwowanych wartościach p_i . Na uwagę zasługuje również różna ilość cykli pracy silników potrzebna do uzyskania prędkości maksymalnej w procesie swobodnego rozpędzania. Dla silnika AD3.152 jest to 9 cykli pracy a dla silnika 4C90 17 cykli pracy podczas swobodnego rozpędzania.

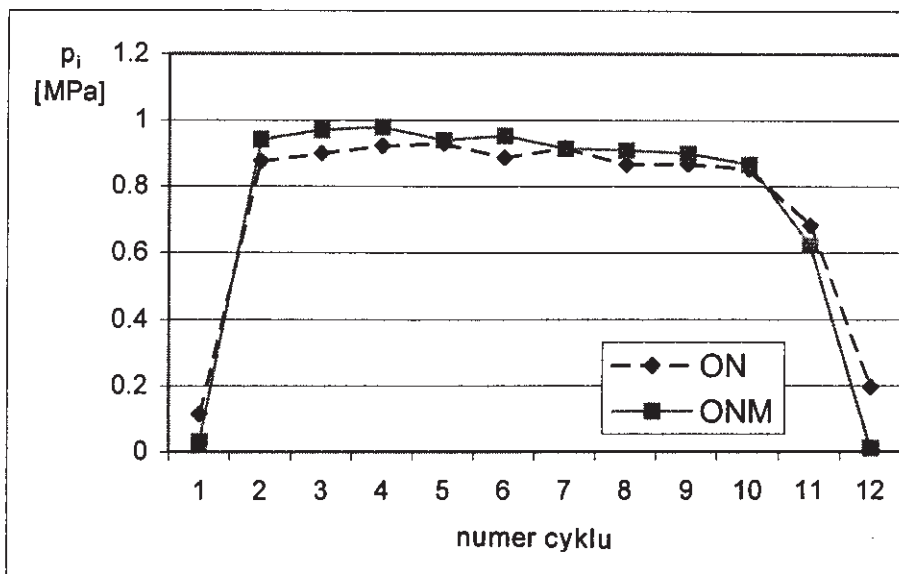
Zarówno dla silnika AD3.152 jak i 4C90 (w pierwszej fazie rozpędzania tj. do 12 cyklu pracy silnika) średnie ciśnienia indykowane są większe dla oleju napędowego miejskiego w stosunku do oleju napędowego. Może to być spowodowane zwiększeniem się kąta występowania początku spalania dla ONM na skutek opóźnienia początku wtrysku. Kąt początku wtrysku powinien być mniejszy dla ONM gdyż mniejsza lepkość tego paliwa oddziałuje w kierunku zmniejszenia ciśnienia resztkowego w przewodach wtryskowych. Superpozycja powyższych zjawisk wpływa na zwiększenie pola pracy dodatkowo na wykresie indykatorowym dla ONM i wzrost średnich ciśnień indykowanych. Nie bez znaczenia jest również większa liczba cetanowa ONM w stosunku do ON. Większa zdolność paliwa do samozapłonu jest szczególnie istotna w stanach nieustalonych gdyż zwłoka samozapłonu zwiększa się w stosunku do stanów ustalonych pracy silnika [5]. Porównywalne wartości ciśnień maksymalnych dla silnika AD3.152 przy zasilaniu ON i ONM skłaniają więc do wniosku, że powodem wzrostu średnich ciśnień indykowanych jest lepszy przebieg procesu spalania ONM w stanach nieustalonych.



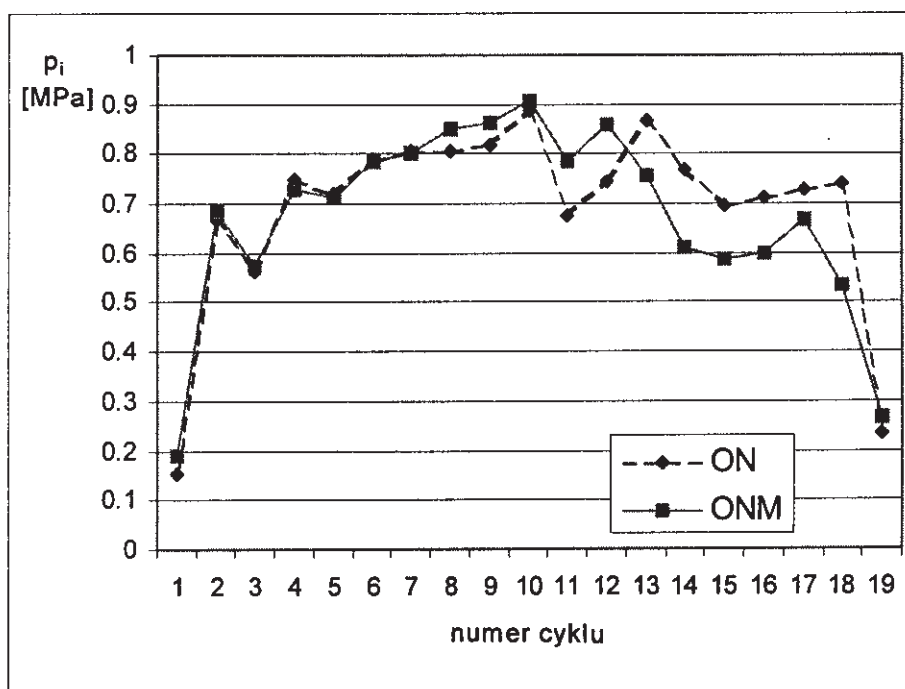
Rys. 1. Wartości ciśnienia maksymalnego p_{cmax} w cylindrze, w kolejnych cyklach pracy silnika AD3.152 podczas swobodnego rozpędzania, przy zasilaniu olejem napędowym ON i olejem napędowym miejskim ONM



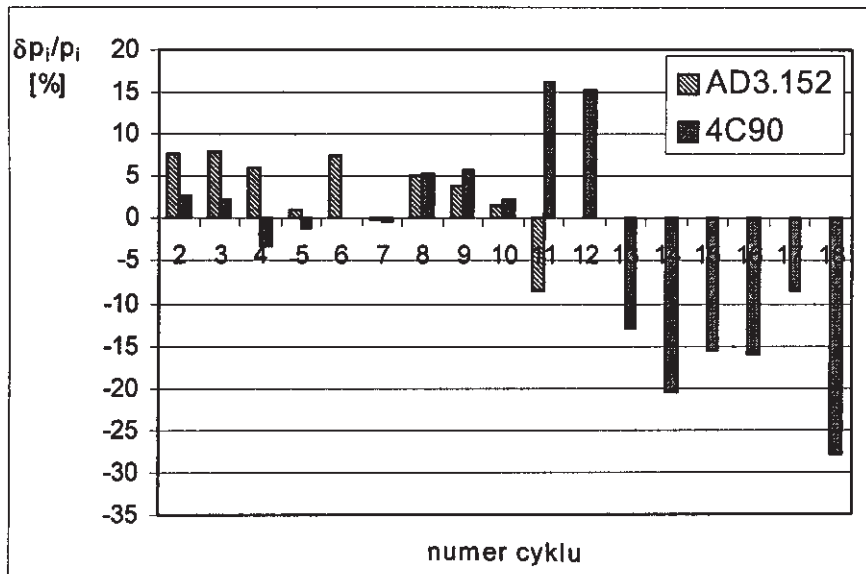
Rys. 2. Wartości ciśnienia maksymalnego p_{cmax} w cylindrze, w kolejnych cyklach pracy silnika 4C90 podczas swobodnego rozpędzania, przy zasilaniu olejem napędowym ON i olejem napędowym miejskim ONM



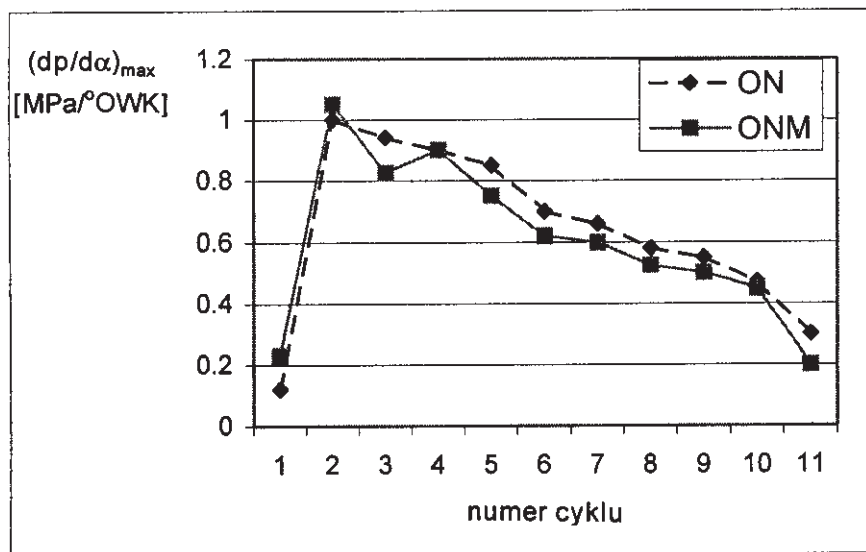
Rys. 3. Wartości średniego ciśnienia indykowanego p_i , w kolejnych cyklach pracy silnika AD3.152 podczas swobodnego rozpędzania, przy zasilaniu olejem napędowym ON i olejem napędowym miejskim ONM



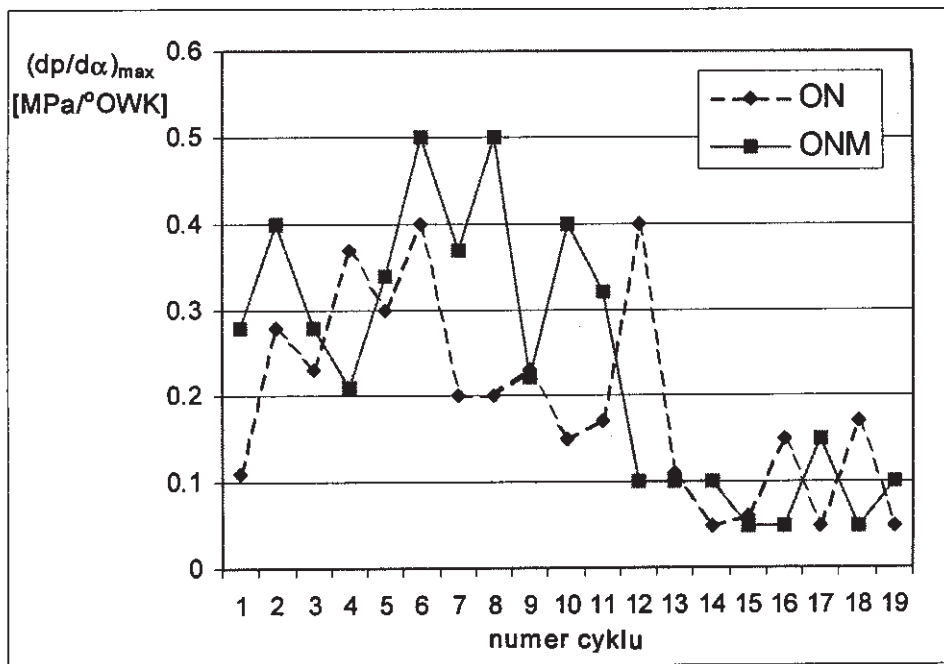
Rys. 4. Wartości średniego ciśnienia indykowanego p_i , w kolejnych cyklach pracy silnika 4C90 podczas swobodnego rozpędzania, przy zasilaniu olejem napędowym ON i olejem napędowym miejskim ONM



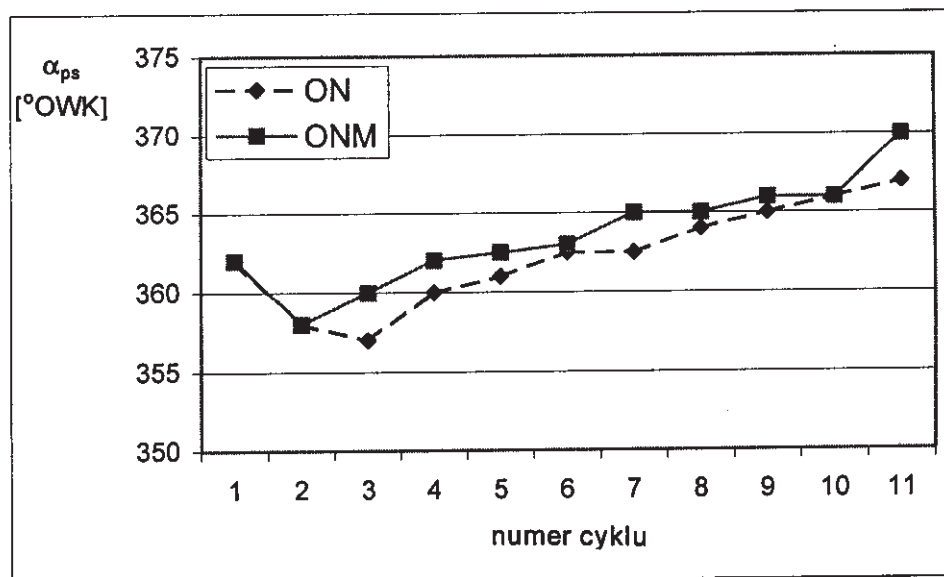
Rys. 5. Względne zmiany wartości średniego ciśnienia indykowanego p_i dla oleju napędowego miejskiego w stosunku do oleju napędowego, w kolejnych cyklach pracy silnika AD3.152 i 4C90 podczas swobodnego rozpędzania



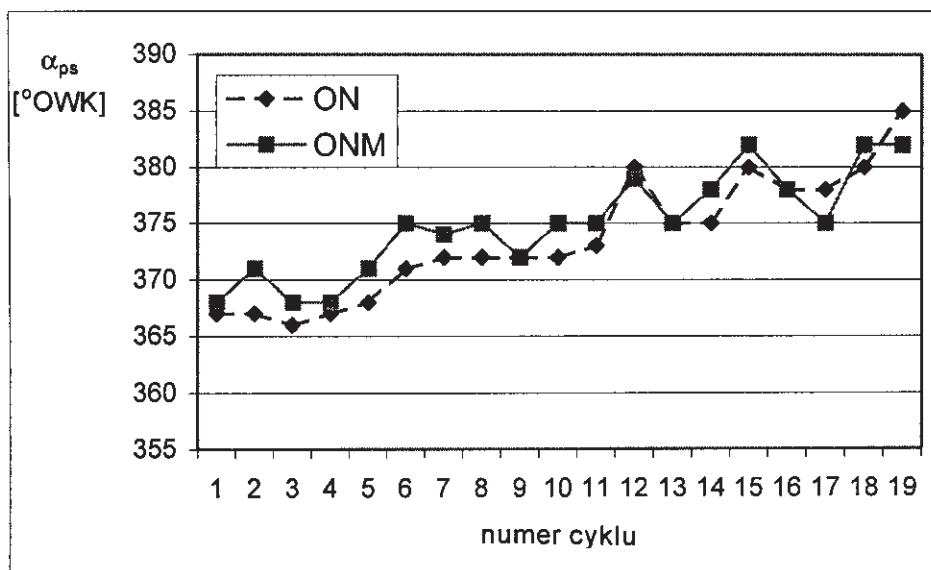
Rys. 6. Wartości maksymalnej prędkości narastania ciśnienia $(dp/d\alpha)_{max}$, w kolejnych cyklach pracy silnika AD3.152 podczas swobodnego rozpędzania, przy zasilaniu olejem napędowym ON i olejem napędowym miejskim ONM



Rys. 7. Wartości maksymalnej prędkości narastania ciśnienia $(dp/d\alpha)_{max}$, w kolejnych cyklach pracy silnika 4C90 podczas swobodnego rozpędzania, przy zasilaniu olejem napędowym ON i olejem napędowym miejskim ONM



Rys. 8. Wartości kąta występowania początku spalania α_{ps} , w kolejnych cyklach pracy silnika AD3.152 podczas swobodnego rozpędzania, przy zasilaniu olejem napędowym ON i olejem napędowym miejskim ONM



Rys. 9. Wartości kąta występowania początku spalania α_{ps} , w kolejnych cyklach pracy silnika 4C90 podczas swobodnego rozpędzania, przy zasilaniu olejem napędowym ON i olejem napędowym miejskim ONM

Na rysunku 8 i 9 zobrazowano wartości kąta występowania początku spalania α_{ps} , w kolejnych cyklach pracy silnika AD3.152 i 4C90 podczas swobodnego rozpędzania, przy zasilaniu olejem napędowym ON i olejem napędowym miejskim ONM. Początek spalania paliwa ONM występuje później niż dla ON w obu z badanych silników. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wału korbowego silnika różnice te maleją. Ma to ścisły związek z uzyskiwanymi wartościami średnich ciśnień indykowanych co wyjaśniono już na początku rozdziału.

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wartości maksymalnej prędkości narastania ciśnienia w cylindrze $(dp/d\alpha)_{max}$, w kolejnych cyklach pracy silnika AD3.152 i 4C90 podczas swobodnego rozpędzania, przy zasilaniu olejem napędowym ON i olejem napędowym miejskim ONM. Dla silnika AD3.152 maksymalne prędkości narastania ciśnienia są mniejsze dla ONM w stosunku do oleju napędowego. Potwierdza to tezę o bardziej przewlekłym procesie spalania ONM w stosunku do ON, co skutkuje zwiększeniem pola pracy dodatniej na wykresie indykatorowym. Kierunek zmian maksymalnej prędkości narastania ciśnienia w cylindrze silnika 4C90 jest dla obu paliw niejednoznaczny, co jest spowodowane wspomnianym już złym stanem technicznym aparatury wtryskowej.

Reasumując można stwierdzić, że zarówno dla silnika AD3.152 jak i 4C90 (w początkowej fazie rozpędzania) uzyskuje się większe wartości średnich ciśnień indykowanych przy zastosowaniu oleju napędowego miejskiego w stosunku do oleju napędowego. Początek spalania ONM występuje później niż dla oleju napędowego, a maksymalne prędkości narastania ciśnienia osiągają mniejsze wartości niż dla ON. Wpływ na osiągnięte parametry procesu spalania ONM ma mniejsza lepkość ONM w stosunku do ON, większa liczba cetanowa oraz specyfika przebiegu procesu spalania w stanach nieustalonych [5].

4. Wnioski

Przeprowadzone badania doświadczalne pozwalają stwierdzić, że:

- 1 Zasilanie silnika AD3.152 olejem napędowym miejskim ONM powoduje nieznaczny wzrost maksymalnych ciśnień spalania w stosunku do zasilania standardowym olejem napędowym w warunkach swobodnego rozpędzania silnika.
- 2 Dla silnika 4C90 obserwowano większe ciśnienia maksymalne dla ONM do 10 cyklu podczas rozpędzania silnika, w cyklach 11-19 większe wartości ciśnienia maksymalnego uzyskiwano dla standardowego oleju napędowego. Maksymalne różnice pomiędzy wartościami maksymalnych ciśnień spalania dla ON i ONM były dla silnika 4C90 znaczące i wynosiły około 0,5MPa.
- 3 Zarówno dla silnika AD3.152 jak i 4C90 (w pierwszej fazie rozpędzania, tj. do 12 cyklu pracy silnika) średnie ciśnienia indykowane są większe dla oleju napędowego miejskiego w stosunku do oleju napędowego.
- 4 Wzrost średnich ciśnień indykowanych dla oleju napędowego miejskiego może być spowodowany zwiększeniem pola pracy dodatniej na wykresie indykatorowym, na skutek późniejszego początku spalania dla ONM w stosunku do ON. Nie bez znaczenia jest tutaj mniejsza lepkość ONM skutkująca mniejszymi ciśnieniami reszkowymi w przewodzie wtryskowym, a więc mniejszym kątem początku wtrysku.
- 5 Maksymalna prędkość narastania ciśnienia jest dla oleju napędowego miejskiego mniejsza w stosunku do oleju napędowego, co świadczy o łagodniejszym i bardziej przewlekłym procesie spalania.
- 6 Proces spalania oleju napędowego miejskiego przebiega w stanach nieustalonych odmiennie w stosunku do stanów ustalonych [3]. Zarówno maksymalne ciśnienia spalania jak i średnie ciśnienia indykowane są bowiem w stanach ustalonych nieznacznie mniejsze dla ONM w stosunku do ON. Jest to spowodowane specyfiką przebiegu procesu spalania w stanach nieustalonych stany pracy silnika. Należy zatem prowadzić dalsze prace badawcze, które pozwolą na pełną identyfikację obserwowanych zjawisk w stanach nieustalonych.

Bibliografia

- [1] Bedyk J.: *Olej napędowy miejski ONM „Standard”*. Paliwa, Oleje i Smary w Eksploatacji Nr 17/1995.
- [2] Lotko W., Longwic R.: *Nieustalone stany pracy silnika zasilanego paliwem rzepakowym*. Monografia. Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu, 1999.
- [3] Lotko W.: *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami węglowodorowymi i roślinnymi*. WNT, Warszawa 1997.
- [4] Różycki A.: *Pomiary ciśnień szybkozmiennych w silniku o zapłonie samoczynnym*. Praca zamawiana, Politechnika Radomska 1996.
- [5] Szestuchin V.I.: *Rabota awtomobilnowo dizielnowo dwigatielia pri nieustanowiwsze-sja nazgruzkie*. Moskwa 1996.

STUDY OF CHOSEN PARAMETERS OF THE COMBUSTION PROCESS OF DIESEL FUEL IN TRANSIENT CONDITIONS

Summary. For the last years a lot of investigations have been carried out with city diesel fuel (ONM) as a fuel for diesel engines. These investigations concerned steady state work conditions. The results of the indication of diesel AD3.152 and 4C90 in transient conditions have been presented in this paper. The tested engines was fuelled with city diesel fuel (ONM) and diesel fuel (ON). The physical-chemical properties of used fuels have been presented. Transient work conditions were modelled by free running engine acceleration caused by the changes of injection pump control lever position. The following parameters were analysed: p_i – mean indicated pressure, p_{cmax} – maximum pressure, $(dp/d\alpha)_{max}$ – maximum pressure increase velocity, α_{ps} – the burning start angle.