

APPLICATION A EMISSION COMPONENTS OF EXHAUST GASES TO ESTIMATION TECHNICAL STATE OF THE MARINE DIESEL ENGINE INJECTORS

Jan Monieta

Akademia Morska

70-500 Szczecin, ul. Wały Chrobrego 2
fax: (091) 48 09 575, tel. (091) 48 09 415
e-mail: jmonieta@wsm.szczecin.pl

Abstract

The paper presents preliminary investigations of application of the emission components of exhaust gases to estimation technical state of marine diesel engine injector in operating phase. There have been investigated connexions portion in exhaust gases carbon monoxide and carbon dioxide, nitric oxides, oxygen and another parameters with of load indicator. The load indicator is connexion with injection dose and technical state. Composition of exhaust gases measured by means of computer analyser of exhaust gases type IMR 3000 P. The investigation results have been referred to another diagnostic parameters of working processes. Has been too investigated effect of amplitude pressure in injection pipe on the portion of exhaust gases.

Investigations have been leaded on the six-cylinder and medium-speed engine Sulzer in laboratory conditions. Have been obtained for some portions and parameters of exhaust gases linear dependences in function load indicator, similarly as another parameters of working processes.

Keyword: marine diesel engines, emission of exhaust gases, technical state

ZASTOSOWANIE SKŁADNIKÓW EMISJI SPALIN WYLOTOWYCH DO OCENY STANU TECHNICZNEGO WTRYSKIWACZY SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

Streszczenie

Przedstawiono wstępne badania zastosowania emisji składników spalin wylotowych do oceny stanu technicznego wtryskiwaczy silników okrętowych w fazie eksploatacji. Badano związki udziału w spalinach tlenku i dwutlenku węgla, tlenków azotu, tlenu i innych parametrów ze wskaźnikiem obciążenia. Wskaźnik obciążenia związany jest z dawką wtryskiwanego paliwa, a ta ze stanem technicznym wtryskiwacza. Skład spalin mierzono za pomocą komputerowego analizatora spalin typu IMR 3000 P. Wyniki badań odniesiono do innych parametrów diagnostycznych procesów roboczych. Badano także wpływ amplitudy ciśnienia w przewodzie wtryskowym na udział składników spalin.

Badania prowadzono na sześciocylindrowym silniku średnioobrotowym Sulzer w warunkach laboratoryjnych. Uzyskano dla udziału niektórych składników i parametrów spalin zależności liniowe w funkcji wskaźnika obciążenia, podobnie jak dla większości innych parametrów procesów roboczych.

Słowa kluczowe: silniki okrętowe, emisja spalin, stan techniczny

1. Wstęp

W okrętowych silnikach spalinowych procesowi spalania towarzyszy wydalanie do atmosfery związków szkodliwych wraz z innymi produktami spalania. Uwzględniając globalne, roczne zużycie paliwa w transporcie morskim, są to znaczne ilości zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery.

W obecnym czasie liczba statków eksploatowanych na morzach i oceanach przewyższa 34 000, na 98% których zamontowane są tłokowe silniki spalinowe. Jeden silnik wysokoprężny o mocy 10 000 kW codziennie emituje 4 t NO_x . Kieżowniki i tankowce oceaniczne mogą emitować do 1 t NO_x w ciągu godziny. Przy pracy 6 000 godzin w ciągu roku emisja NO_x transportu morskiego osiąga 10 mln t codziennie [2].

Moc obecnie eksploatowanych silników okrętowych osiąga ponad 50 000 kW i ma tendencję wzrostową. Ilość substancji toksycznych produkowana przez silnik tej mocy wynosi 20÷25 ton na dobę [7]. Substancje toksyczne stanowią około 0,20÷0,26% masy spalin, co stanowi 16÷22 g zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery na 1 kWh energii.

Dlatego uznano, że rozwiązanie tych problemów, zarówno na drodze regulacji prawnych, jak i odpowiednich rozwiązań technicznych, jest niezbędne. W związku z tym z 1. stycznia 2000 roku zostały wprowadzone ograniczenia NO_x dla nowych statków. Dane organizacji IMO (International Maritime Organisation) norm emisji dla niskoobrotowych silników wysokoprężnych wynoszą 14–16 g/kW·h, dla wysokoobrotowych 10÷11 g/kW·h. Rozpatrywane są możliwości niższenia NO_x przy pracy na paliwowo-wodnych emulsjach i innymi metodami.

Nadmierna emisja składników spalin przez tłokowy silnik spalinowy związana jest często z jego stanem niezdatności. Diagnostowanie, zatem silnika z wykorzystaniem toksycznych składników spalin może pozwolić na jednoczesną ocenę stanu technicznego oraz ocenę wpływu silnika na środowisko naturalne. Taką, zatem próbę podjęto w niniejszej pracy.

2. Skład spalin okrętowych silników tłokowych oraz ich wpływ na środowisko naturalne

Skład spalin okrętowych silników tłokowych zależy w głównej mierze od stanu technicznego i parametrów procesu spalania, składu i jakości użytego paliwa oraz składu i parametrów powietrza dostarczonego do procesu spalania.

Spaliny stanowią mieszaninę składników powietrza dostarczanego do komory spalania i nie biorących udziału w procesie spalania, takich jak: azot, gazy obojętne oraz produkty powstałe w wyniku reakcji spalania, wśród których dwutlenek węgla CO_2 , para wodna H_2O , tlenki siarki SO_x oraz inne związki, tworzące się w wyniku niepożądanych reakcji oraz niezupełnego i niecałkowitego spalania. Do ostatnich należą: tlenek azotu, tlenki azotu NO_x , tlenek węgla, CO, węglowodory C_xH_y , cząstki stałe jak sadza, popiół i inne).

Koncentracja tlenków azotu w spalinach jest wśród zanieczyszczeń największa. Tlenki azotu powodują powstawanie smogu i kwaśnych deszczów. Szczególnie duże ilości NO tworzą się podczas procesu spalania w wolnoobrotowych silnikach dwusuwowych. Mała prędkość obrotowa tych silników pozwala na wydłużony czas reakcji, a wysokie temperatury w komorze spalania sprzyjają powstawaniu tych związków.

3. Ograniczenia w emisji składników spalin

We wrześniu 1997 roku przyjęto Aneks do Konwencji MARPOL 73/78, który obejmuje między innymi regulacje dotyczące emisji tlenków azotu, tlenków siarki i lotnych substancji organicznych [10]. Regulacja 13 Aneksu określa dopuszczalny poziom tlenków azotu, w spalinach silników okrętowych o mocy powyżej 130 kW, w zależności od prędkości obrotowej silnika.

Regulacja 14 Aneksu VI określa ograniczenia tlenków siarki – SO_x . Dla akwenów zamkniętych, do których należy również Morze Bałtyckie, określono dopuszczalną zawartość siarki w paliwie do 1,5%. Zgodnie z wymaganiami kodeksu Marpol każdy silnik o mocy od 130 kW powinien zostać poddany następującym przeglądom:

- wstępnemu przed instalacją silnika na statku, który jest przeprowadzany z reguły przez producenta silnika;
- zasadniczemu po zamontowaniu silnika na statku, lecz przed rozpoczęciem jego eksploatacji oraz gdy przeprowadzona została znaczna jego modyfikacja;
- okresowym i pośrednim, które powinno się przeprowadzić jako część całościowego przeglądu statku.

Postanowienia zawarte w kodeksie nakładają na producentów i użytkowników silników okrętowych obowiązek działań zmierzających do utrzymania emisji tlenków azotu na możliwie niskim poziomie. Wymogi takie skłaniają do certyfikowania silników w okresie eksploatacji, co zmusza użytkowników statków do stałej kontroli eksploatowanych silników pod względem ich uciążliwości dla środowiska.

4. Metoda badań

Emisja związków szkodliwych w spalinach zależy w znacznym stopniu od stanu technicznego silnika w reprezentatywnych warunkach [4], w tym szczególnie od stanu aparatury paliwowej [1, 3, 7, 8, 9].

W badaniach stanowiskowych kompletnego silnika przydatność parametrów diagnostycznych podjęto na podstawie ich związków z wskaźnikiem obciążenia. Wskaźnik obciążenia, to mechaniczny wskaźnik związany z listwą paliwową, pokazujący aktualne wysunięcie listwy paliwowej, sterującej dawkowaniem pomp wtryskowej w skali jedenastostopniowej.

Posłużono się eksperymentem czynnym, stosując plan statyczny zdeterminowany selekcyjny wielokrotny [5]. Eksperyment ten polegał na pomiarze parametrów diagnostycznych, przy zmianie jednej wielkości wejściowej (wskaźnika obciążenia) i ustaleniu poziomów pozostałych wielkości wejściowych. Parametry wyjściowe obiektu Y zależą od pewnej liczby wielkości wejściowych X , przy jednoczesnym oddziaływaniu wielkości zakłócających Z oraz istnieniu wielkości stałych C_s :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i; z_1, z_2, \dots, z_i; c_{s1}, c_{s2}, \dots, c_{sj}) \quad (1)$$

Wielkością wejściową, zmienianą stopniowo od 2 do 7, był wskaźnik obciążenia. W czasie trwania pomiarów starano się, aby prędkość obrotowa silnika była cały czas utrzymywana na stałym poziomie ($n = 700$ obr/min), ponieważ silniki 6AL 20/24D pracują również jako napęd prądnic i mają wtedy stałą prędkość obrotową. Była to również optymalizowana prędkość obrotowa wybrana w badaniach wstępnym systemu wtryskowego. Wyniki pomiarów były na bieżąco zapisywane w pamięci komputerów i analizatora spalin oraz drukowane.

Badano również wpływ amplitudy ciśnienia w przewodzie wtryskowym wysokiego ciśnienia, przed wtryskiwaczem, na toksyczność spalin. Parametry diagnostyczne odniesiono do innych parametrów procesów roboczych i towarzyszących. Emisję spalin badano z wszystkich cylindrów, natomiast pozostałe parametry diagnostyczne dotyczyły tylko jednego cylindra.

5. Stanowisko badawcze

Badania dotyczyły wtryskiwaczy średniobrotowego okrętowego silnika spalinowego napędu głównego typu 6AL20/24, znajdującego się w Laboratorium Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Szczecinie. Widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego silnika okrętowego 6AL20/24
 Fig. 1. View of a measuring stand of a 6AL20/24 marine diesel engine

Charakterystyczne dane silnika i wtryskiwacza były następujące:

silnik	6AL 20/24,
licencja	Sulzer,
moc nominalna	397 kW,
prędkość obrotowa nominalna	720 obr/min,
ciśnienie zasilania paliwem	$p_z = 0,2 \div 0,25$ MPa,
ciśnienie otwarcia wtryskiwaczy	$p_{wo} = 40$ MPa,
maksymalny skok iglicy rozpylacza	$h_{max} = 0,5$ mm,
liczba otworków rozpylających	$i_r = 9$,
średnica otworu rozpylającego	$d_r = 0,23$ mm.

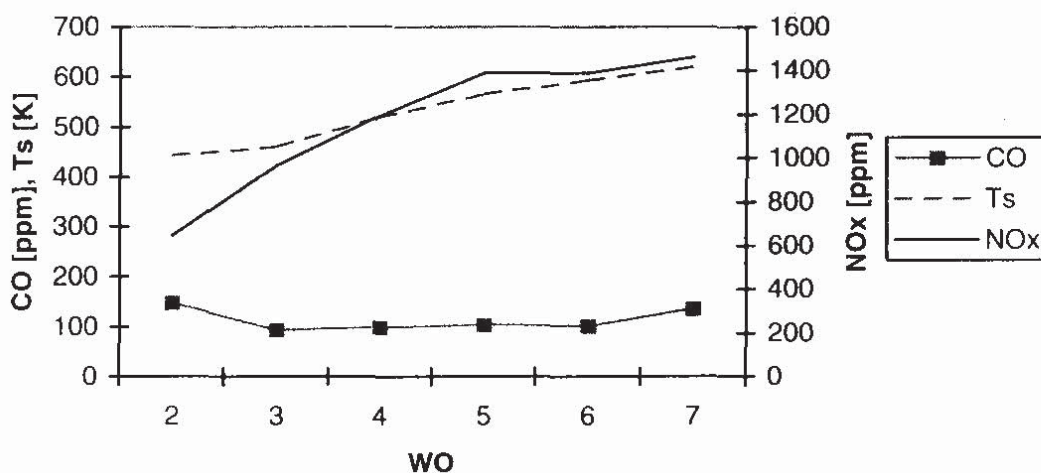
Diagnostyka eksploatacyjna ma na celu określenie stanu technicznego silnika bez jego demontażu lub z demontażem częściowym, nie powodującym zmiany stanu technicznego. W metodzie tej nie występuje ingerencja w konstrukcję silnika, a tylko w przewód wtryskowy oraz przewód wylotu spalin.

Do analizy spalin wylotowych wykorzystano komputerowy analizator spalin typu IMR 3000 P. Jest on przenośnym, wielozadaniowym miernikiem, wyposażonym w monitor i drukarkę. Mierzy on stężenie O_2 , CO_2 , CO , NO_x , NO_2 , H_2S oraz temperaturę powietrza i spalin, straty gazów wylotowych, współczynnik nadmiaru powietrza, zawartość sadzy, a także wyznacza współczynnik nadmiaru powietrza oraz sprawność spalania.

6. Wybrane wyniki badań

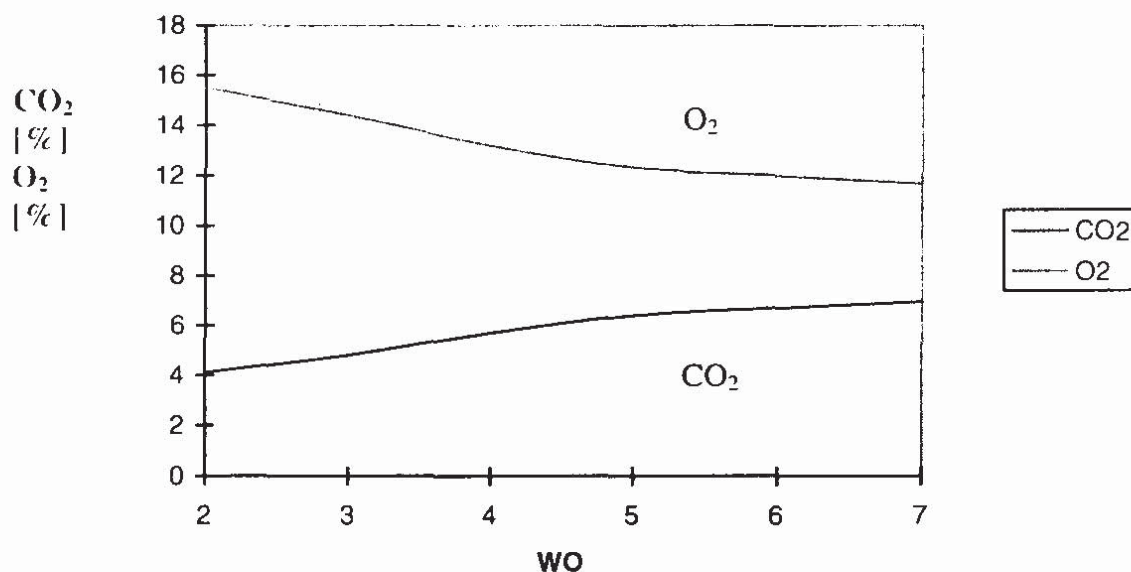
Rezultaty badań wpływu wskaźnika obciążenia na wartości udziału składników spalin oraz ich parametry przedstawiono na rys. 2 ÷ 5. Przyjęto założenie, że jeżeli symptomy te będą współzmiennicze z wskaźnikiem obciążenia, to również będą skorelowane ze stanem technicznym wtryskiwaczy w badaniach zasadniczych kompletnego silnika.

Przykładowe wyniki badań wpływu wskaźnika obciążenia na wartości udziału tlenu węgla w spalinach, tlenków azotu NO_x i temperatury spalin przedstawiono na rys. 2. Z rysunku wynika, że otrzymano związki nieliniowe poza temperaturą spalin.



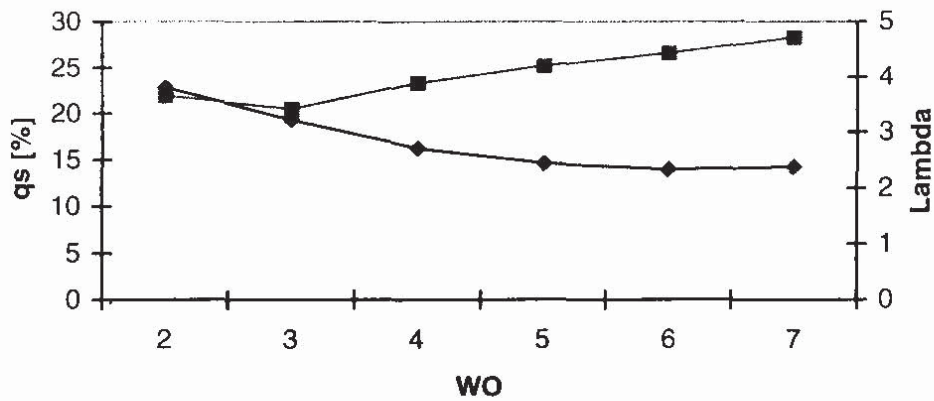
Rys. 2. Wpływ wskaźnika obciążenia WO na emisję tlenku węgla CO, tlenków azotu NO_x oraz temperaturę spalin T_s
 Fig. 2. Effect of load indicator WO on the emission of carbon monoxide CO, nitrogen oxygen NO_x and exhaust gas temperature T_s

Na rys. 3 przedstawiono wpływ wskaźnika obciążenia na udział dwutlenku węgla i tlenu w gazach spalinowych. Z rysunku wynika, że tworzą one zależności liniowe, ale przy małej zmienności wraz ze zmianą wskaźnika obciążenia.



Rys. 3. Wpływ wskaźnika obciążenia WO na udział dwutlenku węgla CO₂ i tlenu O₂ w spalinach
 Fig. 3. Effect of load indicator WO on the values of carbon dioxide CO₂ and oxygen O₂ in exhaust gas

Na rys. 4 zaprezentowano wpływ wskaźnika obciążenia na straty gazów wylotowych oraz odpowiadające im wartości współczynnika nadmiaru powietrza. Wraz ze wzrostem wskaźnika obciążenia straty spalin wylotowych rosną.



Rys. 4. Wpływ wskaźnika obciążenia WO na straty gazów wylotowych q_s i współczynnik nadmiaru powietrza
 Fig. 4. Effect of load indicator WO on the losses of exhaust gases and excess air number

Dąży się, żeby podczas spalania powstała ilość ciepła jak najbardziej wykorzystać, a straty w spalaniu były jak najmniejsze. Straty spowodowane przez wydzielenie ciepła składają się z różnicy temperatur w komorze spalania między dostarczoną mieszaniną paliwa i powietrza na wlocie, a wydostającymi się z komory spalania gazami. Obliczanie strat gazów wylotowych odpowiada następującemu równaniu:

$$q_s = (t_s - t_L) \left(-\frac{A_2}{20,9 - O_2} + B \right) \quad (2)$$

gdzie:

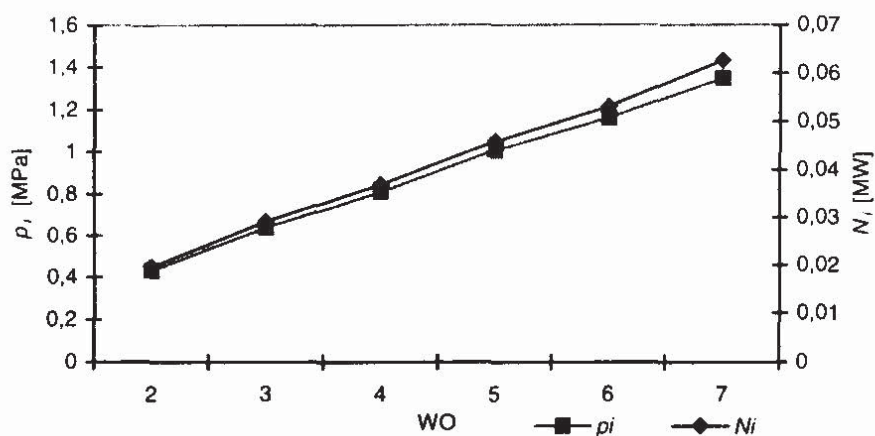
t_s – temperatura gazów wylotowych w °C,

t_L – temperatura powietrza doprowadzonego do spalania w °C,

O_2 – zawartość tlenu w suchych gazach wylotowych w %,

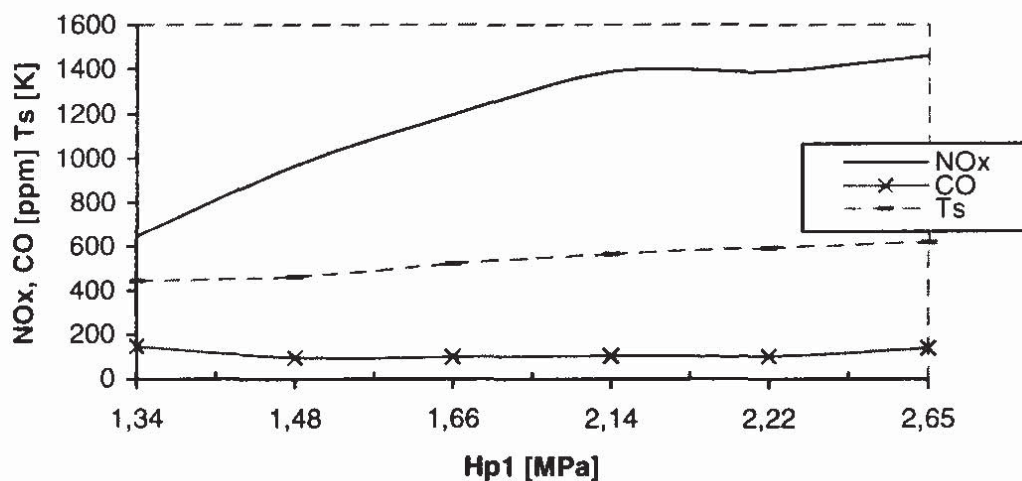
A_2, B – współczynniki zależne od rodzaju paliwa i podane dokumentacji IMR 3000 P.

Dla porównania przebiegu przedstawionych parametrów spalin wylotowych, na rysunku 5 przedstawiono wpływ wskaźnika obciążenia na przebieg symptomów diagnostycznych procesu spania, jak średnie ciśnienie indykowane i moc indykowaną. Symptomy te zmieniają się liniowo ze wskaźnikiem obciążenia i są wrażliwe na jego zmianę.



Rys. 5. Wpływ wskaźnika obciążenia WO na wartości średniego ciśnienia indykowanego p_i i mocy indykowanej z cylindra N_i
 Fig. 5. Effect of load indicator WO on the values of mean indicated pressure p_i and cylinder indicated horse-power N_i

Zmiana stanu technicznego wtryskiwacza powoduje zmianę amplitudy ciśnienia w przewodzie wtryskowym [5]. Wpływ amplitudy widma ciśnienia w przewodzie wtryskowym na udział NO_x i tlenku w spalinach oraz temperaturę spalin pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Wpływ wartości amplitud pierwszej składowej ciśnienia w przewodzie wtryskowym H_{p1} na emisję CO i NO_x oraz temperaturę spalin

Fig. 6. Effect of values amplitude of first harmonics H_{p1} on the emission of carbon monoxide CO and nitrogen oxygen NO_x in exhaust gases also gas temperature

Z rysunku widać, że udział NO_x jest w miarę wrażliwy, lecz tworzy zależność nieliniową. Natomiast temperatura spalin tworzy zależność liniową lecz odznacza się mniejszą wrażliwością.

7. Podsumowanie

Badania laboratoryjne w etapie wstępnym wykazały, że istnieje wpływ stanu technicznego aparatury wtryskowej na emisję szkodliwych składników spalin. Istnieje także możliwość oceny stanu technicznego aparatury wtryskowej na podstawie analizy składników spalin. Powstają jednak zasadniczo związki nieliniowe pomiędzy udziałem składników spalin a stanem technicznym aparatury wtryskowej, czyli może nie być tutaj spełniony warunek jednoznaczności parametrów diagnostycznych. Składniki spalin są również mniej wrażliwe na zmiany stanu technicznego niż inne parametry diagnostyczne. Najbardziej zapowiadającym się parametrem diagnostycznym jest udział NO_x , który i tak musi być w silnikach mierzony z uwagi na wymogi ograniczenia toksyczności.

Nie najlepsza wrażliwość wpływu wskaźnika obciążenia i amplitudy ciśnienia w przewodzie wtryskowym na temperaturę spalin wylotowych potwierdzają obawy, co do stosowania tego symptomu w diagnostyce silników okrętowych. Jest to symptom niewystarczający do jednoznacznej oceny stanu technicznego.

Badania te będą kontynuowane w fazie zasadniczej, przy symulowanych niezdatnościach wtryskiwaczy, w celu sprawdzenia wpływu konkretnych uszkodzeń na skład spalin wylotowych.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w 2003/2004 roku jako projekt badawczy nr 5T12D 00524.

Literatura

- [1] Gerini A., Montagne X.: Analyse de la sensibilité aux paramètres gazoles d'un moteur diesel d'automobile à injection directe. *Revue Institut français pétrole* 1997 № 5, s. 513–530.
- [2] Kohler H. W., Schadstoffreduktion bei MAN B and W W-Schiffsdieselmotoren. *Schiff und Hafen Seewirt* 1998 № 3, s. 14, 46–48.
- [3] Kowalski J.: Wpływ stanu technicznego wtryskiwacza na emisję tlenków azotu ze spalinowego silnika okrętowego. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej*. Szczecin 2002, nr 71, s. 313–321.
- [4] Merkisz J., Piaseczny L.: Metodyka opracowania testów badawczych toksyczności spalin silników okrętowych. *EKODIESEL'98*, s. 263–272.
- [5] Monieta J., Dyba K.: Diagnostyka eksploatacyjna wtryskiwaczy silników okrętowych z wykorzystaniem analizy widmowej sygnałów ciśnienia. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej*. Szczecin 2002, nr 71, s. 327–334.
- [6] Nakakita K., Kondoh T., Watanabe S.: Effect of fuel injection pressure and inside diameter of injection nozzles on the combustion and toxic emission. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers* 1994 № 577, p. 3198–3206.
- [7] Piotrowski I., Witkowski K.: Eksploatacja okrętowych silników spalinowych. Wyd. Fundacja Rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Gdynia 2002.
- [8] Shoji T.: Effect of cycle-to-cycle variations in spray characteristics on hydrocarbon emission in DI diesel engines. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers* 1997 № 2, s. 312–319.
- [9] Veki S., Miura A.: Investigation emission particulates and NO_x in diesels. *Research and emission of Nissan Diesel Technical Review* 1998 № 60, p. 53–57.
- [10] Załącznik VI do Konwencji MARPOL 1973/78. Przepisy o zapobieganiu zanieczyszczeniu powietrza przez statki oraz kodeks techniczny NO_x. Wydawnictwo Polskiego Rejestru Statków, Gdańsk 2000.