WPŁYW ZASILANIA EMULSJĄ PALIWOWO-WODNĄ NA TOKSYCZNOŚĆ I WSKAŹNIKI PRACY OKRĘTOWEGO, ŚREDNIOOBROTOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Jerzy Merkisz
Instytut Silników Spalinowych i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań
Tel. (061) 665-22-07, e-mail:Jerzy.Merkisz@put.poznan.pl

Leszek Piaseczny
Instytut Technicznej Eksploatacji Okrętów
Akademia Marynarki Wojennej, ul. inż. J. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia
Tel. (058) 626-28-92, e-mail: lpias @amw.gdynia.pl

Streszczenie. Dostarczanie wody do cylindrów jest jednym ze sposobów ograniczania stężenia tlenków azotu w spalinach wylotowych silnika ZS i znajduje uzasadnienie w publikowanych wynikach badań. W referacie przedstawiono wyniki badania wpływu dostarczania emulsji paliwowo-wodnej do cylindrów zarówno na zmianę toksyczności, jak i wskaźników pracy silnika. Wykazano, że w następstwie zasilania silnika emulsją paliwowo-wodną, uzyskaną przy zastosowaniu emulgatora chemicznego, jednocześnie ze zmniejszeniem stężenia tlenków azotu występuje zmniejszenie stężenia tlenku węgla w spalinach wylotowych, a także zmiany podstawowych wskaźników pracy silnika.

1. Wstęp

Z wymagań obowiązujących przepisów wynika, że podstawowym zadaniem dotyczącym zmniejszenia toksyczności tłokowych silników spalinowych jest ograniczenie emisji tlenków azotu. W odniesieniu do silników okrętowych zadanie to precyzuje Konwencja MARPOL 73/78 [1]. Zmniejszenie szczytowych wartości temperatury występujących podczas procesu spalania w silniku ZS, a więc i stężenia NO_x w spalinach wylotowych, może być zrealizowane przez doprowadzenie wody do cylindrów. Spotyka się w zasadzie następujące trzy sposoby:

a) doprowadzenie wody z powietrzem dolotowym przez tzw. układ niskociśnieniowy;
b) wtrysk wody bezpośrednio do komory spalania przez oddzielny wtryskiwacz, lub specjalnej konstrukcji wtryskiwacz paliwa z dodatkowym rozpylaczem;
c) wtrysk przygotowanej w układzie paliwowym emulsji paliwowo-wodnej przez standardowy, ale o zwiększonej wydajności wtryskiwacz.

Rozpoczęto już prace związane z wtryskiem do cylindrów silnika pary wodnej. W tej koncepcji ciepło odpadowe spalin jest wykorzystywane do produkcji pary, która w określonym momencie jest wtryskiwana do cylindrów. Zakłada się, że efektem ma być zmniejszenie emisji NO_x do poziomu 3 g/kWh [8].

Spotyka się również badania dotyczące doprowadzania do obiegu roboczego silnika wodnych roztworów takich substancji, jak octanu sodu, węglanu sodu, węglanu potasu [14].

Według publikowanych danych efekt redukcji NO_x w zależności od zastosowanych sposobów jest zróżnicowany, przy czym występują również różne oceny tych sposobów.

Doprowadzanie wody do kolektora dolotowego przez jej wtrysk, najczęściej rozpylaczem pneumatycznym lub przez ultradźwiękowe rozpylenie jest najprostszym i najtańszym sposobem redukowania emisji NO_x. Sposób ten zapewnia zredukowanie 10% NO_x przez każde 20% wody w stosunku do zużycia paliwa [2]. Wadą tego sposobu jest możliwość negatywnego wpływu na trwałość elementów silnika, a zwłaszcza układów cylindrowych. Wtryskiwana woda do powietrza dolotowego o stosunkowo niskiej temperaturze może całkowicie nie odparować. W efekcie woda w stanie płynnym unoszona przez powietrze może wykraplać się w kolektorze dolotowym, a także uderzać w gładź cylindra i tym samym niszczyć film olejowy, naruszając przez to warunki smarowania oraz ochronę przed korozją. Niebezpieczeństwo niszczenia filmu olejowego nie występuje przy zastosowaniu sposobów **b** i **c**. Zapewniają one całkowite odparowanie wody, która w stanie gazowym jest nieszkodliwa dla filmu olejowego i nie wpływa na korozję. Nawet przy bardzo dużym stosunku wody i paliwa (1:1) punkt rosy kwasu siarkowego wzrasta nie więcej niż o 15°C [3]. W przypadku zastosowania sposobu **b** i **c** gwarantowane jest odparowanie wody oraz jej kondensacja w komorze spalania nie jest możliwa.

W celu uzyskania największej redukcji emisji NO_x woda powinna być dostarczona do cylindra we właściwym czasie i miejscu, w którym tworzą się tlenki azotu. Według [4] warunki te może spełniać wtrysk emulsji paliwowo-wodnej (sposób c), tzn. woda może osiągnąć obszar płomienia w cylindrze i stąd jest sposobem najskuteczniejszym w ograniczaniu emisji NO_x. Określoną redukcję NO_x otrzymuje się przy mniejszej zawartości wody w paliwie. Na przykład wg [4] przy założonej redukcji emisji NO_x o 40% wymagana zawartość wody w paliwie wynosi 30%, podczas gdy w przypadku zastosowania sposobów **a** i **b** należy dostarczyć do cylindra 60% wody w stosunku do paliwa. Ocenia się, że w przypadku dawkowania wody w postaci emulsji można uzyskać bardzo duże obniżenie emisji cząstek stałych dochodzące do 80% [15].

Wydaje się słuszny wniosek [15], że redukcja NOx może być jeszcze skuteczniejsza przez zastosowanie wtrysku uwarstwionego przez specjalnej konstrukcji wtryskiwacz, lub sterowane oddzielnie wtryskiwacze paliwa i wody.

Stosowanie emulsji paliwowo-wodnej jest od dość dawna znanym sposobem redukującym NO_x w spalinach wylotowych silnika. Po raz pierwszy testowano ten sposób w silniku Sulzer`a około 20 lat temu i wkrótce po tym został wdrożony w silniku dwusuwowym typu 10RNF90M eksploatowanym w elektrowni USA [5].

Ze stosowaniem emulsji wiąże się jednak wiele problemów, do których można zaliczyć: możliwość wystąpienia zwiększonej korozji aparatury wtryskowej i cylindrów podczas postoju, ograniczona wydajność elementów aparatury wtryskowej, możliwość pogorszenia sprawności ogólnej silnika, zbyt mała trwałość emulsji.

Problemy te są rozwiązywane poprzez pewne zmiany w procesie użytkowania silnika, modyfikację niektórych elementów układu wtryskowego oraz instalowanie dodatkowego bardzo rozbudowanego wyposażenia (np. homogenizatorów). Stabilność emulsji paliwowo-wodnej zapewniają również emulgatory chemiczne, które dodawane do olejów napędowych nadają im zdolność mieszania się z wodą poprzez zmniejszenie napięcia powierzchniowego na granicy faz.

W literaturze [2-5,7,8,12-15] występują ograniczone i niejednoznaczne informacje dotyczące wpływu emulsji na zmiany innych związków toksycznych, sprawności, czy też obciążenia podstawowych elementów silnika. Na przykład istnieje ogólny pogląd wynikający z podstaw teoretycznych, że w wyniku zastosowania emulsji może nastąpić spadek sprawności silnika. W porównaniu z czystym paliwem w emulsji następuje obniżenie energii odniesionej do jednostki objętości mieszaniny wtryskiwanej do cylindra, w związku z czym przy określonym stanie obciążenia rośnie dawka. Zwiększają się przez

to straty mechaniczne związane z tłoczeniem emulsji do cylindrów silnika. W efekcie wzrost strat mechanicznych oraz cieplnych związanych z odparowaniem wody może wpłynąć na zmniejszenie sprawności ogólnej silnika (zarówno sprawności wewnętrznej, jak i mechanicznej). Poglądy te potwierdzają publikowane wyniki badań [12], zgodnie z którymi zastosowanie emulsji o zawartości wody 20 – 40 %, przy znacznym zmniejszeniu emisji NO_x i zadymienia spalin, spowodowało jednocześnie wzrost stężenia tlenku węgla i węglowodorów w spalinach wylotowych silnika.

Publikowane są jednak i takie wyniki badań [6], podczas których stwierdzono, że przy 20 % zawartości wody w emulsji jednostkowe zużycie paliwa zmalało do 2 %. Wyniki innych eksperymentów [13] dowodzą również, że przy zmniejszeniu NO_x i cząstek stałych o 70 %, tlenku węgla i węglowodorów o 50 %, uzyskano zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa o 5 %. Dostarczana emulsja do cylindrów powoduje bowiem zwiększenie zwłoki samozapłonu, które wpływa na polepszenie jednorodności mieszanki palnej w całej objętości komory spalania. Zwiększona zwłoka samozapłonu wydłuża czas niezbędny do rozprzestrzenienia się wtryskiwanego paliwa, w efekcie czego maleje liczba stref z niedostatkiem tlenu, co wpływa na zmniejszenie intensywności powstawania cząstek stałych i tlenku węgla. Homogenizacja mieszanki sprzyja także zmniejszeniu liczby lokalnych stref z pikami temperatury, co prowadzi do zmniejszenia aktywności azotu i stężenia NO_x.
Na podstawie dostępnych danych nie można również określić istotnego wpływu sposobów tworzenia emulsji na stopień redukcji NO_x.

Powyższe uwagi i sprzeczności były inspiracją do przeprowadzenia badań wpływu zastosowania emulsji tworzonej przez zastosowanie emulgatora chemicznego na toksyczność i podstawowe wskaźniki pracy silnika.

2. Warunki realizacji badań

Ze względu na duże różnice w budowie chemicznej wody i węglowodorów, paliwa naftowe, w tym oleje napędowe, wykazują ograniczoną zdolność do mieszania z wodą. Rozpuszczalność wody w tego typu paliwach zależy głównie od zawartości węglowodorów aromatycznych, składu frakcyjnego i temperatury [11]. Przyjmuje się, że dla lekkiego oleju napędowego w temperaturze 30 °C nie przekracza ona 104 ppm, co oczywiście nie zapewnia założonych proporcji wody i paliwa (20 : 100). Otrzymanie emulsji (20 %) wymagało więc dostarczenia energii i zastosowania związku powierzchniowo-czynnego (emulgatora), który w układzie dwufazowym zmniejsza energię potrzebną do rozdrobnienia wody i przez to zapoczątkowuje powstawanie warstwy granicznej wokół kropelek wody oraz w konsekwencji zwiększa stabilność emulsji. Oznacza to, że emulgowanie wody w paliwie przebiegało w dwóch etapach, tzn. podczas rozdrabniania kropel wody i stabilizacji emulsji. Rozdrabnianie wody polega na deformacji kropel do niestabilnych, nieforemnych kul o takich rozmiarach, że samorzutnie ulegają rozpadowi [16]. Stabilizacja emulsji następuje w wyniku wytworzenia na powierzchni kropelek wody warstwy adsorpcyjno-solwatacyjnej przez związek powierzchniowo-czynny (sufraktant).

W wyniku przeprowadzonej analizy [16, 17, 18, 19] oraz prób mieszania wody i paliwa w obecności różnych emulgatorów ustalono, że wystarczającą stabilność emulsji przy założonych proporcjach wody i paliwa uzyskuje się przy zastosowaniu emulgatora pod nazwą Rokanol LK3 w ilości 3 % w stosunku do sumy mas oleju napędowego i wody. Mieszanie wody i paliwa w obecności emulgatora przeprowadzono w specjalnie wykonanym układzie wyposażonym w pompę zębatą, przy podwyższonym ciśnieniu do około 200 kPa i bez dostępu powietrza.

Z uwagi na niestabilność termodynamiczną emulsji wody w paliwie węglowodorowym, przygotowywano ją bezpośrednio przed zastosowaniem do zasilania silnika. Poprawa stabilności emulsji uzyskana przez zastosowanie Rokanolu bowiem nie zmieniła istoty zjawiska, zmniejszyła jedynie kinetykę rozpadu emulsji. Po pewnym czasie obserwowano typowe zjawiska związane z jej rozpadem: koalescencję, segregację faz i sedymentację.

Prezentowane wyniki badań są częścią szerszych badań, w których obiektem był silnik charakteryzowany zmiennością sześciu wielkości wejściowych [11]. Ze względu na szeroki zakres tych badań w eksperymencie zastosowano teorię planowania doświadczeń [9], a do analizy statystycznej i merytorycznej wyników badań, statystyczne programy komputerowe [10]. Z uwagi na nieliniowy obiekt badań, jakim jest silnik ZS, opracowano frakcyjny plan trójwartościowy. Plan ten pozwolił dla każdej wielkości wejściowej (moment obrotowy, prędkość obrotowa, kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa (KWWP), ciśnienie otwarcia wtryskiwacza (p_{ow}), zawartość wody w emulsji paliwowo-wodnej (%), stopień recyrkulacji (EGR) określić efekty liniowe i nieliniowe (kwadratowe). Charakteryzuje się on wysoką rozdzielczością , tzn. generatorami są interakcje wyższych rzędów, z czego wynika, że efekty główne i interakcje niższych rzędów są uwikłane w niewielkim stopniu. Normowanie wielkości wejściowych w przedziale [-1, 0, +1] nie wykracza poza wartości graniczne [x_{min}, x_{max}].

Realizowalność i duża informatywność planu zapewniły w miarę efektywną realizację założonych celów i zakresu badań eksperymentalnych. Przyjęty plan o $N = 3^{6-2} = 81$ układach (punktach) pomiarowych w stosunku do planu kompletnego o $N_k = 3^6 = 729$ układach charakteryzuje się dość dobrą efektywnością $e_N = N/N_k = 0,11$.

Bezpośrednie pomiary przeprowadzono na przystosowanym i oprzyrządowanym w aparaturę pomiarową silniku SULZER 6AL20/24, zainstalowanym na stanowisku laboratoryjnym.

Pomiary realizowano przy niewielkich zmianach warunków otoczenia:
- temperatury w granicach 16 – 18 ^{0}C;
- ciśnienia w granicach 1000 – 1010 Pa;
- wilgotności względnej w granicach 50 – 55 %.

W związku z powyższym uznano, że wpływ tych wielkości (zakłócających) na wyniki pomiarów był pomijalnie mały i uzasadniał słuszność przyjęcia w planie eksperymentu jednego bloku pomiarowego. Niezbędne do przeprowadzenia analizy statystycznej i merytorycznej wyniki pomiarów i obliczeń wielkości wyjściowych silnika, wynikających z założeń planowanego eksperymentu, zamieszczono w opracowaniu [11]. Zgodnie z przyjętą metodyką wyniki pomiarów są wartościami średnimi określonymi z 64 powtórzeń, a obliczone miary dyspersji zapewniły ocenę dokładności pomiarów.

3. Analiza wyników badań

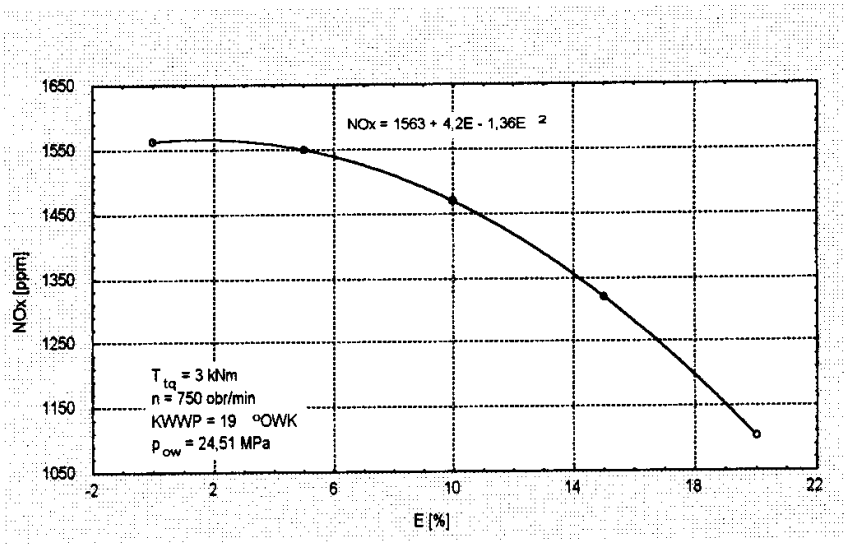
W wyniku przeprowadzonej analizy modeli uwzględniających wyłącznie efekty główne oraz uwzględniających dodatkowo interakcje liniowo-liniowe i interakcje liniowo-kwadratowe, przyjęto modele najbardziej adekwatne do przebiegów rzeczywistych, dla których wyznaczono współczynniki regresji funkcji obiektu badań. Pełny zakres analizy statystycznej wynika z wykorzystanego programu komputerowego, której szczegółowe dane zamieszczono w [11].

Na podstawie obliczonych współczynników regresji wyznaczono funkcje aproksymujące (funkcje obiektu badań) uwzględnianych w badaniach wielkości wyjściowych. Następnie przy ich wykorzystaniu wyznaczono zależności analizowanych parametrów od zawartości wody w paliwie, których postacie analityczne i graficzne

zamieszczono na rysunkach 1 – 6. Oznacza to, że zależności te obowiązują dla nominalnych wartości wielkości regulowanych układu paliwowego (KWWP = 19 ^{0}OWK, p_{ow} = 24,5 MPa) oraz punktu pracy badanego silnika SULZER 6AL20/24, określonego momentem obrotowym równym 3 kNm i prędkością obrotową 750 obr/min.

Stężenie tlenków azotu NO_x.

Ze wzrostem zawartości wody w paliwie maleje stężenie tlenków azotu NO_x (rys. 1). W analizowanym punkcie pracy silnika, przy 20 % zawartości wody w paliwie, redukcja tlenków azotu w spalinach wylotowych wyniosła 29 %.



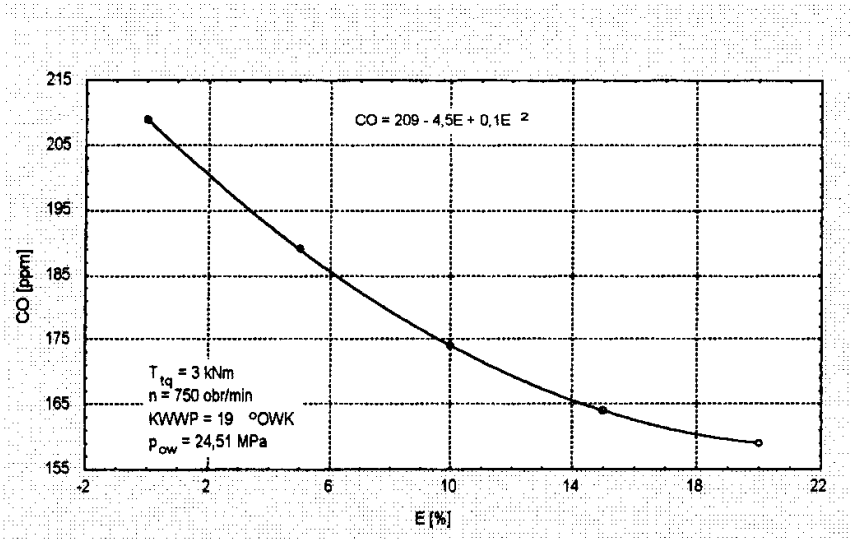
Rys. 1. Zależność stężenia tlenków azotu od zawartości wody w emulsji paliwowo-wodnej

Stężenie tlenku węgla CO i węglowodorów HC.

Wraz z ograniczeniem koncentracji NO_x występuje zmiana stężenia CO, przy czym uzyskane wyniki badań mogą być dyskusyjne. Zgodnie z klasyczną teorią procesu spalania zmniejszenie wartości temperatury na skutek doprowadzenia wody do cylindra spowodować powinno pogorszenie warunków spalania paliwa, w efekcie czego należy oczekiwać wzrostu zawartości niezupełnie spalonych cząsteczek węgla w spalinach wylotowych silnika. Wzrostowi zawartości wody w paliwie odpowiada zmniejszenie stężenia CO, przy czym maksymalna redukcja wynosi ponad 20 % (rys.2).

Zmniejszenie stężenia CO w spalinach może być efektem polepszenia jednorodności mieszanki palnej w całej objętości komory spalania. Przebieg krzywych można dodatkowo zinterpretować przy pomocy teorii Meurera. Zgodnie z tą teorią jakość wymieszania paliwa z powietrzem w cylindrach silnika (jednorodność mieszanki) nie eliminuje całkowicie możliwości powstawania zakłóceń w spalaniu, które są związane ze zjawiskami chemicznymi, oddziałującymi na przebieg spalania. W silniku ZS podczas mieszania się paliwa z gorącym powietrzem następuje rozluźnienie powiązań C-C i C-H. Wywołuje to rozpad cząsteczek, który ułatwia samozapłon oraz powoduje powstawanie reszt bogatych w węgiel i innych składników trudno ulegających utlenieniu. Szybkie przereagowanie tych reszt jest możliwe tylko za pomocą (w obecności) katalizatora, jakim jest para wodna. To działanie katalityczne zachodzi tylko wówczas, gdy para wodna

znajduje się w bliskim (bezpośrednim) sąsiedztwie cząsteczek węgla. Zatem dostarczanie wody razem z paliwem powoduje przyspieszenie spalania węgla. W normalnych warunkach zasilania czystym olejem napędowym, spalanie w silniku ZS przebiega przy bardzo szybkim spalaniu wodoru i powolniejszym spalaniu węgla pociągającym za sobą straty związane z dopalaniem i niezupełnym spaleniem paliwa w procesie rozprężania.



Rys. 2. Zależność stężenia tlenku węgla od zawartości wody w emulsji paliwowo-wodnej

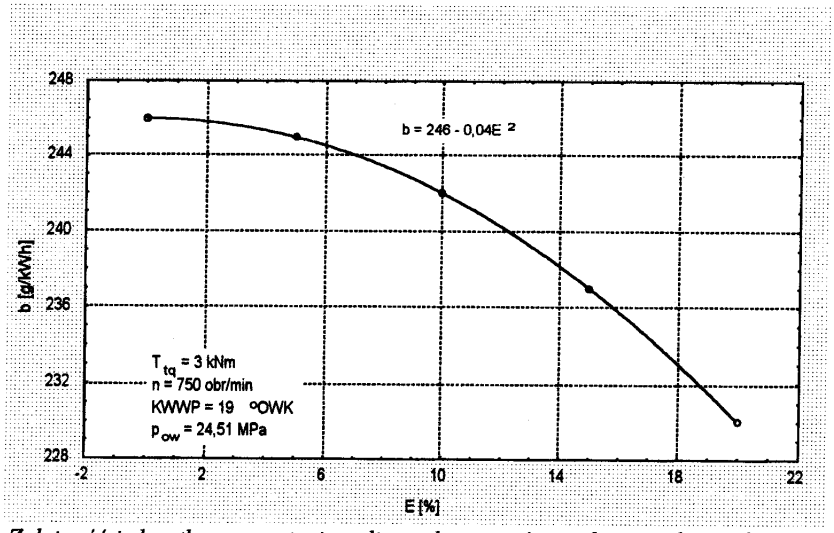
Prowadzone jednocześnie pomiary stężenia węglowodorów potwierdzają w pewnym stopniu tę hipotezę. Zmiany emisji HC w zależności od zawartości wody w emulsji praktycznie nie występowały, a ich stężenie utrzymywało się na poziomie 41 ± 0,1 ppm.

W wyniku przeprowadzonych badań nie określono ponadto wpływu zastosowanego emulgatora na zmianę stopnia dyspersji i jednorodności emulsji, które w sposób istotny wpływają na przebieg procesu spalania w silniku, a więc i na stężenie CO i HC w spalinach wylotowych silnika.

Jednostkowe zużycie paliwa *b*

Przeprowadzone badania wykazały, że dostarczenie do cylindrów wody razem z paliwem wpłynęło na zwiększenie sprawności ogólnej silnika (rys. 3).W następstwie doprowadzenia do cylindrów 20 % wody w stosunku do paliwa nastąpiło zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa o około 6 % przy obciążeniu silnika momentem obrotowym 3 kNm i prędkości obrotowej 750 obr/min. Można przyjąć, że na zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa miały wpływ wyżej opisane czynniki, a zwłaszcza polepszone warunki spalania paliwa.

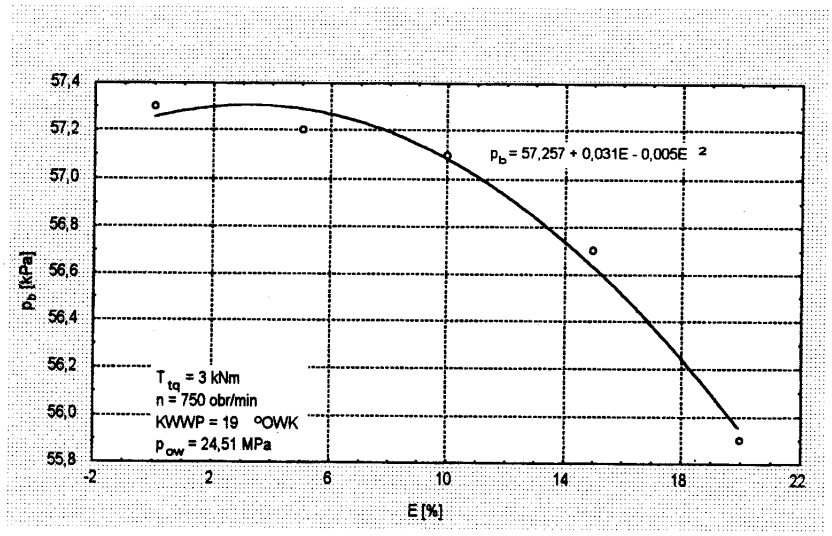
Tendencje podwyższania sprawności, przy jednoczesnej redukcji NO_x za pomocą dostarczanej do cylindrów silnika wody, potwierdzają najnowsze badania. Według [8] w wyniku zastosowania wtrysku pary wodnej zredukowano emisję NO_x do 3 g/kWh przy jednoczesnym wzroście sprawności o kilka procent. Dalsze badania potwierdzają założenia, że po eliminacji chłodzenia denka tłoka i głowicy oraz ograniczeniu chłodzenia tulei cylindrowej, razem z zastosowaniem wtrysku pary wodnej, uzyskana zostanie sprawność silnika w granicach 55 – 60 % z jednoczesnym utrzymaniem emisji na poziomie 3g/kWh.



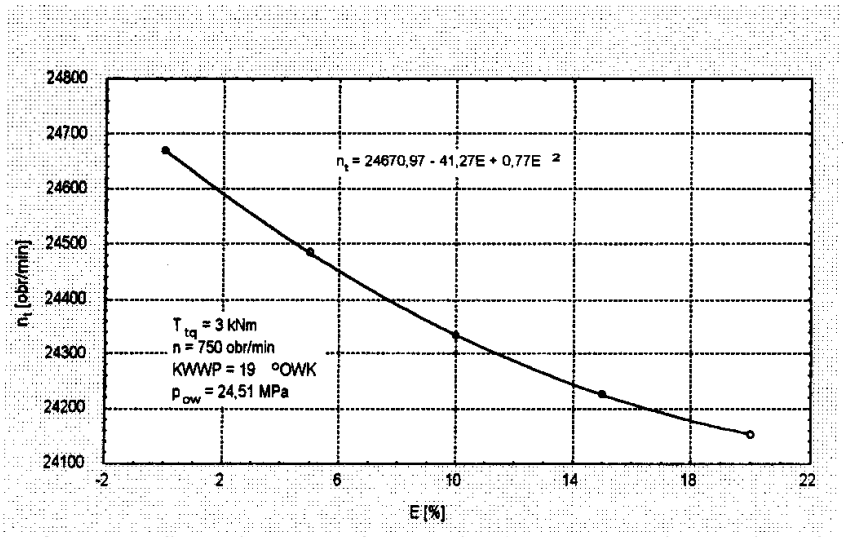
Rys. 3. Zależność jednostkowego zużycia paliwa od zawartości wody w emulsji paliwowo-wodnej

Warunki napełniania cylindrów

W następstwie zastosowania emulsji, warunki napełniania cylindrów silnika świeżym ładunkiem uległy nieznacznemu pogorszeniu. Przy 20 % zawartości wody w paliwie, ciśnienie doładowania zmniejszyło się o około 2 % (rys. 4). Jest to wynikiem zmniejszonej również o około 2 % prędkości obrotowej turbiny (rys. 5) w następstwie obniżenia średniej temperatury spalin wylotowych silnika o około 4 % (rys. 6).



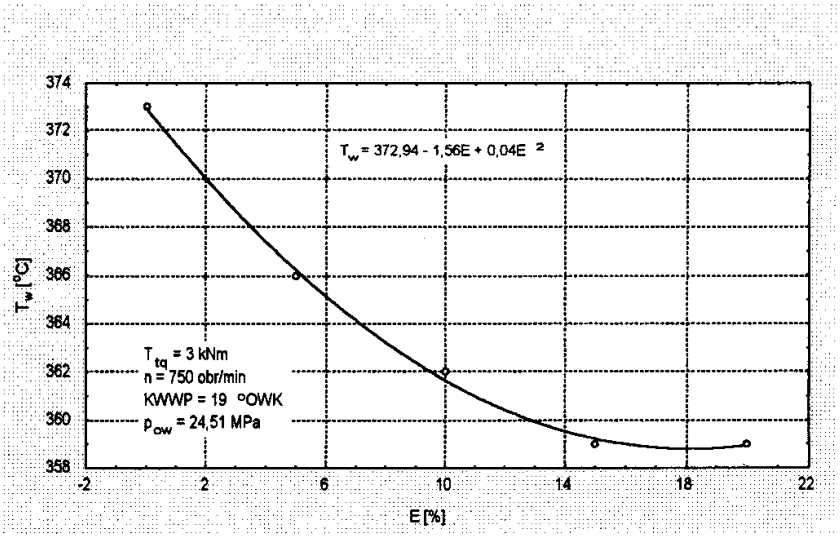
Rys. 4. Zależność ciśnienia doładowania od zawartości wody w emulsji paliwowo-wodnej



Rys. 5. Zależność prędkości obrotowej turbosprężarki od zawartości wody w emulsji paliwowo-wodnej

Obciążenie elementów silnika

W efekcie dostarczenia do cylindrów wody z paliwem następuje zmniejszenie średniej temperatury spalin wylotowych (przed turbiną) o około 4 % (rys. 6). Korzystne ze względu na emisję NO_x ograniczenie szczytowych wartości temperatury, wpłynęło jednocześnie na zmniejszenie obciążenia cieplnego elementów układu cylindrowo-tłokowego. Z badań wynika, że obciążenia mechaniczne podstawowych elementów silnika nie uległy zmianie. Rejestrowane podczas pomiarów wartości największego ciśnienia spalania utrzymywały się na poziomie 8,2 MPa.



Rys. 6. Zależność temperatury spalin wylotowych od zawartości wody w emulsji paliwowo-wodnej

4. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań i analiz można stwierdzić, że:

1. Zasilanie silnika ZS emulsją paliwowo-wodną wpływa na ograniczenie tlenków azotu - podstawowego składnika toksycznego spalin wylotowych. Stwierdzono, że 1 % wody zawartej w paliwie może zredukować stężenie NO_x o ponad 1 %. Uzyskane wyniki badań są porównywalne z danymi literaturowymi.

2. Jednocześnie z ograniczeniem koncentracji NO_x w spalinach nastąpiło znaczne zmniejszenie stężenia tlenku węgla (ponad 20 %). Oznacza to, że skuteczność zastosowania wody w ograniczeniu CO jest niemal równa z redukcją NO_x, tj. 1 % wody zawartej w paliwie może zredukować stężenie CO w spalinach w przybliżeniu o 1 %. Należy przy tym zauważyć, że w badanym silniku wartości bezwzględne stężenia CO są o rząd niższe od stężenia NO_x.

Podczas badań nie stwierdzono istotnego wpływu, zwłaszcza przy wyższych obciążeniach, zawartości wody w paliwie na zmianę węglowodorów w spalinach wylotowych silnika. Uzyskane wyniki dotyczące redukcji CO nie znajdują jednoznacznego potwierdzenia przez wnioski wynikające z klasycznej teorii procesu spalania w silniku ZS.

3. Można przyjąć, że w następstwie dostarczenia wody do cylindrów, straty związane z obniżeniem szczytowych wartości temperatury zostają rekompensowane przez lepszą jednorodność mieszanki, a także polepszone warunki spalania węgla w obecności katalizatora, jakim jest woda. Wpływ polepszonych warunków procesu spalania może uzasadniać również zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa. Korzystny wpływ wody dostarczanej do cylindrów na sprawność silnika jest uzasadniona także przez najnowsze (pionierskie) badania.

4. Zasilanie emulsją paliwowo-wodną wpływa korzystnie na obciążenie podstawowych elementów silnika. Obciążenie mechaniczne nie ulega zmianie, natomiast zmniejsza się obciążenie cieplne.

Bibliografia

1. Bergier T., Piaseczny L.: Zakres i warunki badań emisji związków toksycznych w spalinach silników tłokowych napędu głównego okrętów. Zeszyty Naukowe AMW nr 1(136), Gdynia 1998.
2. Papadopaulos S.: Reduktion der Stickoxidemissionen des direkteinspritzenden Deselmotors durch Dieselolwasseremulsionen bzw. Wassereinsppritzung. Dissertation ETH Zurich 1987.
3. Vollenweider J., Geist M., Schaub M.: Residual fuels in emission-controlled diesel engines – Background, developments and operational results. CIMAC, Interlaken 1995.
4. Velji A., Remmels W., Schmidt R. M.: Water to reduce NOx emissions in diesel engines a basic study. CIMAC, Interlaken 1995.
5. Holtbecker R., Geist M.: Exhaust emissions redukction technology for Sulzer marine diesel engines: General aspects. Wartsila NSD Switzerland Ltd, Winterthur, July 1998.
6. Masłow W. W.: Sowremiennyje mietody sniżenija sodierżanija wriednych wieszczestw w otrabotannych gazach sudowych dizelej. Sudostrojenije nr 8 – 9 1995.
7. Emission Control of Two – Stroke Low Speed Diesel Engines. MAN – B&W 1992.

8. Paro D.: The Smokeless Engines. Marine News nr 1 – 2000, Wärtsilä NSD Corporation.
9. Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.
10. STATISTICA PL dla Windows. StatSoft 1997.
11. Metody ograniczenia emisji związków toksycznych tłokowych silników spalinowych eksploatowanych w siłowniach okrętowych. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego nr 9T12D 006 13. AMW, Gdynia 2000.
12. Binder K.: Minderung der Stickoxid – und Partikelemissionen durch Diesel/Wasser – Emulsionen. Mineraloltechnik 1992, nr 12.
13. Diesel fuel/water emulsions HDC system reduces diesel engine emission Levels. HSB Int. (Holl. Shipbuild.) 1998, nr 2.
14. Ambrozik A., Chłopek Z., Danilczyk W., Kruczyński S.: Zmniejszanie emisji tlenków azotu i cząstek stałych z silników o zapłonie samoczynnym przez doprowadzanie do obiegu dodatkowych substancji z wykorzystaniem energii ultradźwiękowej. II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Explo-Diesel & Gas Turbine`01, Gdańsk – Międzyzdroje – Kopenhaga, April 23 – 27, 2001
15. Kruczyński S., Siekierski M.: Ograniczanie emisji tlenków azotu poprzez dodatek wody do układu zasilania silnika o zapłonie samoczynnym. Zeszyty Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej nr 1(36)/2000, Warszawa 2000.
16. Scherman F.: Emulsji. Izd. Chimija, Moskwa 1972.
17. Robustow W. W. i inni: Nowyje mietody sżiganija topliwa i woprosy teorii gorenija. Izd. Nauka, Moskwa 1972.
18. Antonow W. N.: Chimija i tiechnologija topliw i maseł. 1983, 12, 30.
19. Iwanow W. M.: Topliwnyje emulsji. Izd. AN SSSR, Moskwa 1962.

INVESTIGATION OF FUEL-WATER EMULSION SUPPLY ON TOXICITY AND OTHER CI ENGINE COEFFICIENTS

Abstract. Delivery of water to the cylinders is one way of limiting the nitrogen oxides concentration in CI engine exhausts and is supported in results of investigations. In the paper, results of investigation of water delivery to cylinders (as fuel-water emulsion), both on toxicity and other engine's operational coefficients has been introduced. It has been showed, that as a result of fuel-water emulsion supply, using chemical emulsifier, the concentration of nitrogen oxides and carbon oxides in exhaust decreases. In the same time the basic operational coefficients of the engine also changes.