

RESEARCHES OF POSSIBILITIES OF LOWERING THE TOXICITY OF SHIP DIESEL ENGINE EXHAUST GASSES BY CHANGING THE CHOSEN CONTROL PARAMETERS

Kazimierz Witkowski

Gdynia Maritime Academy
Morska 83, 82-225 Gdynia, Poland
tel.: +48 81 6901332
e-mail: wika@am.gdynia.pl

Abstract

This paper describes the issues of atmospheric pollution created by ship engines.

Not long ago the most important issue of ship engine construction was to lower fuel consumption and achieve high durability and reliability. In the recent years another problem has risen. A ship engine must meet more and more strict demands made on account of natural environment – the emission of toxic combustion products to the atmosphere. Although the share of ship engines in global toxic product emission was only 7% nitric oxides (NO_x) and 4 – 5% sulphur oxides (SO_x), the International Maritime Organization (IMO) and the Marine Environment Protection Committee (MEPC) in November of 1990 proposed to reduce the emission of NO_x by 70% and SO_x by 50% by the year 2000. As the outcome of conducted procedures appropriate changes were made to MARPOL Convention in the form of Appendix VI.

In this paper the effects of the influence of the chosen regulation parameters changes (charging air pressure and fuel injection advance angle) on the contents of the exhaust gasses of a diesel engine burning heavy oil fuel are presented and discussed. Necessary research was carried out in Gdynia Maritime Academy. Extraordinary attention was paid to successful reduction of nitric oxides (NO_x) in the exhaust gasses.

It was proven that decreasing the charging air pressure and increasing the fuel injection delay together lead to significant reduction of the amount of nitric oxides in ship engine exhaust gasses burning heavy oil fuel.

Laboratory research was carried out using heavy fuels in a close-to-real environment. Therefore their results may be taken under consideration by ship owners. Considering the possibility of making necessary adjustments by the ship crew, which would lead to similar results, this method could also be used in practice, especially on older engines which usually do not conform to MARPOL Convention, Appendix VI with their nitric oxides emissions.

Keywords: diesel ship engines, atmospheric pollution, charging air pressure, fuel injection advance angle.

BADANIE MOŻLIWOŚCI OBNIŻENIA TOKSYCZNOŚCI SPALIN SILNIKÓW OKRĘTOWYCH PRZEZ ZMIANĘ WYBRANYCH PARAMETRÓW REGULACYJNYCH.

Streszczenie

Artykuł poświęcony jest problemom związanym z zanieczyszczeniem atmosfery przez silniki okrętowe.

Do niedawna najważniejszym problemem w budowie silników okrętowych było zmniejszenie zużycia paliwa oraz osiągnięcie ich dużej trwałości i niezawodności. W ostatnich latach pojawił się kolejny problem. Silnik okrętowy musi spełniać coraz ostrzejsze wymagania stawiane ze względu na ochronę środowiska naturalnego - emisję toksycznych produktów spalania do atmosfery. Wprawdzie udział silników okrętowych w emisji toksycznych składników wynosi w skali globalnej około 7% w przypadku tlenków azotu (NO_x) i 4-5% dla tlenków siarki (SO_x), to jednak Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) i Komitet d/s Ochrony Środowiska Morskiego (Marine Environment Protection Committee - MEPC) przy IMO, w listopadzie 1990 roku zaproponowały zmniejszenie emisji do 2000 roku NO_x o 70% i SO_x o 50%. W wyniku prowadzonej procedury legislacyjnej odpowiednie zapisy wprowadzono do konwencji MARPOL w postaci załącznika VI.

W artykule zaprezentowano i przedyskutowano poparte wynikami badań laboratoryjnych przeprowadzonych w Akademii Morskiej w Gdyni rezultaty wpływu zmian wybranych parametrów regulacyjnych (ciśnienia powietrza ładującego i kąta wyprzedzenia wtrysku) na skład spalin silnika wysokoprężnego zasilanego paliwem ciężkim. W badaniach w szczególności zwracano uwagę na skuteczną możliwość obniżenia w spalinach zawartości tlenków azotu (NO_x).

Wykazano, że spadek ciśnienia powietrza ładującego i wzrost opóźnienia wtrysku paliwa wprowadzone łącznie, prowadzą do istotnego obniżenia zawartości tlenków azotu w spalinach silnika okrętowego pracującego na paliwie ciężkim.

Badania laboratoryjne przeprowadzono na paliwach ciężkich, a więc w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Ich rezultaty mogą być więc brane pod uwagę przez armatorów. Z uwagi na możliwość wykonania przez załogę statku regulacji silnika pozwalającej na osiągnięcie podobnych rezultatów, metoda sprawdzona w badaniach laboratoryjnych, może być również właściwa w praktyce, szczególnie w odniesieniu do silników wcześniej budowanych, które zazwyczaj nie spełniają normy emisji tlenków azotu wskazanej w załączniku VI Konwencji MARPOL.

Słowa kluczowe: okrętowe silniki spalinowe, zanieczyszczenie atmosfery, ciśnienie powietrza doładowania, kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa

1. Ochrona atmosfery przed zanieczyszczeniami emitowanymi przez silniki okrętowe

Do niedawna najważniejszym problemem w budowie silników okrętowych było zmniejszenie zużycia paliwa, osiągnięcie dużej trwałości i niezawodności. W ostatnich latach pojawił się kolejny problem. Silnik okrętowy musi spełniać coraz ostrzejsze wymagania stawiane ze względu na ochronę środowiska naturalnego - emisję toksycznych produktów spalania do atmosfery.

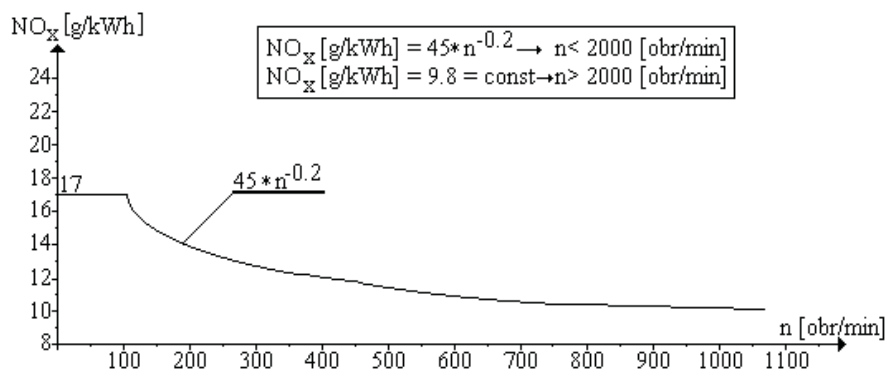
Wprawdzie udział silników w emisji toksycznych składników wynosi w skali globalnej około 7% w przypadku tlenków azotu (NO_x) i 4-5% dla tlenków siarki (SO_x), to jednak Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) i Komitet d/s Ochrony Środowiska Morskiego (Marine Environment Protection Committee - MEPC) przy IMO, w listopadzie 1990 roku zaproponowały zmniejszenie emisji NO_x o 70% i SO_x o 50%, chcąc osiągnąć ten rezultat już w 2000 r.

1.1. Inicjatywy legislacyjne

Można je podzielić na trzy zasadnicze poziomy:

- inicjatywy legislacyjne międzynarodowe, gdzie główne kierunki wyznacza IMO,
- inicjatywy legislacyjne państwowe wyrażane głównie przez EPA (Environmental Protection Agency) w Stanach Zjednoczonych,
- inicjatywy legislacyjne regionalne, dla których bardzo charakterystyczne są działania np. CARB (California Air Resources Board).

W ramach poszczególnych propozycji legislacyjnych opracowano zalecenia co do ograniczenia emisji toksycznych składników spalin. Dopuszczalny poziom emisji NO_x według normy IMO pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Dopuszczalna emisja NO_x w funkcji prędkości obrotowej silnika wg IMO

Fig. 1. The permissible NO_x emission level in function of the engine rotational speed n according to IMO

1. 2. Metody obniżania toksyczności spalin

Redukcja emisji NO_x wymaga nowych technicznych rozwiązań, możliwych do zastosowania w warunkach siłowni okrętowej. Opracowano kilkanaście metod zmniejszania emisji tlenków azotu i można je podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- 1) metody podstawowe, ograniczające powstawanie tlenków azotu w trakcie procesu spalania,
- 2) metody dodatkowe, redukujące zawartość NO_x w spalinach poprzez ich oczyszczanie za silnikiem.

Metody podstawowe polegają na zmianie organizacji procesu spalania i składu chemicznego czynników dostarczanych do cylindra. Ilość NO_x powstających w trakcie procesu spalania w okrętowych silnikach tłokowych zależy od następujących parametrów:

- maksymalnego ciśnienia spalania,
- maksymalnej temperatury spalania,
- współczynnika nadmiaru powietrza,
- ciśnienia powietrza doładowującego,
- ciśnienia wtrysku paliwa,
- średnicy kropeł rozpylanego paliwa,
- zwłoki zapłonu,
- kształtu stożka rozpylanego paliwa i jednorodności mieszaniny paliwowo-powietrznej,
- rozkładu lokalnych ognisk samozapłonu,
- stopnia sprężania,
- ciśnienia i temperatury w cylindrze w czasie wtrysku,
- kształtu komory spalania silnika,
- prędkości obrotowej silnika,
- składu chemicznego paliwa,
- składu powietrza,
- obecności w cylindrze czynników obcych, redukujących powstawanie NO_x np. amoniaku.

Wśród wymienionych czynników największy wpływ na ilość powstających tlenków azotu ma temperatura oraz cząstkowe ciśnienia tlenu i azotu, a także czas trwania procesu spalania [1]. Dlatego też obecnie dominującą rolę odgrywać będą te metody, które zmniejszają zawartość NO_x w spalinach przez obniżenie maksymalnej temperatury spalania. Do metod tych zaliczamy:

- zasilanie silnika emulsją wodno-paliwową,
- bezpośredni wtrysk wody do cylindra,
- stopniowany wtrysk paliwa,
- stosowanie specjalnych końcówek wtryskiwaczy, zapewniających optymalizację procesu spalania pod względem ilości NO_x w spalinach,
- nawilżanie powietrza doładowującego,
- recyrkulację spalin,
- zmianę stopnia sprężania.

Wydaje się, że zasilanie silnika emulsją wodno-paliwową jest wygodną i skuteczną metodą, możliwą do zastosowania w siłowni okrętowej bez dużych nakładów inwestycyjnych. Wszyscy liczący się producenci silników okrętowych prowadzą badania w tym zakresie. Stwierdzono, że jeden procent wody w paliwie spowoduje zmniejszenie zawartości NO_x w spalinach również o około jeden procent [5].

Należy zaznaczyć, że wartość redukcji NO_x przy podawaniu emulsji z wykorzystaniem klasycznego układu wtryskowego silnika wynosi około 30%. Do tego momentu jak stwierdzono podczas badań, praca pomp wtryskowych jest poprawna. Dalsze jednak wzbogacanie emulsji wodą powoduje, że ze względów wytrzymałościowych, ekonomicznych i trybologicznych praca pomp jest niewskazana. Potwierdzają to doświadczenia badawcze i eksploatacyjne zarówno

koncernu MAN jak i Wärtsilä. Przy większych proporcjach wody i paliwa przechodzi się na bezpośredni wtrysk wody do silnika. Obecnie szczególnie firmy Wärtsilä i MaK znane są z wdrażania na statki instalacji wtryskowej do jednoczesnego zasilania silnika wodą i paliwem [3].

Bezpośredni wtrysk wody łączy się jeszcze z takimi metodami jak:

- podwyższenie stopnia sprężania,
- zastosowanie systemu zmiennych faz rozrządu,
- recyrkulacja spalin,

i w efekcie końcowym uzyskuje się bardzo znaczącą, nawet powyżej 50% redukcję NO_x.

W ramach metod dodatkowych związanych z redukcją zawartości NO_x w spalinach poprzez ich oczyszczanie za silnikiem, producenci silników okrętowych bardzo duże środki przeznaczyli na opracowanie własnych konstrukcji katalizatorów do selektywnej redukcji katalitycznej (SCR). Powstały oryginalne rozwiązania opracowane przez firmę MAN i Wärtsilä, zarówno dla silników wolnoobrotowych jak i średnio i szybkoobrotowych [2].

2. Badania laboratoryjne

Rosnące wymagania co do czystości spalin generowanych przez silniki okrętowe, oraz idące w ślad za tym działania legislacyjne, nakładają na armatorów obowiązek ich respektowania. Pojawić się mogą dodatkowe koszty eksploatacji statków wynikające z konieczności płacenia kar za zanieczyszczanie atmosfery. Dlatego też producenci silników okrętowych prowadzą badania nad dostosowaniem obecnie produkowanych silników do spełnienia norm czystości spalin. Pozostaje jednak ogromna liczba silników będących od lat w eksploatacji, które norm nie spełniają. Dla tych silników należy szukać prostych metod, które bez większych nakładów finansowych i długich postojów statku da się zastosować, uzyskując skuteczne zmniejszenie w spalinach składników toksycznych. Może się do tego przyczynić na przykład właściwa, z ekologicznego punktu widzenia, regulacja silnika.

2. 1. Obiekt badań

Obiektem badań jest jednocyldrowy, dwusuwowy silnik wozdżkowy o przepłukaniu wzdłużnym, doładowany za pomocą dmuchawy Rootsa, na którym przeprowadzono badania wpływu wybranych parametrów regulacyjnych silnika na czystość spalin.

Stanowisko wyposażone jest w odpowiednią instalację paliwową umożliwiającą zasilanie silnika paliwem lekkim, ciężkim lub ich mieszaniną. Ze względu na konieczność podgrzewania paliwa ciężkiego, zbudowano specjalną instalację grzewczą, w której nośnikiem ciepła jest olej. Instalacja umożliwia podgrzanie paliwa do temperatury 100⁰C.

Stanowisko składa się z silnika i obciążającego go hamulca wodnego. Prawidłową pracę zespołu silnik - hamulec umożliwiają instalacje znajdujące się w laboratorium, wzorowane na rozwiązaniach okrętowych, ale uwzględniające uwarunkowania lądowe.

Zainstalowana aparatura pomiarowa umożliwia:

- pomiar momentu obrotowego - bezpośrednio z hamulca lub za pomocą torsjometru zamontowanego na wale łączącym silnik z hamulcem,
- pomiar prędkości obrotowej za pomocą układu elektronicznego - znacznik, czujnik,
- badanie przebiegu procesu spalania oraz wtrysku paliwa za pomocą specjalnych przetworników i układu rejestrującego opartego o komputer klasy PC,
- badanie składu spalin z wykorzystaniem elektronicznego analizatora firmy Wimmer.

Na silniku zamontowano dodatkowo urządzenie do płynnej zmiany, w trakcie pracy silnika, kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa α_{ww} .

2. 2. Program badań

Program badań przewidywał określenie wpływu na skład spalin następujących czynników:

- ciśnienia powietrza ładującego, którego wartość zmieniano w zakresie od wartości nominalnej 0,1 MPa do 0,02 MPa,

- kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa o nominalnej wartości 13° OWK przed GMP, którego wartość następnie zmieniono do $\alpha_{ww} = -10^{\circ}$ OWK i $\alpha_{ww} = -7^{\circ}$ OWK.

Silnik pracował ze stałym obciążeniem wynoszącym około 60% mocy znamionowej i ze stałą prędkością obrotową 300 obr/min.

2. 3. Opis przebiegu badań, wyniki i ich analiza

Obciążenie zgodne z programem badań zadawano na hamulcu wodnym. Ciśnienie powietrza ładującego zmieniano przez zmianę prędkości obrotowej dmuchawy Roots'a. Zmiana kąta wyprzedzenia wtrysku była możliwa dzięki wyposażeniu silnika w specjalny mechanizm współpracujący z rolką popychacza pompy wtryskowej. Dało to możliwość opóźnienia wtrysku paliwa o około 3° OWK i 6° OWK w stosunku do wartości nominalnej.

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Z przeprowadzonych badań wynika, że zmiana obu wybranych parametrów - ciśnienia powietrza ładującego i kąta wyprzedzenia wtrysku, wpływa na skład spalin. W świetle wymagań stawianych przez IMO szczególnie ważny jest ich wpływ na spadek zawartości w spalinach tlenków azotu (NO_x).

Jak wynika z danych pomiarowych zawartych w tabeli 1 znaczący spadek ciśnienia powietrza ładującego od wartości znamionowej 0,1 MPa do wartości 0,02 MPa powoduje obniżenie zawartości NO_x w spalinach o około 32%. Opóźnienie wtrysku paliwa o 6° OWK w stosunku do wartości znamionowej (zmiana wartości z 13° OWK na 7° OWK przed GMP) spowodowało redukcję tlenków azotu w spalinach o około 20%.

Jednoczesna zmiana obu parametrów, będąca łączeniem obu metod redukcji NO_x, w celu uzyskania lepszych rezultatów zmniejszenia emisji tlenków azotu wykazuje słuszność takiego działania. Zmiana ciśnienia doładowania do wartości 0,02 MPa oraz kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa do 7° OWK spowodowało spadek emisji NO_x o ponad 40 % (patrz tabela 2).

Tab. 1. Wyniki badań
Tab. 1. Results of the tests

L.p.	p_d	α_{ww}	p_{max}	α_{pmax}	p_i	p_{exp}	p_{maxwtr}	NO _x	SO ₂	CO
	[MPa]	[$^{\circ}$ OWK]	[MPa]	[$^{\circ}$ OWK]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
1.	0,02	-13 ⁰	4,5	13	0,85	3,4	30,8	316	52	364
2.	0,04	-13 ⁰	4,6	17	0,82	3,3	29,9	372	85	261
3.	0,06	-13 ⁰	4,8	11	0,87	3,4	29,9	396	89	293
4.	0,08	-13 ⁰	4,8	11	0,90	3,4	32,2	420	100	256
5.	0,10	-13 ⁰	4,9	11	0,90	3,5	31,0	462	112	269
6.	0,02	-10 ⁰	4,2	16	0,85	3,3	32,4	318	171	403
7.	0,04	-10 ⁰	4,4	14	0,91	3,5	32,5	336	164	318
8.	0,06	-10 ⁰	4,6	14	0,89	3,5	33,7	353	155	325
9.	0,08	-10 ⁰	4,6	14	0,88	3,6	33,3	393	163	271
10.	0,10	-10 ⁰	5,0	14	0,87	3,5	31,2	432	171	239
11.	0,02	-7 ⁰	4,2	19	0,84	3,2	33,7	273	212	467
12.	0,04	-7 ⁰	4,6	19	0,87	3,4	33,4	297	202	399
13.	0,06	-7 ⁰	4,5	20	0,92	3,5	32,7	320	211	341
14.	0,08	-7 ⁰	4,6	20	0,89	3,6	34,7	335	211	324
15.	0,10	-7 ⁰	4,7	20	0,91	3,6	34,3	373	213	298

Tab. 2. Efektywność redukcji NO_x przez spadek ciśnienia powietrza doładowującego oraz kąta wyprzedzenia wtrysku
 Tab. 2. NO_x reduction effectiveness by combined chargers of both parameters in question but of lower values

Kąt wyprzedzenia wtrysku α_{ww} [°OWK]	Ciśnienie doładowania p_d [MPa]	Obniżenie zawartości NO_x w stosunku do wzorcowej [%]
-10	0,08	15
-7	0,08	27,5
-10	0,06	23,5
-7	0,06	31
-10	0,04	27
-7	0,04	36,6
-10	0,02	31
-7	0,02	41

Tak istotną redukcję zawartości tlenków azotu należy uznać za zadawalającą, a metodę za bardzo skuteczną. Należy jednak liczyć się z jednoczesnym obniżeniem wskaźników energetycznych i ekonomicznych silnika. Indykując silnik metodą elektroniczną stwierdzono spadek maksymalnego ciśnienia spalania i średniego ciśnienia indykowanego.

Należy także zauważyć, że wprowadzone podczas badań zmiany ciśnienia powietrza ładującego prowadzą do znacznego wzrostu emisji tlenku węgla (CO).

3. Podsumowanie

Spadek ciśnienia powietrza ładującego i wzrost opóźnienia wtrysku paliwa prowadzi do istotnego obniżenia zawartości tlenków azotu w spalinach silnika okrętowego pracującego na paliwie ciężkim.

Spadek ciśnienia powietrza ładującego wpływa istotnie na wzrost zawartości CO w spalinach. Badania laboratoryjne przeprowadzono na paliwie ciężkim IF40, a więc ich rezultaty mogą być wprost brane pod uwagę dla warunków eksploatacji statków. Z uwagi na możliwość wykonania regulacji silnika w warunkach eksploatacyjnych, bez konieczności ponoszenia kosztów inwestycyjnych, należy metody sprawdzone w badaniach laboratoryjnych uznać za właściwe, szczególnie w odniesieniu do silników budowanych w przeszłości, które bez zmian konstrukcyjnych nie będą spełniać normy IMO.

Zastosowanie opóźnienia wtrysku paliwa i obniżenia ciśnienia powietrza doładowania jako metody obniżania zawartości tlenków azotu w spalinach prowadzi jednocześnie do ograniczenia osiągow silnika, szczególnie mocy indykowanej. Dlatego też metodę tą należy traktować jako zastępczą, o ograniczonym zakresie stosowania. Może być jednak bardzo przydatna dla statków wykonujących zadania eksploatacyjne w akwenach o zastrzonych wymaganiach np.: Zatoka Kalifornijska, Morze Bałtyckie, porty, redy portowe.

Literatura

- [1] Krzyżanowski J., Witkowski, K., Włodarski, J. K., *Zagadnienia spalania paliw ciężkich w silnikach okrętowych z uwagi na ochronę środowiska przed zanieczyszczeniami*, Gdynia, WSM 1995.
- [2] Low Emission News. The Wartsila 30, 1996.
- [3] MaK Toplateure. No 68 Diesel Engine Journal for our Business Friends Nov 1994.
- [4] MAN-B&W, Emission Control of Two-stroke Low-speed Diesel Engines.
- [5] Vollenweider, J., *Exhaust Emission Control of SULZER Marine Diesel Engines*. New Sulzer Diesel LTD, Winterthur, Switzerland, 1996.