

Research on influence of supercharging level of the oxides of nitrogen emission from ship diesel engine

Abstract: The paper discusses the problems protecting the atmosphere against pollution from sea vessels in the background of normative acts, in particular the 73/78 MARPOL Convention (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships) referring to prevention against marine environment pollution, and later amendments to the Convention with Annex VI (Regulation for the Prevention of Air Pollution from Ships) dealing with reducing the emission of nitric oxides and sulphur oxides into the atmosphere by sea vessels engines.

The results of experimental tests of the influence of charging air pressure on content of exhaust gas, especially content nitric oxides (NO_x), of ship diesel engine supplied with marine heavy fuel oil IF40 have been presented in the paper.

Keywords: laboratory tests, super charging air pressure, exhaust gas content, emission of nitric oxides, heavy fuel oils, vessels propulsion, diesel engine, Miller system.

Badania wpływu poziomu doładowania okrętowego silnika tłokowego na poziom emisji tlenków azotu

Streszczenie: W referacie omówiono problematykę ochrony atmosfery przed zanieczyszczeniami ze statków morskich na tle aktów normatywnych, w szczególności Konwencji MARPOL 73/78 (Międzynarodowa konwencja o zapobieganiu zanieczyszczeniom przez statki) odnoszącej się do przeciwdziałania zanieczyszczeniu środowiska morskiego z późniejszymi poprawkami, w tym aneksem VI dotyczącym redukcji emisji do atmosfery przez silniki okrętowe tlenków azotu i tlenków siarki.

W referacie zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych wpływu zmian ciśnienia powietrza doładowującego na skład gazów spalinowych, w szczególności w odniesieniu do zawartości tlenków azotu (NO_x), przez okrętowy silnik tłokowy spalający paliwo ciężkie IF40.

Słowa kluczowe: badania laboratoryjne, ciśnienie powietrza doładowującego, skład gazów wylotowych, emisja tlenków azotu, paliwo ciężkie, silnik okrętowy, silnik ZS, system Millera.

1. Wstęp

W związku z ochroną środowiska morskiego, współczesne okrętowe silniki tłokowe muszą spełniać coraz bardziej rygorystyczne wymagania dotyczące ograniczenia w spalinach zawartości toksycznych produktów spalania emitowanych do atmosfery.

W emitowanych gazach spalinowych silników okrętowych napędu głównego znajdują się między innymi azot, tlen, dwutlenek węgla i para wodna, mniejsze ilości tlenku węgla, tlenków siarki i azotu, węglowodorów i cząstek stałych.

Typowy skład spalin emitowanych przez wolnoobrotowe silniki okrętowe pokazano na rysunku 1, a przez okrętowe silniki czterosuwowe – w tabeli 1.

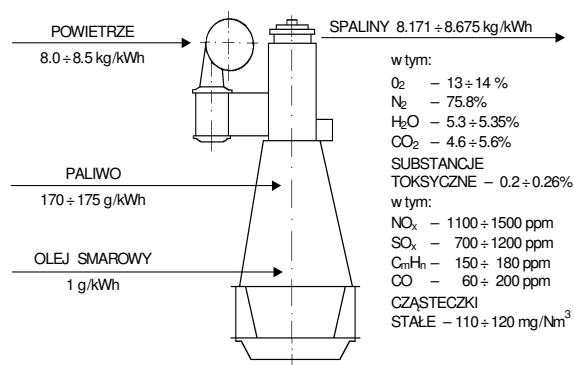
2. Kontrola emisji NO_x

2.1. Ograniczenia normatywne

Tlenki azotu (NO_x) powstają z azotu i tlenu w wysokich temperaturach spalania w cylindrze. NO_x są uważane za związki rakotwórcze oraz przyczyniają się do powstawania smogu fotochemicznego i kwaśnych deszczów.

Instrumenty prawne do kontroli i ograniczenia emisji tlenków azotu inicjowane są na trzech poziomach:

- międzynarodowym (IMO – International Maritime Organization),
- narodowym (np.: EPA w USA – Environmental Protection Agency),
- regionalnym (np.: CARB w USA – Kalifornia Air Resources Bard).



Rys. 1. Bilans substratów i produktów spalania typowego silnika okrętowego [4]

Globalne podejście do kontroli emisji NO_x zostało podjęte przez IMO poprzez załącznik VI do konwencji MARPOL 73/78 (Przepisy o zapobieganiu zanieczyszczaniu powietrza przez statki) [3], który został przyjęty na konferencji dyplomatycznej w 1997 roku. Statki morskie, na których spalane są oleje napędowe i paliwa ciężkie odpowiadają za około 7 procent globalnej emisji NO_x, około 4 procent globalnej emisji dwutlenku siarki i 2 procent globalnej emisji dwutlenku węgla.

Tabela 1. Typowy skład gazów spalinowych okrętowego silnika czterosuwowego [4]

Azot	N ₂	75%
Tlen	O ₂	12,3%
Gazy obojętne	Ar	0,9%
Dwutlenek węgla	CO ₂	5,6%
Woda (para wodna)	H ₂ O	6%
Dwutlenek siarki ¹⁾	SO ₂	12 g /kWh
Tlenki azotu ²⁾	NO ₂	16 g /kWh
Tlenek węgla	CO	0,6 g /kWh
Węglowodory	HC	0,4 g /kWh
Sadza ³⁾		0,05 g /kWh

¹⁾Wartość podana dla koncentracji siarki w paliwie wynoszącej 3%

²⁾Wartość podana dla całkowitej emisji tlenków azotu NO_x oznaczonej jako emisja dwutlenku azotu NO₂

³⁾Wartość podana dla emisji czystej sadzy bez uwzględnienia popiołu i innych składników cząstek stałych.

Załącznik VI dotyczy silników o mocy ponad 130 kW montowanych na nowych statkach zbudowanych po 1 stycznia 2000 (data położenia stępki) i silników zbudowanych wcześniej, które podlegają istotnym zmianom technicznym.

Dopuszczalny poziom emisji NO_x zalecany przez IMO jest zależny od prędkości obrotowej wału korbowego silnika i wynosi:

- 17 g/kWh dla silników o prędkości obrotowej poniżej 130 obr/min,
- $45 \cdot n^{-0.2}$ g/kWh kiedy $2000 > n > 130$,
- 9.84 g/kWh kiedy $n > 2000$ obr/min.

2.2. Zanieczyszczenie powietrza przez statki w Unii Europejskiej

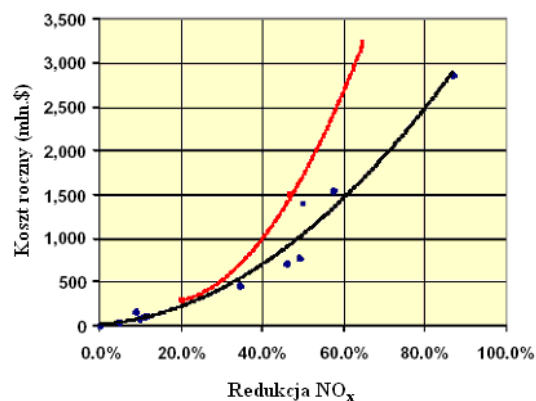
Szczegółowy raport nr 3623 z sierpnia 2000 roku, stworzony na zlecenie Komisji Europejskiej, pokazuje udział statków pływających po wodach Unii w zanieczyszczeniu środowiska. Stanowi on 1,9 miliona ton SO₂ i 2,3 miliona ton NO_x rocznie,

co jest odpowiednikiem emisji spalin z 390 elektrowni o mocy 50 MW każda.

Komisja europejska zleciła przeprowadzenie szeregu analiz, zarówno technicznych jak i ekonomicznych pokazujących wpływ wprowadzenia limitów nakazujących:

- stosowanie paliwa okrętowego o zawartości siarki na poziomach: 1.5%, 1.0% lub 0.5%,
- zmniejszenie emisji NO_x do poziomu: 12g / kWh, 7g / kWh lub 2g / kWh.

Wynika z nich, że efektem redukcji zawartości siarki w paliwie do poziomów: 1,5%; 1,0% oraz 0,5 % jest spadek emisji SO₂ o odpowiednio 29,9%, 35,5% i 40,2%. Następnym zaś wprowadzenia limitów emisji NO_x do wymienionych wyżej wartości jest spadek emisji NO_x odpowiednio o 11,8%; 49,3% i 86,9%. Wymaga to jednak znaczących nakładów finansowych (rys. 2) [2].



Rys. 2. Potencjalne koszty wprowadzenia ograniczenia emisji NO_x w UE [2]:

- aktualny koszt, --- koszty bez wsparcia państwa, ---- koszty przy wsparciu państwa (np. ulgi)

3. Możliwość ograniczenia emisji NO_x poprzez zmianę parametrów powietrza ładującego

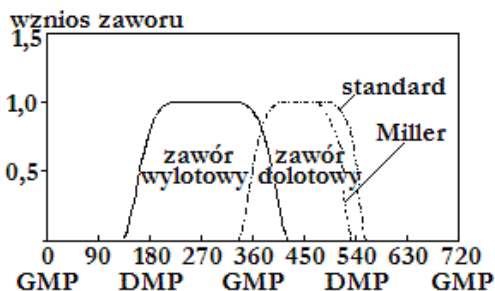
W tej grupie działań podejmowanych dla obniżenia emisji tlenków azotu stosuje się chłodzenie powietrza i zmiany ciśnienia początku suwu sprężania.

Chłodzenie powietrza płuczącego oznacza obniżenie temperatury powietrza na wlocie do cylindra a tym samym obniżenie maksymalnej temperatury w cylindrze. Najprostszy sposób to obniżenie temperatury powietrza poprzez wzrost efektywności chłodnicy powietrza za sprężarką. Testy wykazały, że obniżenie temperatury powietrza o 3°C powoduje zmniejszenie emisji NO_x o 1%. Granicę fizyczną chłodzenia powietrza określa temperatura wody chłodzącej, która w tropiku wynosi 32°C. Uważa się, że temperatura powietrza doładowującego przy pełnym obciążeniu silnika nie powinna być większa niż 40°C.

Dalsze obniżenie temperatury za pomocą konwencjonalnej chłodnicy nie jest możliwe i wymaga rozwiązań specjalnych. Idea takiego rozwiązania

polega na sprężaniu i chłodzeniu powietrza, a następnie rozprężaniu tegoż, co pozwala na dalsze obniżenie jego temperatury. Wymaga to jednak zainstalowania dodatkowej sprężarki za chłodnicą powietrza. Ujemną stroną takiego rozwiązania stanowi dodatkowy koszt systemu, obniżenie efektywności doładowania i zwiększenie zużycia paliwa.

Rozwiązanie tego problemu może stanowić system doładowania Millera zastosowany przez Sulzera w silnikach czterosuwowych ZA40S. Koncepcja tego systemu polega na zastosowaniu w układzie doładowania wysokociśnieniowej sprężarki (wyższe ciśnienie – większa gęstość – większa masa powietrza) i zmianie kąta zamknięcia zaworu wlotowego. Wymaganą masę ładunku powietrza można takim systemie doprowadzić do cylindra w czasie krótszym niż w systemie standardowym i zamknąć wlot powietrza przed DMP – patrz rysunek 3. Skracając tym samym okres napełniania cylindra. Dalejszy ruch tłoka w cylindrze ku DMP powoduje rozprężanie zamkniętego już w cylindrze powietrza a tym samym obniżenie jego temperatury. Przeprowadzone na silniku Sulzer 9S20 badania wykazały, że można w ten sposób uzyskać redukcję NO_x w granicach 15 do 20% bez zwiększenia zużycia paliwa g.c. System ten został z powodzeniem zastosowany w silnikach ZA40S [1, 6].



Rys. 3. Czasokresy otwarcia zaworów wymiany ładunku w okrętowym silniku czterosuwowym – układ standardowy i Millera.

Innym przykładem rozwiązania zmierzającego do obniżenia poziomu emisji NO_x jest wprowadzanie wody do strefy spalania. W referacie ograniczono rozważania tylko do nawilżania powietrza doładowującego poprzez wtryskiwanie gorącej wody w strumień tłoczonego powietrza. W zastosowaniu do silników okrętowych stosowane są dwa systemy:

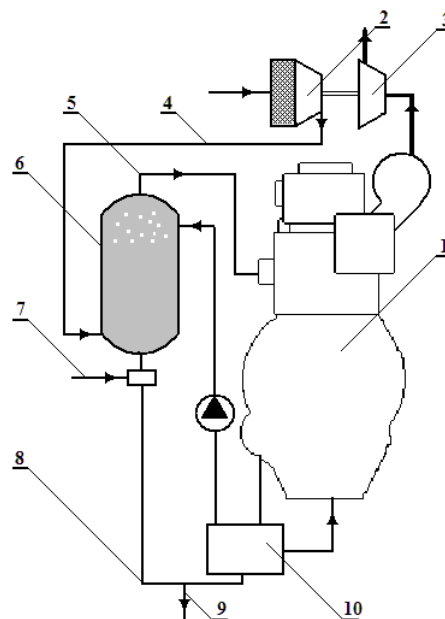
- CASS (Combustion Air Saturation System),
- HAM (Humid Air Motor system).

W rozwiązaniu CASS (Wärtsilä i Marioff Oy Company) poprzez specjalne dysze Hi-Fog następuje wprowadzenie rozpylonej wody bezpośrednio w strumień powietrza za turbosprężarką.

Koncern MAN podjął próby skutecznej redukcji NO_x poprzez zwiększenie wilgotności powietrza doładowania za pomocą pary wodnej. Realizuje to system HAM (niemieckiej firmy Munters Euro-

form), w którym sprężone przez sprężarkę, gorące powietrze podawane jest do wieży nawilżania, do której podawana jest para otrzymana z wody morskiej. Schemat systemu pokazano na rysunku 4. W prototyp takiego systemu wyposażono czterosuwowy, średnioobrotowy silnik okrętowy Pielstick, dla którego wykazano około 25% redukcję NO_x . Jednocześnie, zastosowanie HAM nie wywołało istotnego wzrostu jednostkowego zużycia paliwa, emisji tlenku węgla, węglowodorów i zadymienia spalin [5].

Wpływ ciśnienia powietrza doładowania na emisję NO_x zbadano również w warunkach laboratoryjnych, a wyniki tego eksperymentu omówiono w rozdziale 4.



Rys. 4. Schemat systemu HAM – podawania wilgotnego powietrza do silnika w celu redukcji emisji NO_x [5]: 1 – silnik, 2 – sprężarka, 3 – turbina, 4 – gorące sprężone powietrze, 5 – nawilżone i schłodzone powietrze, 6 – wieża nawilżania, 7 – napełnianie wodą, 8 – obwód cyrkulacji wody, 9 – spust wody, 10 – wymiennik ciepła.

4. Badania laboratoryjne wpływu ciśnienia powietrza ładującego na emisję tlenków azotu

Badania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym z silnikiem jednocylindrowym, dwusuwowym, wodzikowym doładowanym dmuchawą Roots'a. Stanowisko to umożliwia zasilanie silnika paliwem ciężkim będącym mieszaniną oleju napędowego i oleju ciężkiego.

Stanowisko wyposażono między innymi w:

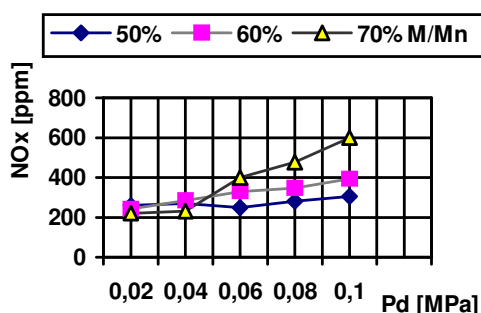
- torsjometr,
- indykator typu elektronicznego z przetwornikami do pomiaru ciśnienia w cylindrze i w przewodzie wtryskowym,

- analizator składu spalin Wimmer.

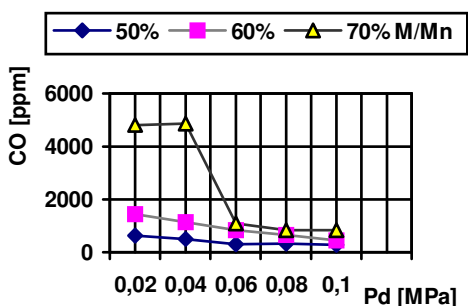
Przebieg eksperymentu i jego rezultaty

Program eksperymentu przewidywał określenie wpływu ciśnienia powietrza doładowania na poziom emisji tlenków azotu. Ciśnienie doładowania zmieniano w zakresie od 0,02 MPa do 0,1 MPa co 0,02 MPa. Silnik pracował ze stałą prędkością obrotową wynoszącą 230 obr/min, na trzech wybranych obciążeniach: 50%, 60% i 70% nominalnego momentu obrotowego i zasilany był paliwem ciężkim IF40. Kolejne obciążenia silnika zadawano hamulcem wodnym, a zmiany ciśnienia doładowania realizowano poprzez zmianę prędkości obrotowej silnika napędzającego dmuchawę Roots'a.

Wybrane rezultaty testu zestawiono w tabeli 2 i pokazano na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Zawartość NO_x w spalinach w zależności od ciśnienia doładowania i obciążenia silnika



Rys. 6. Zawartość CO w spalinach w zależności od ciśnienia doładowania i obciążenia silnika

Ogólnie można stwierdzić, że istnieje wyraźna zależność pomiędzy ciśnieniem powietrza doładowującego, a składem spalin. Szczególne znaczenie, z uwagi na wymagania IMO, ma tu wpływ ciśnienia doładowania na poziom emisji NO_x.

Spadek ciśnienia powietrza doładowującego powoduje obniżenie zawartości NO_x w spalinach, co pokazują dane zamieszczone w tabeli 2 i na wykresie na rysunku 5. Przebieg tworzenia się

tlenków azotu zależy głównie od temperatury spalania oraz koncentracji tlenu i azotu w komorze spalania. Spadek ciśnienia powietrza doładowującego doprowadził prawdopodobnie do zmniejszenia współczynnika nadmiaru powietrza, a więc i koncentracji tlenu doprowadzonego do cylindra. Zawartość NO_x, dla zastosowanych zmian ciśnienia doładowania, dla obciążenia silnika wynoszącego 70% M_n spada blisko trzykrotnie (z 601 ppm do 220 ppm). Jednak należy przypomnieć, że tak duży spadek zawartości NO_x został osiągnięty poprzez znaczną redukcję ciśnienia doładowania z 0,1 MPa do 0,02 MPa.

Redukcja ciśnienia doładowania z 0,1 MPa do 0,02 MPa powoduje niewielki wzrost zawartości CO w spalinach przy 50% i 60% M_n i bardzo duży (około dziesięciokrotny) dla obciążenia silnika 70% M_n (patrz tabela 2 i rysunek 6). Ilość tlenu węgla wydzielanego przez silnik o zapłonie samoczynnym zależy między innymi od ogólnego i lokalnego nadmiaru powietrza w komorze spalania, a także od przebiegu ciśnień i temperatur obiegu oraz reakcji utleniania węglowodorów. Dlatego należało się spodziewać na skutek spadku ciśnienia powietrza doładowującego, wzrostu zawartości CO w spalinach.

5. Wnioski

1. Spadek ciśnienia powietrza doładowującego umożliwia obniżenie zawartości tlenków azotu w spalinach silnika o zapłonie samoczynnym, zasilanego paliwem ciężkim IF40.
2. Jednakże należy pamiętać, że uznanie spadku ciśnienia doładowania jako skutecznej metody redukcji emisji NO_x, wywoła wzrost zawartości w spalinach innych składników w tym w szczególności tlenu węgla (CO).
3. Przedstawione wyniki badań mogą być brane pod uwagę przez armatorów statków morskich. Wprawdzie testy wykonano w warunkach laboratoryjnych, ale silnik był zasilany paliwem ciężkim IF40.

Tabela 2. Parametry indykowane i rezultaty analizy składu spalin dla różnych obciążeń silnika i ciśnienia powietrza doładowania.

Obciążenie silnika	Ciśnienie doładowania	Parametry indykowane				Skład spalin (wybrane składniki)		
		p_{max}	α_{pmax}	p_i	p_{exp}	NO_x	CO	CO_2
M/M _n [%]	p_d [MPa]	p_{max} [MPa]	α_{pmax} [°]	p_i [MPa]	p_{exp} [MPa]	[ppm]	[ppm]	[%]
50	0,02	4,1	15	0,78	3,1	259	638	3,9
	0,04	4,5	17	0,81	3,2	270	498	3,2
	0,06	4,6	8	0,81	3,3	248	307	2,3
	0,08	4,6	9	0,79	3,3	279	322	2,2
	0,10	4,7	10	0,82	3,3	306	272	2,2
60	0,02	4,3	14	0,86	3,2	241	1446	4,1
	0,04	4,7	14	0,92	3,5	284	1136	3,4
	0,06	4,6	15	0,88	3,4	330	836	3,4
	0,08	4,8	15	0,91	3,4	348	660	3,0
	0,01	4,7	16	0,91	3,4	394	450	3,1
70	0,02	4,5	14	1,00	3,5	220	4807	4,9
	0,04	4,6	13	0,98	3,4	233	4873	5,3
	0,06	4,8	15	0,98	3,6	400	1081	4,6
	0,08	4,8	15	1,02	3,5	477	825	4,2
	0,10	5,0	14	1,01	3,6	601	845	4,5

Literatura

- [1] Holtbecker M.: Geist, Emission technology. Sulzer RTA series. Wartsila NSD, July 1998.
- [2] Final Report for European Commission. Foundation for International Environmental Law and Development, February 2000.
- [3] MARPOL 73/78 Consolidated Edition, 2002. IMO, London, 2002 r.
- [4] Piotrowski I., Witkowski K.: Eksploatacja okrętowych silników spalinowych. Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2002 r.
- [5] Woodyard D.: Marine Diesel Engines and Gas Turbines. ELSEVIER Butterworth- Heine- mann, 8th edition, Oxford, 2004 r.
- [6] Vollenweider J.: Emission control guidelines for Sulzer ZA40S engines. New Sulzer Diesel, May 1991.

Mr Kazimierz Witkowski, DEng. –
Adiunkt in the Faculty of Mechanical
Engineering at Gdynia Maritime University.

*Dr inż. Kazimierz Witkowski – adiunkt
na Wydziale Mechanicznym Akademii
Morskiej w Gdyni.*

