

ALTERNATIVE METHOD OF NITRIC OXIDE EMISSION ESTIMATION FROM TWO STROKE SHIP ENGINES

Jerzy Kowalski

Akademia Morska w Gdyni

Katedra Podstaw Techniki

81-225 Gdynia, ul. Morska

tel. (58)69 01 331, e-mail: jerzy95@am.gdynia.pl

Summary

The International Maritime Organization introduced Annex VI to Marpol Convention in 1997. This Annex forces to monitoring and limited the nitric oxides emission from ship engines above 130 [kW]. In this paper, a some issues of Annex VI regulations is presented. The some modeling aspects of nitric oxides emission from ship engines are presented as well. The results of modeling could be applied to assess the nitric oxide emission level.

ALTERNATYWNA METODA OCENY POZIOMU EMISJI TLENKÓW AZOTU Z DWUSUWOWEGO SILNIKA OKRĘTOWEGO

Streszczenie

W 1997 roku Międzynarodowa Organizacja Morska wprowadziła Załącznik VI do Konwencji Marpol. Załącznik ten narzuca konieczność monitorowania i ograniczania emisji tlenków azotu z silników okrętowych o mocy powyżej 130[kW]. W artykule zaprezentowano zarys przepisów zawartych w Załączniku VI Konwencji Marpol oraz pewne aspekty modelowania emisji tlenków azotu z silników okrętowych, które mogą być wykorzystane do oceny poziomu emisji tlenków azotu.

1. Wprowadzenie

Związki z grupy tlenków azotu są jednymi z najbardziej toksycznych substancji gazowych emitowanych z silnika spalinowego. Wpływają one destrukcyjnie zarówno na faunę jak i florę, są czynnikiem degenerującym warstwę ozonową, przyczyniają się do zakwaszania gleb oraz kwaśnych deszczów [8], [12]. Choć tylko niewielka część tlenków azotu w atmosferze ma swoje źródło w działalności człowieka, to z biegiem lat zauważalny jest postępujący wzrost stężeń tych związków zwłaszcza w obrębie aglomeracji miejskich. Przyczyny tego faktu należy szukać we wzroście emisji wynikającej z działalności ludzkiej. Szacuje się, że ok. 7% wszystkich źródeł antropogenicznych tlenków azotu stanowi flota handlowa, a w szczególności eksploatowane na statkach silniki spalinowe zarówno tłokowe jak i turbinowe [20].

Mając ten fakt na uwadze Międzynarodowa Organizacja Morska wprowadziła w 1997 roku Załącznik VI do Konwencji Marpol 73/78 pt. „Prawidła zapobiegania zanieczyszczenia powietrza przez statki” [21] wraz z „Kodeksem sterowania emisją tlenków azotu z wysokoprężnych silników okrętowych” (*Technical Code on Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines*) zwanym też w skrócie „Kodeksem technicznym NOx” [6].

Wspomniany Załącznik nakłada na armatorów statków konieczność monitorowania oraz w razie potrzeby, ograniczania emisji tlenków azotu ze wszystkich eksploatowanych na

statkach silników spalinowych o mocy powyżej 130 [kW]. Zawiera on dopuszczalne wartości poziomów emisji tlenków azotu jak również sposoby ich weryfikacji. Właściwości tlenków azotu powodują konieczność stosowania złożonych procedur zmierzających do weryfikacji poziomu emisji tych związków z eksploatowanych silników. Powodem tego stanu rzeczy jest wpływ parametrów otoczenia oraz składu paliwa na ilość wytworzonych tlenków azotu [14].

Zgodnie z zapisami *Kodeksu* silnik spełniający normy emisji powinien posiadać ważny certyfikat, który jest nadawany przez upoważniony, niezależny organ kontroli technicznej. Certyfikat ten zaświadcza zgodność parametrów eksploatowanego silnika z wymaganiami i wydaje się go dla każdego nowo wybudowanego silnika (bądź rodziny silników) na podstawie pomiarów bezpośrednich u producenta. Uzyskany dokument musi być następnie zweryfikowany przez bezpośrednie pomiary emisji tlenków azotu przeprowadzone po zamontowaniu silnika na statku, zanim zostanie on wprowadzony do eksploatacji. Ze względu na zmiany stanu technicznego silnika w trakcie jego eksploatacji, powodujące dość znaczne zmiany poziomu emisji [9], [11] nałożono również na armatorów konieczność okresowego przedłużania ważności certyfikatu. Choć procedura przedłużania certyfikatu wydaje się być jak najbardziej zasadna, wzbudza ona wiele kontrowersji z powodu bezpośredniego obciążenia armatorów i eksploatatorów statków dużymi kosztami pomiarów. Zakłada się mianowicie, iż w celu dopuszczenia silnika do dalszej eksploatacji konieczne jest sprawdzenie nastaw i parametrów silnika oraz innych jego elementów wpływających na poziom emisji tlenków azotu z wartościami dopuszczalnymi, zapisanymi w założonej specjalnie w tym celu kartotece technicznej silnika. W przypadku stwierdzenia przekroczenia tych wartości konieczny jest bezpośredni pomiar emisji. Istnieje uzasadniona obawa, że ze względu na proces powstawania tlenków azotu w komorze spalania silnika, a zwłaszcza złożony wpływ wielu parametrów i elementów silnika, pomiary bezpośrednie mogą stać się najczęściej stosowanym sposobem oceny emisji tlenków azotu z silnika okrętowego.

Pomiar bezpośredni emisji tlenków azotu na statku wiąże się najczęściej z koniecznością wyłączenia statku z eksploatacji oraz instalacją dodatkowej aparatury pomiarowej w siłowni okrętowej. Polega on na przynajmniej czterokrotnym pomiarze stężenia tlenków azotu w spalinach w ściśle określonych punktach pracy silnika. Uzyskane stężenia muszą być następnie przeliczone na emisję jednostkową wyrażoną w $[g/(kW \cdot h)]$, co wiąże się z dodatkowymi pomiarami mocy lub momentu obrotowego silnika oraz natężenia przepływu emitowanych spalin. Ze względu na uciążliwy, a w przypadku silników o małej liczbie cylindrów, wręcz niemożliwy pomiar natężenia przepływu spalin dopuszcza się w *Kodeksie* tak zwaną metodę rozszerzonego bilansu węgla, co pociąga za sobą konieczność dodatkowych pomiarów stężeń innych pierwiastków składowych spalin. Na emisję tlenków azotu mają również wpływ parametry otoczenia. Z tego powodu równolegle z pomiarami stężeń konieczne są też pomiary takich parametrów jak wilgotność i temperatura powietrza doładowującego silnik. Uzyskane wyniki pomiarów emisji tlenków azotu powinny być następnie sprowadzone do warunków standardowych ze względu na parametry powietrza, a następnie uśrednione za pomocą odpowiedniej średniej wagowej zawartej w *Kodeksie NOx*. Należy nadmienić, że ze względu na różnorodność warunków pomiarowych dopuszcza się możliwość uzyskania certyfikatu przez silnik nawet przy przekroczeniu wartości dopuszczalnych emisji o 15% co tłumaczy się możliwością występowania błędów pomiarowych na takim poziomie [6].

Ze względu na złożony proces pomiarowy zmierzający do weryfikacji dopuszczalnego poziomu emisji tlenków azotu oraz wysoki koszt wykonania pomiarów przy małej dokładności wiele ośrodków naukowych prowadzi ciągu prace badawcze ukierunkowane na uproszczenie procedur pomiarowych przy jednoczesnym wzroście efektywności.

Autor uważa, że znajomość zjawisk zachodzących w komorze silnika podczas procesu spalania zmierzających do powstania i emisji tlenków azotu jest na tyle zaawansowana, że

umożliwia ona ocenę poziomu emisji bez konieczności pomiarów bezpośrednich oraz instalacji dodatkowej aparatury pomiarowej w siłowni okrętowej przy założonym przez *Kodeks NOx* 15% błędzie oceny. Ocena taka może być przeprowadzona w wyniku zastosowania procedury bazującej na modelu matematycznym opisującym zjawiska powstawania tlenków azotu, opartym na standardowych pomiarach parametrów pracy eksploatowanego silnika dostępnych w siłowni okrętowej statku.

2. Czynniki wpływające na powstawanie tlenków azotu w komorze spalania silnika tłokowego

Tlenki azotu powstają w komorze silnika podczas procesu roboczego w wyniku utleniania azotu warunkach wysokiej temperatury i wysokiego ciśnienia. Azot biorący udział w tych reakcjach ma swoje pochodzenie w głównej mierze z powietrza, jednakże pewna jego część pochodzi z paliwa. Proces utleniania azotu jest odwracalny, ale proces odwrotny jest znaczący dopiero podczas powolnego obniżania temperatury. Niestety w komorze spalania część utworzonego tlenku azotu dostając się w pobliże ścianki cylindra o relatywnie niższej temperaturze ulega tak zwanemu zamrożeniu, co uniemożliwia jego redukcję. Drugim w kolejności ilości powstawania jest dwutlenek azotu. Zakłada się, że obecne w spalinach silników wysokoprężnych dwutlenki azotu powstają w wyniku wtórnego utleniania tlenku azotu w tak zwanych strefach popłomieniowych komory spalania silnika oraz w kolektorze wydechowym [3], [12].

W celu pełnego rozpatrzenia procesu powstawania tlenków azotu w komorze spalania należałoby uwzględnić wszystkie reakcje chemiczne procesu spalania paliwa w całym obszarze komory. Jednakże w wyniku niedostatecznej wiedzy na temat przebiegu poszczególnych reakcji chemicznych podczas spalania, rozkładu temperatur i ciśnień w komorze silnika, braku informacji co do ilości i szybkości powstawania poszczególnych związków chemicznych oraz niemożności uzyskania ścisłego składu węglowodorowego spalane paliwa po jego wstępnej pirolizie w komorze spalania nie jest możliwa pełna analiza zjawisk. Dlatego też stosuje się w praktyce szereg uproszczeń zmierzających do umożliwienia uzyskania prawidłowych wartości stężeń tlenków azotu przy tak skąpych danych [5], [17].

Wspomniane uproszczenia polegają przede wszystkim na:

- ograniczeniu ilości reakcji spalania do najbardziej istotnych,
- założeniu zastępczego składu paliwa węglowodorowego,
- założeniu stężeń równowagowych niektórych pierwiastków biorących udział w reakcjach.

Bez względu jednak na to jakie zostaną wprowadzone uproszczenia do modelu, ostatecznie wpływ na stężenie tlenków azotu w gazach wydechowych silnika mają stężenia poszczególnych związków biorących udział w reakcjach powstawania tlenków oraz szybkość przebiegu tych reakcji. Prędkość przebiegu reakcji określana jest w kinetyce chemicznej tak zwanym współczynnikiem prędkości reakcji wyznaczanym doświadczalnie w tzw. reaktorach przepływowych i najczęściej aproksymowanym równaniem Arrheniusa o następującej postaci:

$$k = A \cdot T^{\beta} \cdot \exp(-E/RT) \quad (1)$$

gdzie:

A, β - wartości stałe,

T - temperatura w [K],

R - uniwersalna stała gazowa w [J/(kmol×K)],

E - energia aktywacji reakcji chemicznej w [J/kmol].

Wartości A , β oraz E niezbędne do wyznaczenia współczynników prędkości poszczególnych reakcji chemicznych są prezentowane między innymi w publikacjach [1], [4], [13], [18]. Jak wynika z równania (1) na prędkość reakcji mają wpływ przede wszystkim temperatura oraz energia aktywacji, która może być zdefiniowana jako bariera energetyczna, która musi być pokonana aby reakcja mogła zaistnieć [7]. Energia ta ma wartość stałą dla konkretnej reakcji. Trzeba tu nadmienić że przypadku, gdy przebieg reakcji prowadzi do zmiany ilości substancji (np. synteza) ważnym czynnikiem wpływającym na stężenie produktów reakcji (w tym przypadku tlenków azotu) jest panujące w komorze ciśnienie.

Reasumując bezpośrednimi czynnikiem wpływającymi na poziom emisji tlenków azotu są temperatura i ciśnienie procesu spalania paliwa w komorze silnika, stężenia pierwiastków biorących udział w reakcjach utleniania paliwa oraz czas spalania gdyż stężenia tlenków azotu zazwyczaj nie osiągają w komorze silnika stężeń równowagowych. Wnioskując dalej można stwierdzić że wszystkie parametry i nastawy silnika wpływające na którykolwiek z wspomnianych czynników bezpośrednio wpływających na stężenie tlenków azotu w spalinach mają również wpływ pośredni na tą że emisję.

Tak więc pośrednimi czynnikiem wpływającymi na emisję tlenków azotu z silnika tłokowego są:

- parametry pracy silnika takie jak moc, prędkość obrotowa, zużycie paliwa, timing zaworów itp.,
- parametry konstrukcyjne silnika takie jak wymiary komory spalania, wymiary i budowa aparatury paliwowej, usytuowanie zaworów i wtryskiwaczy itp.,
- własności paliwa takie jak skład węglowodorowy, zawartość azotu,
- parametry powietrza doładowującego takie jak ciśnienie doładowania, wilgotność i temperatura powietrza.

Biorąc pod uwagę przedstawione rozważania można stwierdzić że możliwa jest ocena poziomu emisji tlenków azotu na podstawie oceny powyższych parametrów bez konieczności bezpośrednich pomiarów na statku. Ocenę taką można przeprowadzić na podstawie algorytmu bazującego na teoretycznym modelu spalania oraz informacjach zaczerpniętych od producentów eksploatowanego silnika i spalanej paliwa. Danymi wejściowymi modelu mogą być parametry pracy silnika uzyskiwane z urządzeń pomiarowych standardowo zainstalowanych w siłowni okrętowej.

3. Modelowanie procesu spalania dwusuwowego silnika okrętowego

Od wielu lat prowadzone są szeroko zakrojone badania zmierzające do uzyskania adekwatnego modelu matematycznego zjawisk zachodzących w komorze spalania silnika podczas jego pracy. Do takich modeli zalicza się modele trójwymiarowe, wielowarstwowe uwzględniające między innymi zjawiska turbulentnego mieszania i spalania paliwa. Niestety, modele tego typu wymuszają konieczność zastosowania komputerów o dużej mocy obliczeniowej, co przekłada się na wysoki koszt modelowania. Z drugiej strony zastosowanie takich modeli może okazać się nieskuteczne w przypadku braku dostatecznej ilości danych wejściowych do modelowania.

W przypadku modelowania procesu spalania w komorze silnika tłokowego dla oceny poziomu emisji tlenków azotu z eksploatowanego silnika zasadne jest zastosowanie modelu możliwie uproszczonego. Powodem takiego podejścia jest w głównej mierze brak wystarczającej ilości danych wejściowych możliwych do uzyskania podczas eksploatacji silnika jak również mała dokładność aparatury pomiarowej w siłowni okrętowej. Choć autorzy pracy [3] są zgodni co do tego że modele spalania bez uwzględnienia zjawisk turbulencji mogą nie być wystarczające do uzyskania prawidłowych wyników, to należy podkreślić, że wnioski te są zazwyczaj stawiane w oparciu o badania nad silnikami

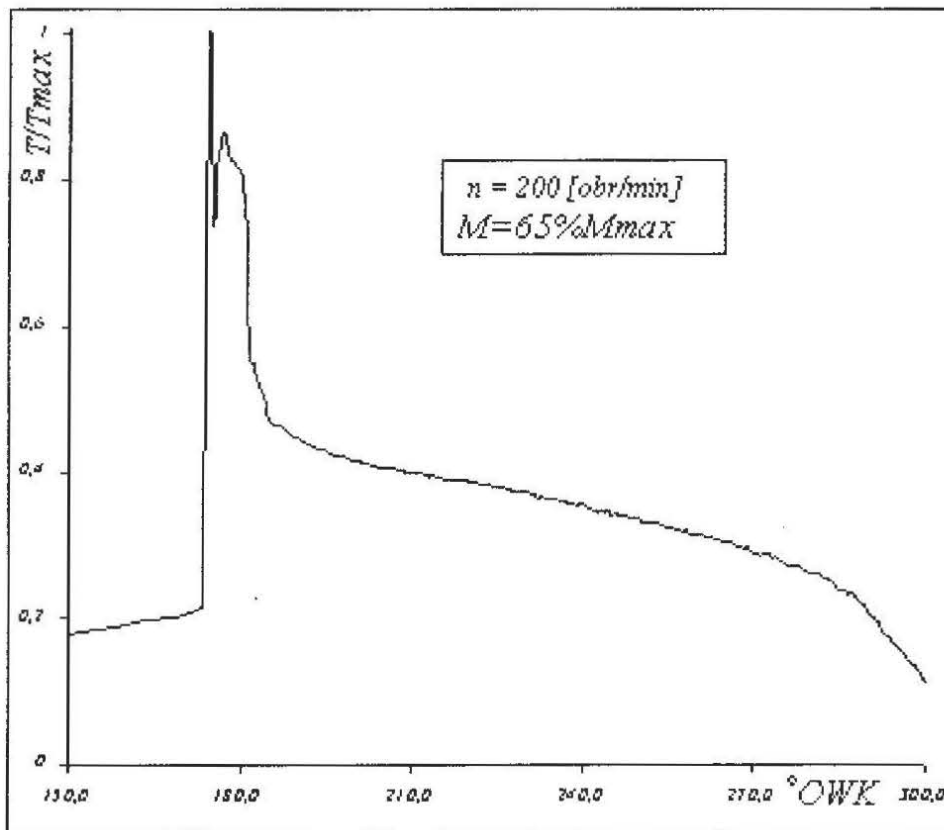
samochodowymi. Silniki te w odróżnieniu od wielkogabarytowych, okrętowych silników napędu głównego posiadają często całkowicie odmienną budowę i parametry pracy. Duży odsetek silników napędu głównego statków floty handlowej stanowią duże, dwusuwowe silniki wozdżikowe o przepłukaniu wzdłużnym i wtrysku bezpośrednim. Na podstawie danych zaczerpniętych między innymi z [2], [16] do najważniejszych różnic między tymi silnikami w stosunku do silników spalinowych stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym należy zaliczyć:

- duże gabaryty silników; przykładowa pojemność skokowa silnika K98MC firmy MAN B&W wynosi ponad 1,8 [m³] na jeden cylinder,
- prędkość obrotowa silnika; nawet kilkaset razy mniejsza od przeciętnego silnika samochodowego, gdyż dla wspomnianego silnika prędkość maksymalna to 94[obr/min].
- stosunek skoku do średnicy cylindra przekraczający 4; dla przykładowego silnika RT-flex-58T-B firmy Wartsila wartość współczynnika L/D wynosi 4,1,
- 2-3 wtryskiwacze na jeden cylinder rozmieszczone promieniowo bezpośrednio w komorze spalania,
- przepłukanie wzdłużne cylindra,
- jeden, centralnie umieszczony zawór wydechowy sterowany hydraulicznie,
- wysokie ciśnienie doładowania uzyskiwane nawet z czterech, rozmieszczonych w układzie pulsacyjnym turbosprężarek na jeden silnik.

Powyższe różnice konstrukcyjne silników mają na celu uzyskanie możliwie dużej jednorodności mieszanki paliwa z powietrzem oraz szybkie spalanie w możliwie dużej objętości komory spalania. Wydłużenie komory spalania, niespotykane w silnikach stosowanych w motoryzacji, pozwala na dokładne przepłukanie oraz wysoką sprawność przy niskim zużyciu jednostkowym paliwa często nie przekraczającym 170[g/kW×h].

Przedstawione powyżej różnice między konstrukcjami silników samochodowych i okrętowych napędu głównego w znacznym stopniu uzasadniają zastosowanie jednostrefowego modelu spalania dla oceny poziomu emisji tlenków azotu z silnika. Zastosowanym przez autora modelem jest model jednostrefowy, określający parametry środowiska panującego w komorze spalania podczas procesu roboczego silnika dwusuwowego, wozdżikowego z przepłukaniem wzdłużnym o zapłonie samoczynnym. Wykorzystuje on parametry wejściowe pochodzące z pomiarów bezpośrednich podczas eksploatacji silnika. Spalanie paliwa oparto na modelu parowania pojedynczej kropli paliwa w warunkach mikrogravitacji przy założeniu zerowej prędkości paliwa względem powietrza w komorze spalania. Założenie takie można poczynić ze względu na fakt, iż prawidłowy wtrysk paliwa do cylindra powoduje bardzo duże rozdrobnienie oraz praktycznie natychmiastowe porywanie kropeł paliwa przez powietrze o znacznej gęstości wynikłej z wysokiego ciśnienia doładowania i sprężania. Paliwo jest wtryskiwane do cylindra poprzez wtryskiwacz strumieniowy zamknięty, zgodnie z nomenklaturą przedstawioną w [15]. Ilość wtrysniętego paliwa zdeterminowana została opisem ruchu tłoczka pompy paliwowej. Jakość wtrysku zależy w głównej mierze od prędkości chwilowej tłoczka pompy wtryskowej i różnicy ciśnień między ciśnieniem w przewodzie paliwowym a ciśnieniem panującym w komorze spalania. Jakość tą często określa się przez podanie średniej średnicy kropeł w chmurze paliwa wtryskiwanego do cylindra oraz statystycznego parametru rozkładu kropeł w chmurze. W celu określenia jakości wtrysku zastosowano rozkład Rosina-Rammlera [7], [15]. Za ogniska samozapłonu uznano obszary komory spalania w których powstało stężenie par paliwa w powietrzu osiagające punkt samozapłonu. Położenie wału korbowego silnika dla tego punktu wyznaczono z rozwiniętego wykresu indykatorowego podanego w postaci dyskretyzowanej z indykatora elektronicznego. Energia uzyskana w wyniku spalania paliwa została obliczona z użyciem dolnej wartości opałowej paliwa obliczonej wg [19]. Uzyskana

energia jest wykorzystania do napędu tłoka silnika oraz podniesienia energii wewnętrznej układu, której funkcją jest temperatura panująca w komorze spalania. Dokładniejszy opis modelu znajduje się w publikacji [10], w której to podano ściśle zależności matematyczne wraz z dyskusją uzyskanych wyników. Przykładowy wynik modelowania procesu spalania przedstawiono na rysunku 1. Wynik ten uzyskano dla danych eksploatacyjnych silnika laboratoryjnego pracującego ze stałą prędkością obrotową równą 200 [obr/min], stałym współczynnikiem nadmiaru powietrza równym 4,8 oraz kątem wyprzedzenia wtrysku równym 7°.



Rys. 1. Przebieg temperatury w komorze silnika podczas procesu spalania.
Fig. 1. Temperature in the combustion chamber during combustion process.

Uzyskana temperatura spalania oraz ciśnienie zmierzone z użyciem indykatora elektronicznego są parametrami niezbędnymi do wyznaczenia emisji tlenków azotu z silnika. Znając te parametry możliwe jest stworzenie modelu powstawania tlenków azotu opartego o najważniejsze dla tego zjawiska reakcje chemiczne. Niestety zastosowanie wygodnego w użyciu modelu Zeldowicza [3] może okazać się niewystarczające. Jak dowodzą wyniki badań zamieszczone między innymi w [7] zastosowanie modelu Zeldowicza w modelowaniu emisji tlenków azotu z silnika spalinowego daje wyniki zaniżone w stosunku do wartości mierzonych, a wiarygodne wartości uzyskuje się dopiero po zastosowaniu w równaniach stężeń substratów reakcji o wartościach ponadrownowagowych. Zastosowanie modelu Zeldowicza do modelowania emisji tlenków azotu z silnika okrętowego może stać się jeszcze bardziej problematyczne ze względu na wspomniane różnice konstrukcyjne między tymi silnikami a silnikami samochodowymi oraz uzyskiwane wyższe parametry termodynamiczne gazów w komorze spalania podczas cyklu roboczego.

4. Podsumowanie

Wysokie koszty bezpośrednich pomiarów emisji tlenków azotu dokonywanych podczas eksploatacji silnika okrętowego przy jednocześnie niewielkiej dokładności skłaniają do poszukiwania nowych rozwiązań tego problemu. Jedną z metod oceny poziomu emisji tlenków azotu może być proponowana przez autora ocena oparta na parametrach pracy silnika z wykorzystaniem aparatury pomiarowej standardowo dostępnej w siłowni okrętowej. Ze względu na różnice konstrukcyjne między silnikami samochodowymi i wielkogabarytowymi silnikami okrętowymi może okazać się zasadne stwierdzenie, że jednostrefowy model spalania paliwa w komorze silnika jest wystarczający do określenia temperatury spalania. Wartość tej temperatury jest niezbędna do oceny poziomu emisji tlenków azotu.

Praca jest finansowana w ramach projektu badawczego Komitetu Badań Naukowych 4T12C 047 26 w latach 2004-2005.

Literatura

- [1] Barlow R. S., Smith N. S. A., Chen J.-Y., Bilger R. W., *Nitric Oxide Formation in Dilute Hydrogen Jet Flames: Isolation of the Effects of Radiation and Turbulence-Chemistry Submodels*, Combustion and Flame 117, str. 4-31, Elsevier Science 1999.
- [2] *Engine selection and project manual Sulzer RT-flex*, Wartsila Switzerland, 2003.
- [3] Heywood J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill 1988.
- [4] Glarborg P., Alzueta M. U., Dam-Johansen K., Miller J. A., *Kinetic modeling of Hydrocarbon/Nitric Oxide Interactions in a flow reactor*, Combustion and Flame 115, str. 1-27, Elsevier Science 1998.
- [5] Jarosiński J., *Techniki czystego spalania*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
- [6] *Kodeks sterowania emisją tlenków azotu z wysokoprężnych silników okrętowych*, Wydawnictwa Polskiego Rejestru Statku, Gdańsk 2000.
- [7] Kowalewicz A., *Podstawy procesów spalania*, WNT, Warszawa 2000.
- [8] Kowalski J., *Emisja tlenków azotu z silnika okrętowego – aspekty modelowania*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni Nr 49, Gdynia 2003 str. 119-137.
- [9] Kowalski J., Tarełko W., *Wpływ wybranych parametrów pracy silnika dwusuwowego na poziom emisji tlenków azotu*, Materiały konferencyjne XXIII Sympozjum siłowni okrętowych, Gdynia 2002, str. 113-118.
- [10] Kowalski J., Tarełko W., *Modeling aspects of nitric oxides emission from two-stroke ship engine*, Materiały konferencyjne Explo-Diesel&Gas Turbine, Międzyzdroje 2003, 329-338.
- [11] Kowalski J., *Wpływ stanu technicznego wtryskiwacza na poziom emisji tlenków azotu ze spalinowego silnika okrętowego*, Materiały konferencyjne XXIV Sympozjum siłowni okrętowych, Zeszyty naukowe WSM Szczecin Nr 71, Szczecin 2003, str. 213-222.
- [12] Merkisz J., *Ekologiczne problemy silników spalinowych*, WPP, Poznań 1999.
- [13] Meunier Ph., Costa M., Carvalho M. G., *The formation and destruction of NO in turbulent propane diffusion flames*, Fuel 77, 15, str. 1705-1714, Elsevier Science 1998.
- [14] *Norma PN-EN ISO 8178. Pomiar emisji spalin*. Polski Komitet Normalizacyjny. Styczeń 1999.

- [15] Orzechowski Z., *Rozpylanie cieczy*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 1976.
- [16] *Product Guide; engine data K98MC*, Materiały katalogowe firmy MAN B&W.
- [17] Rychter T., Teodorczyk A., *Modelowanie matematyczne roboczego cyklu silnika tłokowego*, PWN, Warszawa 1990.
- [18] Salomon A., *Selektywność pierwotnych metod redukcji emisji tlenków azotu powstających podczas spalania*, Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1999.
- [19] Urbański P., *Paliwa i Smary*, Wydawnictwo Fundacji WSM w Gdyni, Gdańsk 1999.
- [20] Witkowski K., Krzyżanowski J., *Badania możliwości dostosowania eksploatowanych silników okrętowych do spełnienia norm emisji toksycznych składników spalin*, Materiały Seminarium Zespołu Środowiskowego Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN, Wydawnictwo WSM Gdynia, Gdynia 2001, str. 47-63.
- [21] *Załącznik VI do konwencji Marpol 73/78. Przepisy o zapobieganiu zanieczyszczeniu powietrza przez statki oraz kodeks techniczny NOx*, Wydawnictwa Polskiego Rejestru Statku, Gdańsk 2000.