ISSN 1733-8670

ZESZYTY NAUKOWE NR 5(77)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE

OBSŁUGIWANIE MASZYN I URZĄDZEŃ OKRĘTOWYCH
O M i U O 2 0 0 5

Jarosław Myśków

Prognozowanie emisji związków toksycznych zawartych w spalinach opalanych pomocniczych kotłów okrętowych

Słowa kluczowe: opalany pomocniczy kocioł okrętowy, emisja spalin, histogram pracy kotła, obciążenie kotła

W artykule, na podstawie badań przeprowadzonych podczas prób morskich i danych z raportów eksploatacyjnych statku, przedstawiono metodę prognozowania rocznej emisji związków toksycznych zawartych w spalinach emitowanych przez pomocniczy kocioł opalany.

A Method of Predicting the Emission of Toxic Compounds From the Exhaust Gases of Oil-Fired Auxiliary Ship's Boilers

Key words: auxiliary oil-fired boiler, gas emission, load histogram, boiler load

The paper presents a method of predicting the annual emission of toxic compounds contained in exhaust gases from an auxiliary boiler, based on sea trials and ship's operational data.

Wstęp

Procesy zachodzące na Ziemi – lawinowo narastające procesy cywilizacyjne oraz ewolucja techniczna – powodują coraz większe zapotrzebowanie na energię. Obserwuje się coraz większe wydobycie podstawowych surowców energetycznych (węgiel, ropa naftowa, gaz ziemny) oraz procesy związane z ich wykorzystaniem, które stwarzają poważne zagrożenia dla ekosystemu Ziemi. W wyniku procesu spalania paliw węglowodorowych, do atmosfery przedostają się szkodliwe i toksyczne produkty w postaci: dwutlenku węgla – CO_2, tlenku węgla CO, tlenków siarki SO_x, tlenków azotu NO_x, węglowodorów HC, cząstek stałych PM oraz wielu innych toksycznych substancji mających wpływ zarówno na środowisko naturalne, jak i na zdrowie i życie człowieka.

Znaczący udział w emisji zanieczyszczeń do atmosfery ma dynamiczny rozwój przemysłu, transportu i motoryzacji. W transporcie surowców i produktów znaczące miejsce zajmuje transport morski. Intensywny ruch statków w rejonach przybrzeżnych powoduje poważne zmiany w ekosystemie tych rejonów. Ocenia się, że gospodarka morska zużywa około 3% światowej produkcji paliw i to paliw najgorszych pod względem jakościowym, o wysokiej zawartości siarki. W wyniku spalania tego rodzaju paliw, do atmosfery przedostaje się około 7% ogólnego zanieczyszczenia atmosfery tlenkami siarki oraz około 11 – 13% tlenków azotu. Źródła zanieczyszczeń środowiska morskiego stanowią w 80% zanieczyszczenia pochodzące ze źródeł lądowych, a pozostałe 20% pochodzi ze źródeł znajdujących się na morzu, przy czym udział statków wynosi około 4%. Biorąc pod uwagę zanieczyszczenie środowiska substancjami ropopochodnymi stwierdzono, że około 58% pochodzi ze źródeł morskich, z czego 50% przypada na statki, a pozostałe 8% na urządzenia wiertnicze. Z ogólnej ilości zanieczyszczeń substancjami ropopochodnymi, których źródłem są statki, około 80% pochodzi z normalnej eksploatacji, a tylko 20% z rozlewów awaryjnych. W tej sytuacji oczywiste jest, że oprócz walki z katastrofami należało ograniczyć zanieczyszczenia, które są wynikiem normalnej eksploatacji statku [4].

1. Wybrane przepisy prawne dotyczące ochrony środowiska morskiego

Znaczna emisja tlenków azotu w gospodarce morskiej oraz ich szkodliwy wpływ na środowisko naturalne spowodowały, że konieczne stało się, obok opracowania metod technicznych, stworzenie odpowiednich norm prawnych regulujących dopuszczalne wartości emisji związków toksycznych zwartych w spalinach do atmosfery i to zarówno o zasięgu lokalnym, jak i globalnym.

Organizacje międzynarodowe zajmujące się tym problemem to: IMO (International Maritime Organization), EEC (European Economic Community), HELCOM (Helsinki Commission), EPA (The Environmental Protection Agency) – krajowa organizacja w USA, CARB (California Air Resources Board) – regionalna organizacja w USA. Przepisy dotyczące ochrony środowiska morskiego formułowane są przez Międzynarodową Organizację Morską (IMO) i powstają w ramach *Konwencji MARPOL* (Marine Pollution). Organem wewnętrznym IMO odpowiedzialnym za opracowanie przepisów, propozycji norm i protokołów jest Komitet Ochrony Środowiska Morskiego – MEPC (Marine Environment Protection Commitee). Przepisy o zapobieganiu zanieczyszczeń powietrza przez statki są ujęte w *Załączniku VI do Międzynarodowej konwencji o zanieczyszczaniu morza przez statki*, który został wprowadzony Protokółem z 1997 roku. Zgodnie z artykułem 6 tego protokółu, załącznik wejdzie w życie w 12 miesięcy po podpisaniu go przez minimum 15 państw, których łączny tonaż statków jest nie mniejszy niż 50% tonażu światowego. Jeśli nie postanowiono inaczej, załącznik VI stosuje się do wszystkich statków o pojemności brutto 400 ton i powyżej oraz do wszystkich stałych i pływających platform wiertniczych. Załącznik VI obejmuje szeroko pojętą problematykę zapobiegania zanieczyszczenia powietrza przez statki.

Podstawą do szczegółowych rozważań problemu zanieczyszczenia środowiska morskiego jest charakterystyka statku jako obiektu zanieczyszczającego środowisko morskie. Charakterystyka taka winna rozpatrywać normalną eksploatację statku, a nie sytuacje awaryjne, których rozmiary i ilości są trudne do przewidzenia.

Emiterami spalin w przypadku statków morskich są urządzenia energetyczne instalowane na tych jednostkach. Należą do nich przede wszystkim okrętowe silniki spalinowe tłokowe napędu głównego, okrętowe silniki spalinowe tłokowe napędów pomocniczych (silniki agregatowe), spalarki oraz główne i pomocnicze kotły okrętowe. Szeroko zakrojone prace badawcze dotyczące tłokowych silników spalinowych doprowadziły do powstania norm i przepisów prawnych dotyczących sposobu pomiarów jak i dopuszczalnych wielkości emisji substancji toksycznych zawartych w spalinach. Badana była emisja spalin i zawarte w nich wielkości poszczególnych składników (toksyczne i szkodliwe składniki spalin) w różnych stanach pracy tych silników Podejmowane były próby tworzenia modeli matematycznych powstawania związków toksycznych w spalinach okrętowych tłokowych silników spalinowych. Na podstawie badań i obserwacji pracy okrętowych silników spalinowych tłokowych napędu głównego i napędów pomocniczych powstały metody testowe, na podstawie których przeprowadzana jest certyfikacja ww. rodzajów silników. Metody prowadzenia certyfikacji emisji spalin dotyczą okrętowych silników spalinowych tłokowych oraz określają uznanie typu i limity pracy spalarek okrętowych, brak natomiast norm i przepi-

sów dotyczących okrętowych pomocniczych kotłów opalanych. Transport morski stanowi zagrożenie dla środowiska, biorąc pod uwagę zanieczyszczenie powietrza. Odpowiednie mapy zanieczyszczeń są opracowywane z uwzględnieniem natężenia ruchu statków. Rejestrowane natężenie ruchu statków jest największe na najczęściej uczęszczanych szlakach żeglugowych oraz w strefach wód przybrzeżnych. Wiąże się to z emisją związków toksycznych zawartych w spalinach opuszczających zarówno silniki spalinowe instalowane na statkach jak i spalarki oraz kotły opalane.

Podczas postoju statku w porcie oraz podczas manewrów, urządzeniami emitującymi związki toksyczne do atmosfery są najczęściej silniki agregatów prądotwórczych oraz pomocnicze kotły opalane. Pomocnicze kotły opalane emitują spaliny zwłaszcza podczas postoju statku w porcie, podczas postoju na kotwicy (oczekiwanie na redzie) oraz podczas przejścia przez szczególne akweny nawigacyjne (cieśniny, kanały). W akwenach tych charakterystyczne jest pływanie statku ze zmniejszoną prędkością ze względu na bezpieczeństwo żeglugi. Związane jest to ze zmniejszeniem obciążenia silnika napędowego, a tym samym dostarczeniem do kotła utylizacyjnego mniejszej (niekiedy niewystarczającej) ilości spalin służących do wytworzenia pary. W tych sytuacjach praca pomocniczego kotła opalanego jest koniecznością, a tym samym zwiększona jest całkowita emisja związków toksycznych zawartych w spalinach ze statku. Zjawisko emisji spalin z silników spalinowych oraz sposób pomiarów wielkości emisji i składu spalin zostały określone przepisami konwencji *MARPOL 73/78* i opisane w załączniku VI do ww. konwencji, natomiast brak szczegółowych przepisów dotyczących zanieczyszczeń emitowanych przez pomocnicze kotły opalane. Próbą unormowania emisji związków toksycznych pochodzących ze spalin pomocniczych kotłów opalanych było odwołanie się do istniejącej normy niemieckiej *DIN 4787* dotyczącej opalanych kotłów lądowych. W tabeli 1 przedstawiono wartości dopuszczalne emisji związków toksycznych oraz wartości według nowo proponowanej normy.

Tabela 1

Wartości emisji związków wg normy DIN 4787 i propozycja nowej normy
Gas emission compounds by the old DIN 4787 standard and a proposal of new standard

Składnik spalin	Norma obowiązująca	Propozycja nowej normy
	ppm (mg/m^3)	ppm (mg/m^3)
CO	170 (212,5)	–
NO_x	450 (922,5*) 250 (512,5**)	300 (615*) 200/150 (410/307,5**)
SO_2	1700 (4862*)	zmniejszenie o 50%

* – kotły opalane paliwami pozostałościowym, ** – kotły opalane paliwami destylacyjnymi.

2. Badania emisji spalin pomocniczych opalanych kotłów okrętowych w różnych stanach obciążenia

Do pomiarów składu spalin opuszczających analizowane w niniejszej pracy pomocnicze kotły opalane posłużono się przenośnym analizatorem spalin typu IMR 3000P, wersja P3N3. Producent IMR – Industrie MeB und Regelsysteme für Umwelttechnologie GmbH, Niemcy. Analizator posiada zintegrowany program testujący, samokalibrację z powietrzem jako gazem wzorcowym oraz cyfrową rejestrację wyników pomiarów z możliwością transmisji interfejsem szeregowym, edycję wyników na monitorze lub drukarce termicznej. Dane techniczne analizatora przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

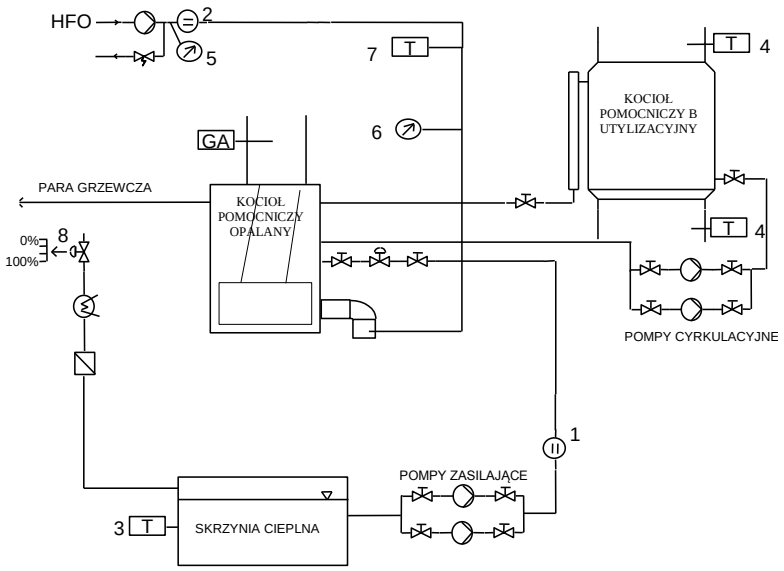
Dane techniczne analizatora spalin IMR-3000P
IMR-3000P gas analyser – technical data

Wartości mierzone	Sposób – zasada pomiaru	Zakres pomiaru
O_2 – tlen	czujnik elektrochemiczny	0 ÷ 20,9%
CO – tlenek węgla	czujnik elektrochemiczny	0 ÷ 1000 ppm
SO_2 – dwutlenek siarki	czujnik elektrochemiczny	0 ÷ 4000 ppm
NO – tlenek azotu	czujnik elektrochemiczny	0 ÷ 2000 ppm
H_2S – siarkowodór	czujnik elektrochemiczny	0 ÷ 200 ppm
Temperatura powietrza	czujnik półprzewodnikowy	–20 ÷ +120°C
Temperatura gazu – spalin	termoelement Ni-Cr-Ni	0 ÷ +1200°C
Wartości obliczane		Zakres
CO_2 – dwutlenek węgla	obliczany	0 ÷ 20%
λ – wskaźnik nadmiaru powietrza	obliczany	1,0 ÷ ∞
QA – straty ciepła	obliczany	0 ÷ 99,9%

W celu wyznaczenia wydatku parowego kotła można posłużyć się metodą bezpośrednią, opartą na pomiarze ilości wody zasilającej dostarczonej do kotła w jednostce czasu, oraz pomiarze podstawowych parametrów pracy systemu parowo-wodnego [5]. Rysunek 1 przedstawia przykład systemu parowo-wodnego wraz z rozmieszczeniem punktów pomiarowych, zainstalowany na nowo budowanym statku w stoczni krajowej.

Spaliny do badań pobierane były bezpośrednio z instalacji spalin wylotowych kotła za pomocą standardowego przewodu wielootworowego umieszczonego w przewodzie instalacji. Oznaczane składniki spalin: tlenki azotu, tlenek

węgla, dwutlenek siarki i tlen były w sposób ciągły rejestrowane zapisem cyfrowym, w cyklu pięciosekundowym. Do celów obliczeniowych wynik pomiaru stężenia składników spalin reprezentowany jest jako wartość uśredniona z dziesięciominutowego okresu pracy kotła opalanego. W opracowanej metodzie prowadzona była również rejestracja temperatury i ciśnienia otoczenia oraz pomiar wilgotności względnej powietrza otoczenia.



Rys. 1. Schemat systemu parowo-wodnego i rozmieszczenie przyrządów pomiarowych: *1* – licznik wody, *2* – licznik paliwa, *3, 7* – termometr, *4* – termopara, *5, 6* – manometr, *8* – zawór kierujący parę do skraplacza nadmiarowego, GA – analizator składu spalin
Fig. 1. The system diagram and measurements instrument locations

W tabeli 3 przedstawiono średnie wartości mierzonych składników spalin uzyskane w trakcie pomiarów.

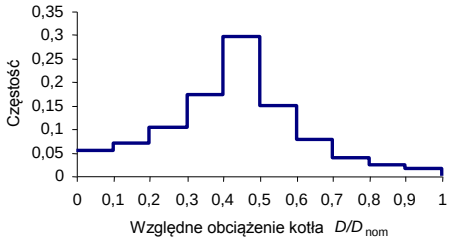
Tabela 3

Średnie wartości mierzonych składników spalin
Average values of exhaust gas compounds

Względne obciążenie kotła D/D_{nom}	NO_x [ppm]	NO_x [mg/Nm^3]	CO_2 [%]	CO [ppm]	CO [mg/Nm^3]	SO_2 [ppm]	SO_2 [mg/Nm^3]	O_2 [%]	$T_{spal.}$ [°C]
0,26	283	580,15	12	7,3	9,16	784	2241,76	4,2	252
0,4	286	586,64	12	7,8	9,79	796	2276,56	4,4	268
0,6	285	585,96	12	7,1	8,96	812	2321,84	4,6	268
0,82	288	590,4	12	6,8	8,54	818	2339,96	4,6	268
0,96	298	612,61	12	7,6	9,58	839	2400,97	4,0	275

3. Charakterystyka pracy – histogram obciążeń

Podstawowym elementem do określania emisji związków toksycznych jest histogram pracy, przedstawiający stopień obciążenia kotła (wydatek parowy) podczas okresu obserwacji w czasie eksploatacji statku. Na rysunku 2 przedstawiono histogram pracy pomocniczego kotła opalanego obejmujący obciążenie kotła podczas okresu obserwacji. W celu ujednolicenia wykresów dla różnych typów kotłów o różnych wydatkach nominalnych, przyjęto D_{nom} = 1 = 100%, a jako częstość 1 = cały okres obserwacji. Czas obserwacji wynosił 12 miesięcy. Dokładny opis powstawania histogramów pracy pomocniczych kotłów opalanych autor przedstawił w pracy [2].



Rys. 2. Histogram obciążeń pracy kotła w czasie obserwacji
Fig. 2. Boiler load histogram during observation

4. Wyznaczanie rocznej emisji toksycznych składników spalin

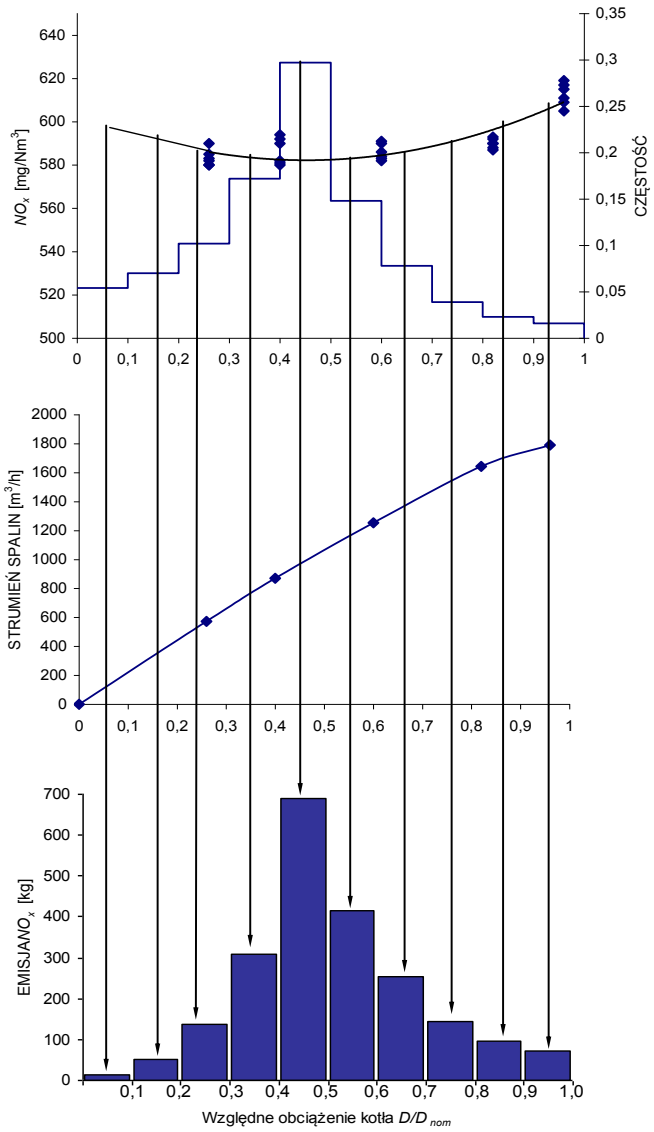
W celu wyznaczenia rocznej emisji substancji toksycznych emitowanych do atmosfery przez pomocnicze kotły opalane posłużono się metodą kojarzenia wykresów:

- emisji toksycznych składników spalin [mg/Nm^3],
- strumienia spalin opuszczających pomocniczy kocioł opalany [Nm^3/h],
- histogramu obciążeń z rocznej eksploatacji kotła opalanego – czasu pracy kotła opalanego w kolejnych stanach obciążenia [h].

Metoda kojarzenia wykresów przedstawiona na rysunku 3 oparta została na teorii przekształceń wieloliniowych.

Niech V_1, V_2, V_3 i W będą dowolnymi przekształceniami liniowymi nad ciałem K. Odwzorowanie $F : V_1 \times V_2 \times V_3 \rightarrow W$ iloczynu kartezjańskiego przestrzeni V_1, V_2, V_3 w przestrzeń W nazwano *przekształceniem trzyliniowym*, jeżeli dla dowolnych wektorów $\mathbf{A}$, $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{A}_2$, $\mathbf{A}_3$ przestrzeni V_1, dowolnych wektorów $\mathbf{B}$, $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{B}_2$, $\mathbf{B}_3$ przestrzeni V_2, dowolnych wektorów $\mathbf{C}$, $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$, $\mathbf{C}_3$ przestrzeni V_3 i dowolnego elementu α ciała K zachodzą związki:

$$
\begin{aligned}
&F(\mathbf{A}_1+\mathbf{A}_2+\mathbf{A}_3,\mathbf{B},\mathbf{C})=F(\mathbf{A}_1,\mathbf{B},\mathbf{C})+F(\mathbf{A}_2,\mathbf{B},\mathbf{C})+F(\mathbf{A}_3,\mathbf{B},\mathbf{C})\\
&F(\mathbf{A},\mathbf{B}_1+\mathbf{B}_2+\mathbf{B}_3,\mathbf{C})=F(\mathbf{A},\mathbf{B}_1,\mathbf{C})+F(\mathbf{A},\mathbf{B}_2,\mathbf{C})+F(\mathbf{A},\mathbf{B}_3,\mathbf{C})\\
&F(\mathbf{A},\mathbf{B},\mathbf{C}_1+\mathbf{C}_2+\mathbf{C}_3)=F(\mathbf{A},\mathbf{B},\mathbf{C}_1)+F(\mathbf{A},\mathbf{B},\mathbf{C}_2)+F(\mathbf{A},\mathbf{B},\mathbf{C}_3)\\
&F(\alpha\mathbf{A},\mathbf{B},\mathbf{C})=F(\mathbf{A},\alpha\mathbf{B},\mathbf{C})=F(\mathbf{A},\mathbf{B},\alpha\mathbf{C})=\alpha F(\mathbf{A},\mathbf{B},\mathbf{C})
\end{aligned}
\tag{1}
$$



Rys. 3. Wyznaczenie rocznej emisji NO_x
Fig. 3. Calculated yearly emission of NO_x

W odniesieniu do rozpatrywanego problemu, przestrzenie liniowe V_1, V_2, V_3, których elementami są wektory **A**, **B**, **C**, będące nośnikami informacji o wartościach odpowiednio emisji toksycznych składników spalin, strumienia spalin opuszczających pomocniczy kocioł opalany i czasu pracy kotła opalanego dla kolejnych wartości obciążenia kotła opalanego, dobrano w ten sposób, że $V_1 = V_2 = V_3 = R^n$ nad ciałem $K = R$, natomiast przestrzeń liniowa odzwierciedlająca roczną emisję substancji toksycznej $W = R$. Na bazie przyjętych założeń trzyliniowe przekształcenie F przestrzeni $(R^n)^3$ nad ciałem R w ciało R nosi miano *formy trzyliniowej* określonej na przestrzeni $(R^n)^3$.

Przy tak wyspecyfikowanych założeniach sposób kojarzenia wykresów emisji poszczególnych związków toksycznych zawartych w spalinach z histogramem obciążeń pracy pomocniczego kotła opalanego oparto na odpowiednio zbudowanej formie 3-liniowej przestrzeni $(R^n)^3$ w przestrzeń R F: $(R^n)^3 \to R$ postaci:

$$E := F(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}) = \sum_{i=1}^{n} a_i\, b_i\, c_i \quad [\text{kg}] \tag{2}$$

gdzie: $\mathbf{A} = [a_1 \quad a_2 \quad \ldots \quad a_n]^T$, $\mathbf{B} = [b_1 \quad b_2 \quad \ldots \quad b_n]^T$ $\mathbf{C} = [c_1 \quad c_2 \quad \ldots \quad c_n]^T$, której wynikiem jest roczna emisja danego składnika – E spalin do atmosfery wyrażona w kilogramach danego składnika.

Zakończenie

W przedstawiony powyżej sposób można określić roczną emisję poszczególnych składników spalin emitowanych przez okrętowy pomocniczy kocioł opalany. Metoda ta ukazuje szacowane ilości w celu zobrazowania wielkości zjawiska zanieczyszczania atmosfery przez okrętowe pomocnicze kotły opalane, co być może w porównaniu z zanieczyszczeniami generowanymi przez lądowe zakłady przemysłowe (huty, elektrownie, elektrociepłownie) nie wydaje się być zjawiskiem o szczególnie dużym znaczeniu, ale biorąc pod uwagę fakt istnienia morskiej floty handlowej i intensywność ruchu statków w strefie przybrzeżnej i portach, daje niepokojący obraz skażenia środowiska.

Literatura

1. Balcerski A., *Siłownie okrętowe*, Gdańsk 1990.
2. Myśków J., *Histogramy obciążeń pomocniczego kotła opalanego*, Zeszyty Naukowe, Kaliningradzki Uniwersytet Techniczny, X – 2004.

3. Skjølsvik K. O., Corbett J., Andersen A. B., Skjelvik J. M., *Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships.* Marintek Sintef Group MEPC44-2000.
4. Wiewióra A., *Ochrona środowiska morskiego w eksploatacji statków*, Fundacja Rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2002.
5. *Załącznik VI do Konwencji MARPOL 73/78 – Przepisy o zapobieganiu zanieczyszczeniu powietrza przez statki oraz kodeks techniczny* NO_x, Międzynarodowa Organizacja Morska IMO, PRS, Gdańsk 2000.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2005 r.

Recenzenci

doc. dr inż. Anatoly Motorny
dr hab. inż. Jerzy Listewnik, prof. AM

Adres Autora

mgr inż. Jarosław Myśków
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych
Zakład Siłowni Okrętowych
e-mail: jmyskow@am.szczecin.pl