

## Comparative analysis of methods for determining coefficients of toxic compounds emission in exhaust gases from marine engines

*Abstract: Ecological characteristics of marine propulsion engines due to the emission of harmful compounds are strongly dependent on the work condition and external conditions. The work condition is determined by the engine settings made by the operator and the movement of resistance depended on the nature of the work performed by the ship. The engine, and thus the value of toxic compounds in the exhaust gases, thus characterized by the conjunction of work condition, control settings and torque. This paper presents a comparative analysis of methods for determining coefficients of toxic compounds emission in exhaust gases from marine engines based on the developed in the Polish Naval Academy in Gdynia mathematical model, the Finnish model STEAM, research and analysis conducted by Lloyd's Register of Shipping.*

Keywords: *emission, coefficients, toxic compounds, marine engine, modeling*

### **Analiza porównawcza metod wyznaczania wskaźników emisji związków toksycznych w spalinach silników okrętowych**

*Streszczenie: Właściwości ekologiczne okrętowych silników napędu głównego ze względu na emisję związków szkodliwych, są silnie zależne od warunków i stanu ich pracy. Stan pracy silnika jest zdeterminowany nastawami silnika dokonywanymi przez operatora oraz momentem oporu zależnym od charakteru pracy wykonywanej przez okręt. Pracę silnika, a tym samym wartość emisji związków toksycznych w spalinach, charakteryzuje zatem koniunkcja zbiorów: warunków pracy, nastaw sterowania oraz wartości momentów obrotowych.*

*W artykule przedstawiono analizę porównawczą metod wyznaczania wskaźników emisji związków szkodliwych w spalinach silników napędu głównego statków w oparciu o opracowany w Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni model matematyczny, fiński model STEAM oraz badania i analizy przeprowadzone przez Lloyd Register of Shipping.*

Słowa kluczowe: *emisja, wskaźniki, związki toksyczne, silniki okrętowe, modelowanie*

#### **1. Wprowadzenie**

Prowadzone obecnie na całym świecie badania dotyczące zanieczyszczenia atmosfery spowodowanego emisją związków szkodliwych z silników statków, zarówno w ujęciu globalnym [1,2], regionalnym [3,4], jak również lokalnym, np. w rejonach dużych portów morskich [5] oparta jest na uproszczonych danych wejściowych [2,6,7]. Istniejące bazy danych dotyczących emisji związków szkodliwych w spalinach statków pływających w różnych rejonach świata [7], nie mogą być jednak wykorzystane do szacowania emisji w mezo i mikroskali, np. Morza Bałtyckiego czy Zatoki Gdańskiej gdyż prowadzą do znacznego niedoszacowania wskaźników emisji, głównie z powodu niedostatecznego uszczegółowienia charakterystyk ruchu statków [8].

Czynniki determinujące emisję globalną substancji zawartych w spalinach silników okrętowych sklasyfikowano i opisano w [4].

Proces modelowania emisji związków toksycznych (ZT) w spalinach silnika okrętowego, jest bardzo złożony i wymaga posiadania

informacji, które można podzielić na cztery podstawowe grupy:

- parametry jednostki – długość, szerokość zanurzenie jednostki, stan techniczny układu napędowego, rodzaj napędu (w tym rodzaj i liczba silników), rodzaj i liczba śrub napędowych, itp.;
- parametry ruchu jednostki – prędkość i kurs jednostki;
- warunki zewnętrzne – siła i kierunek wiatru, temperatura powietrza i wody, ciśnienie atmosferyczne, wilgotność powietrza, stan morza;
- liczność jednostek w poszczególnych kategoriach

Tworzone w Europie modele emisji ze środków transportu lądowego, takie jak HBEFA, COPERT, DVG, DRIVE-MODEM starają się uwzględnić jak największą liczbę parametrów wpływających na emisję, jednak przy tak dużej liczbie czynników oraz złożonym opisie zjawisk determinujących proces emisji, nie można uniknąć założeń upraszczających. Poza tym, ze względu na odmienną zarówno warunków

hydrometeorologicznych jak i specyfikę eksploatacji jednostek pływających, nie mogą one zostać zastosowane do oceny emisji ZT ze statków.

## 2. Model emisji związków toksycznych w spalinach silników okrętowych STEAM

Fiński model emisji związków toksycznych w spalinach silników okrętowych STEAM (ang. *Ship Traffic Emission Assessment Model*) [9], bazuje na danych przesyłanych przez system AIS i na ich podstawie przeprowadzane są obliczenia wskaźników emisji związków szkodliwych w ich spalinach. Wcześniej prowadzone badania [10-12] wykazały szereg nieścisłości przy określaniu lokalizacji źródeł emisji. Ponadto, w większości tych badań przeważnie pomijano zmiany prędkości statków, rzeczywistą pozycję statku oraz możliwość istnienia na statku urządzeń obniżających emisję.

Parametrami wejściowymi do modelu są informacje zebrane w specjalnie w tym celu utworzonej bazie danych zawierającej:

- informacje identyfikacyjne jednostki (nazwa statku, numer IMO, rodzaj statku, wyporność);
- informacje dotyczące konstrukcji statku (wymiary kadłuba, zanurzenie, rok budowy, prędkość maksymalna);
- informacje o silniku napędu głównego (typ silnika i jego parametry, rodzaj paliwa używanego do zasilania silnika, stosowane metody obniżania emisji związków toksycznych z silnika);
- informacje dotyczące silników pomocniczych.

Do utworzenia tej bazy danych wykorzystano informacje techniczne o statkach z baz danych Lloyd's Ship Register, uzupełnione danymi od armatorów, władz lokalnych oraz stoczni.

Chociaż baza danych [9] zawiera informacje dotyczące konstrukcji statku, w celach upraszczających przyjęto, że wszystkie jednostki są jednokadłubowe i napędzane śrubą napędową.

W modelu STEAM uwzględniono również rodzaj paliwa stosowanego do zasilania zarówno silników głównych statku, jak i silników pomocniczych oraz wskaźnik zużycia paliwa. Dla wszystkich silników przyjęto tu jednakową wartość jednostkowego zużycie paliwa SFOC (*specific fuel oil consumption*) równą 200 g/(kW·h).

Emisję CO<sub>2</sub> oraz SO<sub>x</sub> obliczono na podstawie wartości SFOC oraz zawartości siarki w paliwie.

Na rysunku 1 przedstawiono uproszczony algorytm realizacji modelu STEAM.

Przedstawiony w opracowaniu [9] model emisji szkodliwych składników spalin z silników okrętowych składa się z trzech zasadniczych części:

### 1. Identyfikacja statku, wprowadzenie danych wejściowych dotyczących statku do modelu z bazy danych oraz pozyskanie danych technicznych o poszczególnych statkach z baz danych (Ship Database, Lloyd Register of Shipping, AIS i inne)

Na podstawie badań opisanych w [13], można stwierdzić, że około 80 % statków można zidentyfikować w oparciu o bazy danych Lloyd's Register of Shipping. W przypadku braku danych umożliwiających identyfikację danego statku, przyjmuje się, że jest to niewielka jednostka zbliżona do holownika o pojemności brutto 620 GT (gross tonnage), i moc znamionowa silnika głównego  $P_e = 2380$  kW) [9]

### 2. Wprowadzenie danych dotyczących prędkości i kursu statku z systemu AIS

### 3. Obliczenie wartości mocy chwilowej silnika w oparciu o prędkość statku

W celu obliczenia chwilowej użytecznej mocy silnika  $P_{e(i)}$  w opracowaniu [9] zaproponowano wzór ITTC [14]:

$$P_{e(i)} = (CF + CR + CA + CAA) \cdot \left( \frac{1}{2} v_i^3 \cdot S \right) \cdot \frac{1}{\epsilon_0} \quad (1)$$

gdzie: CF – opór tarcia, CR – opór resztkowy, CA – opór wystającej części kadłuba, CAA – opór powietrza,  $v_i$  – chwilowa prędkość statku, S – powierzchnia zwilżona kadłuba,  $\epsilon_0$  – sprawność układu napędowego.

W związku z tym, że parametry dotyczące oporu kadłuba są z reguły niedostępne przyjęto założenie, że CF, CR, CA, CAA, S oraz  $\epsilon_0$  są stałymi dla danego statku, co pozwoliło uprościć wzór (1)<sup>1</sup> do postaci [9]:

$$P_{e(i)} = \frac{k \cdot v_i^3}{0,514^3} \quad (2)$$

gdzie parametr k zdefiniowano jako:

$$k = 0,514^3 \cdot \frac{\epsilon_p \cdot P_{\text{installed}}}{(v_{\text{design}} + v_{\text{safety}})^3} \quad (3)$$

gdzie:  $P_{\text{installed}}$  – całkowita moc zainstalowanych silników głównych [kW];

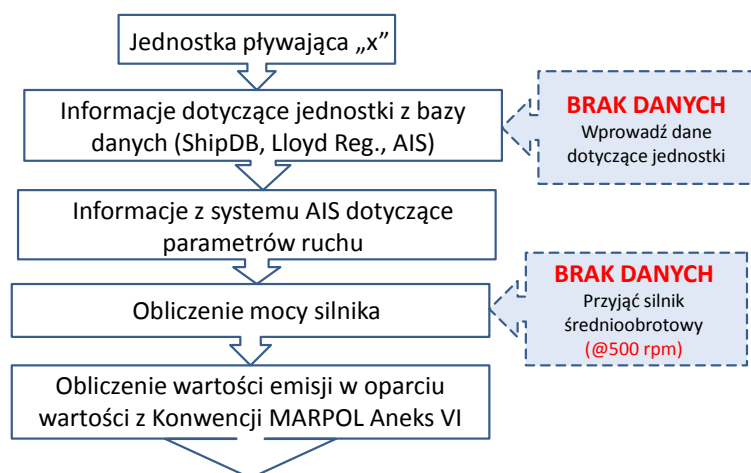
$\epsilon_p$  – współczynnik obciążenia silnika głównego;

$v_{\text{design}}$  – prędkość obliczeniowa;

$v_{\text{safety}}$  – margines błędu [m/s].

W opracowaniu [9] przyjęto wartość  $\epsilon_p = 0,8$ .

<sup>1</sup> Zachowano oryginalny zapis wzoru (1),(2) i (3)



Rys. 1. Uproszczony algorytm realizacji modelu *STEAM*

#### 4. Oszacowanie wskaźników emisji związków toksycznych w spalinach

W celu wyznaczenia wartości emisji jednostkowej  $e_{NO_x}$  [g/(kW·h)], w modelu *STEAM* skorzystano z zależności dopuszczalnych wartości emisji jednostkowej od prędkości obrotowej silnika opisanej w Aneksie VI Konwencji MARPOL [15]:

$$e_{NO_x} \text{ [g/(kW} \cdot \text{h)}] = \begin{cases} 17,0 & \text{dla } n \leq 130 \\ 45,0 \cdot n^{-0,2} & \text{dla } 130 < n < 2000 \\ 9,8 & \text{dla } n \geq 2000 \end{cases}$$

gdzie  $n$  – prędkość obrotowa silnika [obr/min]

W przypadku, gdy dane dotyczące silnika były niedostępne, założono, że jest to okrętowy silnik średnioobrotowy o nominalnej prędkości obrotowej  $n = 500$  obr/min [9].

Kolejnym uproszczeniem zawartym w modelu jest przyjęcie założenia, że wskaźniki emisji  $NO_x$  dla wszystkich silników niezależnie od ich wieku, można wyznaczyć z zależności (4) i że są one niezależne od rzeczywistego zużycia paliwa. Natomiast w celu oszacowania innych wskaźników emisji ( $SO_x$  i  $CO_2$ ), w modelu oparto się na parametrach opisujących zużycie paliwa (rozpatrzono m.in. rodzaj paliwa i typ silnika).

W modelu *STEAM* starano się uwzględnić zawartość siarki w paliwie jaką deklarował armator [9]. Jeżeli dane takie były niedostępne, zakładano 1,5% zawartość siarki w paliwie dla silników głównych oraz 0,5% zawartość siarki dla silników pomocniczych (zgodnie z wymaganiami Załącznika VI Konwencji MARPOL dla obszarów specjalnych (m.in. Morza Bałtyckiego).

#### 3. Autorski model matematyczny szacowania emisji związków toksycznych w spalinach silnika głównego statku

W celu nadania jednostce pływającej określonej prędkości silnik napędu głównego musi dostarczyć odpowiednią moc śrubie napędowej, potrzebną do pokonania oporów ruchu statku, strat energetycznych pędnika, linii wałów, przekładni i sprzęgła. Ogólne równanie ruchu statku można przedstawić następująco [16,17]:

$$-(m + m_{11}) \cdot \frac{dV}{dt} - R - \Delta T + T = 0 \quad (4)$$

gdzie:  $m$  – masa statku, śrub i steru,  
 $m_{11}$  - masa wody towarzyszącej,  
 $R$  – opór całkowity statku,  
 $T$  – siła naporu wytworzona przez śrubę napędową,  
 $\Delta T$  – siła ssania śruby.

Opór całkowity statku  $R$  zależy od wielkości statku, jego prędkości oraz kształtu kadłuba. Na wartość tego oporu wpływają również czynniki zewnętrzne, takie jak falowanie morza, porostanie kadłuba, zmiany zanurzenia itp.

Można zatem stwierdzić, że wartość zapotrzebowanej mocy silnika zależy przede wszystkim od wielkości statku oraz jego prędkości chwilowej.

Opór całkowity okrętu jest sumą jego elementów składowych

$$R = \sum_i R_{(i)} = R_F + R_{VP} + R_W + R_D \quad (5)$$

gdzie:

- $R_F = c_F \frac{\rho \cdot v^2}{2} S$  - opór tarcia;
- $R_{VP} = c_{VP} \frac{\rho \cdot v^2}{2} S$  - lepkościowy opór ciśnienia (opór kształtu);
- $R_W = c_W \frac{\rho \cdot v^2}{2} S$  - opór falowy;
- $R_d$  - opór dodatkowy.

Uwzględniając powyższe zależności na poszczególne składniki oporu otrzymuje się:

$$R = S \frac{\rho \cdot v^2}{2} (c_F + c_{VP} + c_W) + R_D = k \cdot c_T \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (6)$$

gdzie:

- $S$  – powierzchnia zwilżona kadłuba [ $m^2$ ],
- $\rho$  – gęstość wody [ $kg \cdot m^{-3}$ ],
- $v$  – prędkość opływu [ $m \cdot s^{-1}$ ],
- $c_F$  – współczynnik oporu tarcia,
- $c_{VP}$  – współczynnik lepkościowego oporu ciśnienia (oporu kształtu),
- $c_W$  – współczynnik oporu falowego,
- $k$  – współczynnik ujmujący opór dodatkowy (zakłada się  $k = 1,1 \div 1,2$ ),
- $c_T$  – współczynnik oporu całkowitego okrętu.

Siła oporu całkowitego okrętu  $R$  może być przedstawiona jako funkcja  $\Psi$ : prędkości chwilowa okrętu  $v$ , długości kadłuba  $L$ , gęstości wody  $\rho$ , kinematycznego współczynnika lepkości wody  $\nu$ , wektora  $M$ , charakteryzującego bezwładność okrętu, wektora  $A$ , zawierającego informacje o zmiennych oporach ruchu okrętu, związanych z akwenem pływania (głębokość wody, szerokość akwenu (kanały), itp.), wektora  $G$ , opisującego warunki otoczenia (np. ciśnienie i temperaturę otoczenia) oraz wektora  $O$ , opisującego warunki pływania (siła i kierunek wiatru, długość i wysokość fal, itp.).

$$R = \Psi(v, L, \rho, \nu, M, A, G, O) \quad (7)$$

Ponieważ współczynniki oporów  $c_F, c_{VP} = f(Rn)$  oraz  $c_W, c_{VP} = f(Fn)$  do celów modelowania przyjęto, że wielkościami niezbędnymi do przeprowadzenia obliczeń dla danej kategorii jednostki żeglugi nieregularnej są wygenerowane wartości długości statku  $L$  oraz prędkości chwilowej  $v$ .

Opór całkowity kadłuba  $\tilde{R}$  modelowanej jednostki przedstawia równanie

$$\tilde{R} = \tilde{S} \frac{\rho \cdot \tilde{v}^2}{2} (c_F + c_W) + \tilde{R}_{AA} \quad (8)$$

gdzie:  $\tilde{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n}$  dla  $i=1,2, \dots, n$  - uśredniona wartość powierzchni zwilżonej obliczona przy użyciu  $n$  zależności,

$\tilde{v}$  – wygenerowana na podstawie danych statystycznych wartość prędkości jednostki,

$\tilde{R}_{AA} = c_{AA} \frac{\rho_A}{2} V_{WR}^2 A_T$  - opór powietrza wygenerowany na podstawie danych statystycznych, gdzie:

$\rho_A$  - gęstość powietrza,

$V_{WR}$  - względna prędkość powietrza,

$A_T$  - powierzchnia rzutu wręcznicowego nawodnej części okrętu,

$c_{AA}$  – współczynnik oporu powietrza.

Obliczenia współczynnika tarcia przeprowadzono z wykorzystaniem wzoru ITTC [17]:

$$c_{FITTC} = \frac{0,075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (9)$$

Ponieważ powierzchni zewnętrznej kadłuba (nawet przy wysokiej jakości połączeń spawanych i powłok malarskich), nie można uznać za hydrodynamicznie gładką, w obliczeniach uwzględniono również chropowatość kadłuba w postaci współczynnika dodatku chropowatości kadłuba  $\Delta c_F$  za pomocą wzoru [17, 18]:

$$\Delta c_F = \left[ 105 \left( \frac{k_s}{L} \right)^{1/3} - 0,64 \right] \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

Wartość współczynnika tarcia obliczono z zależności

$$c_F = c_{FITTC} + \Delta c_F \quad (11)$$

Oporu falowego nie można wyznaczyć analitycznie. Teoretyczne metody wyznaczania oporu falowego okrętu opierają się na następujących założeniach [17,19]:

- wodę uważa się za ciecz nielepką,
- przepływ dookoła kadłuba uważa się za potencjalny, acykliczny.

Powyższe założenia prowadzi do nieliniowego zagadnienia brzegowego dla równania Laplace'a w trzech wymiarach. Zadanie to daje się z trudem rozwiązać przy przyjęciu dalszych uproszczeń polegających na linearyzacji warunków brzegowych.

Dla obliczanej jednostki pływającej moc holowania wyniesie

$$\tilde{P}_H = \tilde{R} \cdot \tilde{v} \quad (12)$$

Chwilowa moc użyteczna silnika napędowego  $\tilde{P}_e$  osiągnie wówczas wartość zgodnie z równaniem:

$$\tilde{P}_e = \frac{\tilde{P}_H}{\eta_0 \cdot \eta_S \cdot \eta_G \cdot \eta_B} \quad (13)$$

Na podstawie literatury [14, 15] przyjęto do obliczeń następujące wartości współczynników sprawności:

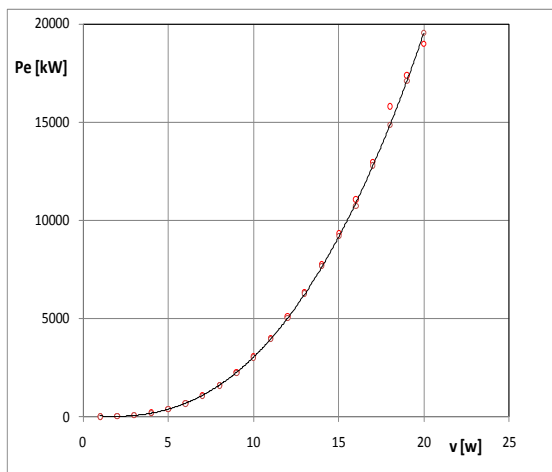
- sprawność napędowa

$$\eta_0 = \eta_H \cdot \eta_R \cdot \eta_P \quad (14)$$

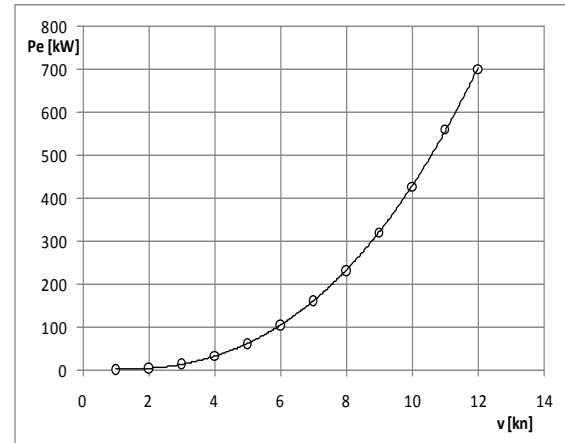
gdzie:  $\eta_H = 0,9$  - sprawność kadłuba,  
 $\eta_R \cong 1$  - sprawność rotacyjna,  
 $\eta_P = 0,45$  - sprawność śruby swobodnej

- sprawność linii wałów  $-\eta_S = 0,975$ ,
- sprawność przekładni  $-\eta_G = 0,965$   
 ( w przypadku braku przekładni  $-\eta_G = 1$  ),
- sprawność sprzęgła  $-\eta_B = 0,97$ .

W oparciu o przedstawiony model matematyczny sporządzono charakterystyki zapotrzebowanej mocy silników napędu głównego dla promu Stena Baltica (rys. 2) [20] oraz mocy użytecznej  $P_e$  zbiornikowca (rys. 3) [21] jako funkcji prędkości statku.



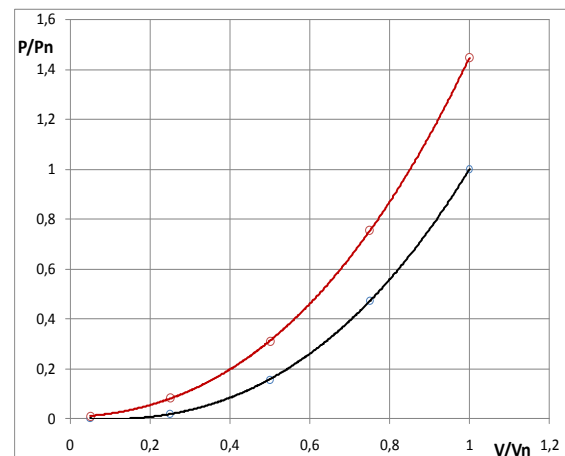
Rys.2. Charakterystyka zapotrzebowanej mocy silników napędu głównego dla promu Stena Baltica (4 × MAN typu 8L40/45 o łącznej mocy  $P_{e\Sigma} = 19360\text{kW}$ ) jako funkcji prędkości statku v [20]



Rys.3. Charakterystyka zapotrzebowanej mocy silników napędu głównego dla wybranego zbiornikowca ( $L = 60\text{ m}$ ,  $B = 6\text{ m}$ ,  $T = 4,1\text{ m}$ ,  $v_{\max} = 12\text{ w}$ ) jako funkcji prędkości  $P_e = f(v)$  [21]

W przypadku jednostek pływających bardzo ważnym elementem modelowania mocy chwilowej silnika napędu głównego jest uwzględnienie zewnętrznych warunków pływania statku, takich jak m. in. siła i kierunek wiatru oraz wysokość fali.

Na rys. 4 przedstawiono obliczoną na podstawie modelu charakterystykę mocy układu napędowego promu Stena Baltica  $P/P_n = f(v/v_n)$  bez uwzględnienia (czarna linia) i z uwzględnieniem oporów dodatkowych spowodowanych wpływem warunków pływania (siła wiatru  $8^\circ\text{B}$ , znacząca wysokość fali  $\zeta_w = 1,95\text{ m}$ ) – (czerwona linia).



Rys. 4. Obliczona na podstawie modelu charakterystyka mocy zapotrzebowanej układu napędowego jako funkcję prędkości promu Stena Baltica  $P/P_n = f(v/v_n)$  bez uwzględnienia (czarna linia) i z uwzględnieniem oporów dodatkowych spowodowanych wpływem warunków pływania – (czerwona linia) [20].

W związku z tym, że ilość związków toksycznych emitowanych do atmosfery zależy przede wszystkim od wartości obciążenia silnika, w dalszej kolejności można było wyznaczyć z charakterystyk śrubowych emisji jednostkowej związków toksycznych [22] m.in. charakterystyki ruchowe natężenia emisji tlenków azotu w zależności od prędkości pływania zbiornikowca  $E_{NO_x} = f(v)$  (rys. 5)

Na podstawie pozyskanych danych statystycznych dotyczących ruchu statków [23,24] opracowano również typowe charakterystyki prędkości statku jako funkcji czasu dla jednostek żeglugi regularnej. W oparciu o uzyskane charakterystyki ruchu promów pasażersko-samochodowych możliwe było wyznaczenie charakterystyk natężenia emisji związków toksycznych w spalinach silników napędu głównego.

Na rys. 6 przedstawiono przebieg czasowy natężenia emisji tlenków azotu  $E_{NO_x}$  jako funkcję czasu podczas zmian prędkości promów (hamowanie czynne) wpływających do portu w Gdyni.

## Podsumowanie

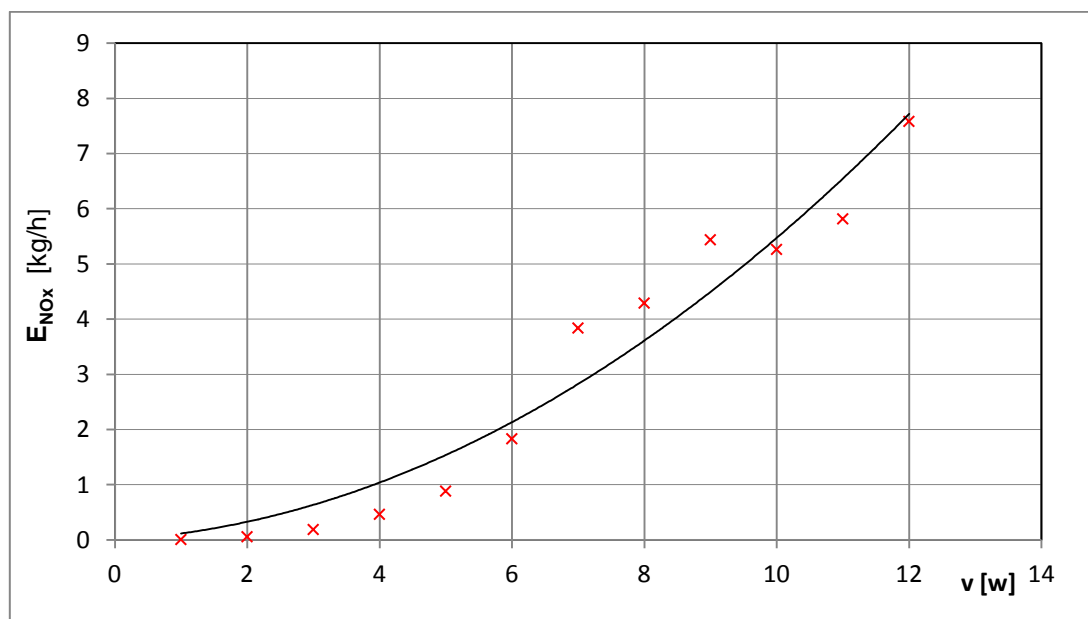
Modelowanie emisji związków szkodliwych jest zagadnieniem bardzo ważnym a jednocześnie bardzo złożonym. Na świecie podejmuje się wiele prób mających na celu oszacowanie modeli emisji związków szkodliwych w spalinach statków. Niestety, ze względu na to, że struktura modelu zależy nie tylko od jego przeznaczenia, ale również

w dużej mierze, od ilości i jakości danych wejściowych, a wiele opracowań opiera się na niewystarczającej ilości i jakości danych, często pozyskiwanych z wielu różnych źródeł oraz konieczności stosowania uproszczeń, w sposób znaczący przekłada się to na wiarygodność modelu.

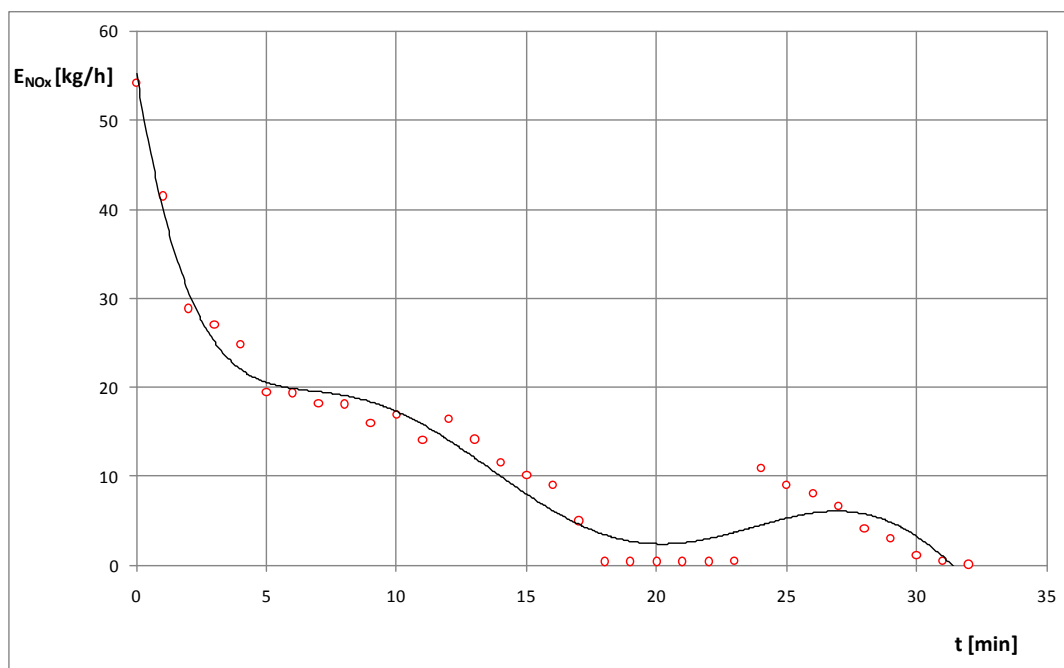
Oba zaprezentowane w pracy modele szacowania emisji związków toksycznych w spalinach silników okrętowych, ze względu na wymuszone względami praktycznymi uproszczenia (np. brak części danych dotyczących parametrów jednostki pływającej, silnika czy charakterystyk emisji) obarczone są pewnymi błędami.

Podstawową różnicą między opisanymi modelami, pomimo widocznego podobieństwa w ogólnym ujęciu problemu, jest sposób podejścia do danych wejściowych. W przypadku modelu *STEAM* stworzono bazę danych wejściowych o jednostkach pływających, a w przypadku braku informacji przyjmuje się, że jest to holownik o określonych parametrach. Autorzy artykułu przyjęli odmienny sposób określania parametrów jednostki oraz ruchu jednostek. Przyjęto podział jednostek na statki żeglugi regularnej (dla której dysponujemy bazą danych) oraz statki żeglugi nieregularnej, dla których dane określone są w oparciu o dane statystyczne (z wykorzystaniem m.in. metody Monte Carlo) [25-27].

Można więc stwierdzić, że opracowany przez autorów model, w odróżnieniu od modelu *STEAM*, pozwala nie tylko na oszacowanie emisji związków toksycznych w spalinach dla czasu teraźniejszego lub przeszłego ale również na prognozowanie emisji w dowolnym punkcie czasu.



Rys. 5. Charakterystyka ruchowa natężenia emisji tlenków azotu  $E_{NO_x} = f(v)$  wybranego zbiornikowca ( $L = 60$  m,  $B = 6$  m,  $T = 4,1$  m,  $v_{max} = 12$  w) [21]



Rys. 6. Przebieg czasowy natężenia emisji tlenków azotu  $E_{NOx}$  podczas zmian prędkości promów (hamowanie czynne) wpływających do portu w Gdyni[20]

### Nomenclature/Skróty i oznaczenia

AIS Automatic Identification System/ *System automatycznej identyfikacji Statków*

IMO International Maritime Organisation/ *Międzynarodowa Organizacja Morska*

GT gross tonnage/ *pojemność brutto(statku)*

STEAM Ship Traffic Emission Assessment Model

*/Model oceny emisji ze statków*

SFOC specific fuel oil consumption

*/jednostkowego zużycie paliwa*

### Bibliography/Literatura

- [1] Corbett J. J., Fishbeck P. S., Pandis S. N.: Global nitrogen and sulphur inventories for oceangoing ships. *J. Geophys. Res.*, 104, 3457–3470, 1999.
- [2] Endresen Ø., Sørgård E., Lee Behrens H., Brett P. O., Isaksen I. S. A.: A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions, *J. Geophys. Res.*, 112, D12301, 2007.
- [3] Davis D. D., Grodzinsky G., Kasibhatla P., Crawford J., Chen G., Liu S., Bandy A., Thornton D., Guan H., Sandholm S. Impact of Ship Emissions on Marine Boundary Layer  $NO_x$  and  $SO_2$  Distributions over the Pacific Basin, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 235–238, 2001.
- [4] Kniaziewicz T., Piaseczny L., Merkisz J., Stochastic models of emission of toxic compounds in marine engines exhaust, *Journal of POLISH CIMAC*. Vol. 3, No. 1, p. 129-138, Gdańsk, 2008.
- [5] Dong C., Huan K.-L., Chen C.-W., Lee C.-W., Lin H.-Y., Chen C.-F.: Estimation of Air Pollutants Emission from Shipping in the Kaohsiung Harbor Area. *Aerosol and Air Quality Research*, 2,31, 2002.
- [6] Endresen Ø., Bakke J., Sørgård E., Berglen T. F., Holmvang P.: Improved modelling of ship  $SO_2$  emissions – a fuel-based approach, *Atmos. Environ.*, 39, 3621, 2005.02.041, 2005.
- [7] Endresen Ø., Sørgård E., Sundet J. K., Dalsøren S. B., Isaksen I. S. A., Berglen T. F., Gravir G.: Emission from international sea transportation and environmental impact, *J. Geophys. Res.*, 108(D17), 4560, 2003.
- [8] Wang C., Corbett J. J., Firestone J.: Improving Spatial Representation of Global Ship

- Emissions Inventories, Environ. Sci. Technol., 42, 193, 2008.
- [9] Jalkanen J. P., Brink A., Kalli J., Pettersson H, Kukkonen J., Stipa T.: A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area, Atmospheric Chemistry and Physics, No.9, pp. 9209–9223, Dec. 2009.
- [10] Corbett, J. J., Köhler, H. W.: Updated emissions from ocean shipping. J. Geophys. Res., 108(D20), 4650, 2003.
- [11] Georgakaki A., Coffey R. A., Lock G., Sorenson S. C.: Transport and Environment Database System (TRENDS):Maritime air pollutant emission modelling, Atmos. Environ., 38, 2357, 2005.
- [12] Wang C., Corbett J. J., Firestone J.: Improving Spatial Representation of Global Ship Emissions Inventories, Environ. Sci. Technol., 42, 193, 2008.
- [13] Olesen H. R., Winther M., Ellermann T., Christensen J., Plejdrup M.: Ship emissions and air pollution in Denmark - Present situation and future scenarios, National Environmental Research Institute, Aarhus University, Environmental Project No. 1307, 2009
- [14] ITTC Recommended Procedures: ITTC Performance prediction method, 7.5-02-03-01.4, 1–31, 1999.
- [15] Marine Environment Protection Committee, Circular 369, NOx Technical Code – Technical Code on Control of Emission of Nitrous Oxides from Marine Diesel Engines Amended by MEPC/Circular 369.
- [16] Chachulski K., Podstawy napędu okrętowego. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk, 1988.
- [17] Dudziak J., Teoria okrętu. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk, 2008.
- [18] Report of Performance Committee, 15<sup>th</sup> ITTC, Haga 1978
- [19] Pawłowski M., Raport techniczny nr 58, Opór okrętu, PRS, Gdańsk 2010
- [20] Kniaziewicz T., Piaseczny L., Model symulacyjny emisji NO<sub>x</sub> podczas ruchu promu pasażersko-samochodowego. Postępy Nauki I Techniki Nr 15/2012, Lublin 2012
- [21] Kniaziewicz T., Piaseczny L., Mathematical Model of Emission Toxic Compounds in Exhaust Gases from Tankers Navigating to Liquid Fuel Terminal in Port of Gdansk . JOURNAL OF KONES, Vol.19, No 3, Warszawa, 2012
- [22] Kniaziewicz T., Piaseczny L., Identyfikacja obciążenia okrętowych silników spalinowych w aspekcie oceny emisji toksycznych składników spalin, Zeszyty Naukowe AMW, Nr 4/2011 (187), Gdynia, 2011.
- [23] Kniaziewicz T., Piaseczny L., Modeling the Emission and Dispersion of Toxic Compounds in Marine Engine Exhaust in the Gdansk Bay Region, Polish Journal of Environmental Studies. Vol. 18, No. 2A, pp 76 – 81 , 2009.
- [24] Kniaziewicz T., Using Information from AIS System in the Modelling of Emission of Toxic Compounds in Exhausts Gas from Marine Diesel Engines. MARITIME TRANSPORT. Technical, Innovation and Research. Barcelona, 2012
- [25] Kniaziewicz T., Piaseczny L., Stochastic models of toxic compounds emission in exhaust from sea-going vessels sailing in a particular area, Combustion Engines, No 2009-SC1, pp. 195 – 203, 2009.
- [26] Kniaziewicz T., Piaseczny L., Modelowanie emisji gazów spalinowych w transporcie morskim, LOGISYKA Nr 4/2010, Poznań, 2010
- [27] Kniaziewicz T. Modelowanie emisji tlenków azotu w spalinach okrętowych silników dwupaliwowych, SLNIKI GAZOWE, seria Monografie nr 183, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2010

Mr Tomasz Kniaziewicz, DEng. –  
Doctor in the Faculty of Mechanical and  
Electrical Engineering at Polish Naval  
Academy of Gdynia

*Dr inż. Tomasz Kniaziewicz – adiunkt  
na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym  
Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni*

