

TOMASZ KNIAZIEWICZ, LESZEK PIASECZNY\*

## MODEL IMISJI ZWIĄZKÓW TOKSYCZNYCH SPALIN Z SILNIKA OKRĘTOWEGO PRZY POWIERZCHNI ZIEMI

### MODEL OF IMMISSION OF TOXIC COMPUNDS IN EXHAUST GASES FROM MARINE DIESEL ENGINE AT THE EARTH'S SURFACE

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono problemy związane z modelowaniem imisji związków szkodliwych w spalinach silników okrętowych ze szczególnym uwzględnieniem wpływu specyfiki konstrukcji i eksploatacji silników okrętowych oraz jednostek pływających i innych parametrów na emisję i imisję związków toksycznych. Drugą część stanowią wyniki modelowania imisji związków toksycznych spalin silnika okrętowego, oparte na równaniu Hollanda i danych statystycznych dotyczących warunków hydrometeorologicznych w rejonie pływania statku.

*Słowa kluczowe: modelowanie, imisja, związki toksyczne, silniki okrętowe*

#### Abstract

The paper presents the problems associated with modelling the immission of harmful compounds in exhaust gases of marine Diesel engines with particular emphasis on the impact of specific construction and operation of marine engines and vessels and other parameters on the emission and immission of toxic compounds.

The second part of the paper are the results of the modelling immission of toxic compounds in exhaust from marine engine based on the Holland's equation and statistical data on the hydrometeorological conditions in the vicinity of a ship navigating.

*Keywords: modelling, immission, toxic compounds, marine Diesel engine*

\* Prof. dr hab. Leszek Piaseczny, dr inż. Tomasz Kniaziewicz, Instytut Budowy i Eksploatacji Okrętów, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni.

## 1. Wstęp

Emisja  $E$  oraz stężenie (najczęściej masowe) zanieczyszczenia rozproszonego w powietrzu atmosferycznym – imisja  $i$  – w obszarach zurbanizowanych jest przedmiotem intensywnych prac badawczych prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych w kraju i zagranicą. Zależność pomiędzy emisją związków szkodliwych w spalinach a ich imisją można zapisać następująco [1]:

$$I(t) = \mathfrak{N}[E(t)] \quad (1)$$

gdzie  $\mathfrak{N}$  oznacza pewien operator matematyczny (np. funkcjonal).

Natężenie emisji  $E$ , będącej funkcją czasu  $m_t(t)$  z określonego źródła względem czasu  $t$ , można zapisać następująco:

$$E(t) = \frac{dm_t(t)}{dt} \quad (2)$$

gdzie:

$m_t$  – masa danego związku szkodliwego.

Emisja drogowa jest definiowana jako pochodna emisji, będącej funkcją drogi  $m_s(s)$  ze źródła, jakim jest jednostka pływająca, względem drogi  $s$  przez nią przebywanej:

$$b_s = \frac{dm_s(s)}{ds} \quad (3)$$

Emisja drogowa jednostki pływającej w warunkach eksploatacji morskiej jest funkcją prędkości chwilowej okrętu  $n$ , wektora  $\mathbf{A}$ , zawierającego informacje o zmiennych oporach ruchu okrętu, związanych z akwenem pływania (głębokość wody, szerokość akwenu (kanały) itp.), wektora  $\mathbf{G}$ , opisującego warunki otoczenia (temperatura i wilgotność powietrza, ciśnienie atmosferyczne), oraz wektora  $\mathbf{O}$ , opisującego warunki pływania (siła i kierunek wiatru, wysokość fali), i można ją przedstawić jako operatorową zależność [2]:

$$b_t(t) = B_n [n(t), \mathbf{A}(t), \mathbf{G}(t), \mathbf{O}(t)] \quad (4)$$

W związku z zależnościami (2) i (4) emisja z jednostki pływającej  $m_{okr-w}$  czasie  $T$  wynosi:

$$m_{okr} = \int_0^T B_v [v(t), A(t), G(t), O(t)] v(t) dt \quad (5)$$

a średnią emisję drogową z jednostki pływającej można zapisać:

$$b_{sr} = \frac{1}{S} \int_0^T b_t(t) v(t) dt \quad (6)$$

Imisję  $I$ , której źródłem jest jednostka pływająca płynąca po drodze  $s$ , można zapisać jako funkcjonal przebiegów wielkości określających emisję drogową  $b_t$  oraz wektorów opisujących warunki topograficzne  $\mathbf{W}(t)$ , np. ukształtowanie i rodzaj terenu oraz stan powietrza  $\mathbf{A}(t)$ , np. prędkość i kierunek wiatru, pionowy gradient temperatury, nasycenie aerozolu morskiego [3]:

$$I = \mathfrak{Z} [b_t(t), \mathbf{W}(t), \mathbf{A}(t)] \quad (7)$$

gdzie:

- $\mathfrak{S}$  – operator przekształcający średnią emisję drogową oraz wektory warunków topograficznych i stanu powietrza w imisję związków szkodliwych, której źródłem jest jednostka pływająca płynąca po drodze  $s$ .

W przypadku silników okrętowych problemem zanieczyszczania atmosfery, spowodowanej emisją związków szkodliwych zajęto się przede wszystkim na zachodzie Europy, gdzie w ramach badań prowadzonych przez Lloyd's Register of Shipping „Maine Exhaust Emission Research Programme” nie ograniczono się jedynie do pomiaru emisji związków toksycznych w spalinach pojedynczych jednostek, lecz prowadzono również badania zanieczyszczenia atmosfery związkami toksycznymi w spalinach silników okrętowych w obrębie kilku portów, m.in. holenderskiego Vlissingen [4].

Wyniki tych badań nie miały jednak na celu stworzenia modeli rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w strefie portowej z uwzględnieniem rzeźby terenu oraz warunków hydrometeorologicznych, a jedynie opracowanie map rozkładów stężeń dobowych poszczególnych związków, zebranych z automatycznych stacji pomiarowych w zależności od pory roku.

## 2. Czynniki determinujące emisję spalin

Przedmiotem bilansowania emisji zanieczyszczeń zawartych w spalinach silników napędzających pojazdy i jednostki pływające są procesy emisji globalnej, uśrednione w dostatecznie długim czasie [1]. Czas ten określany jest przede wszystkim skutecznością uśredniania zmiennych warunków eksploatacji obiektów.

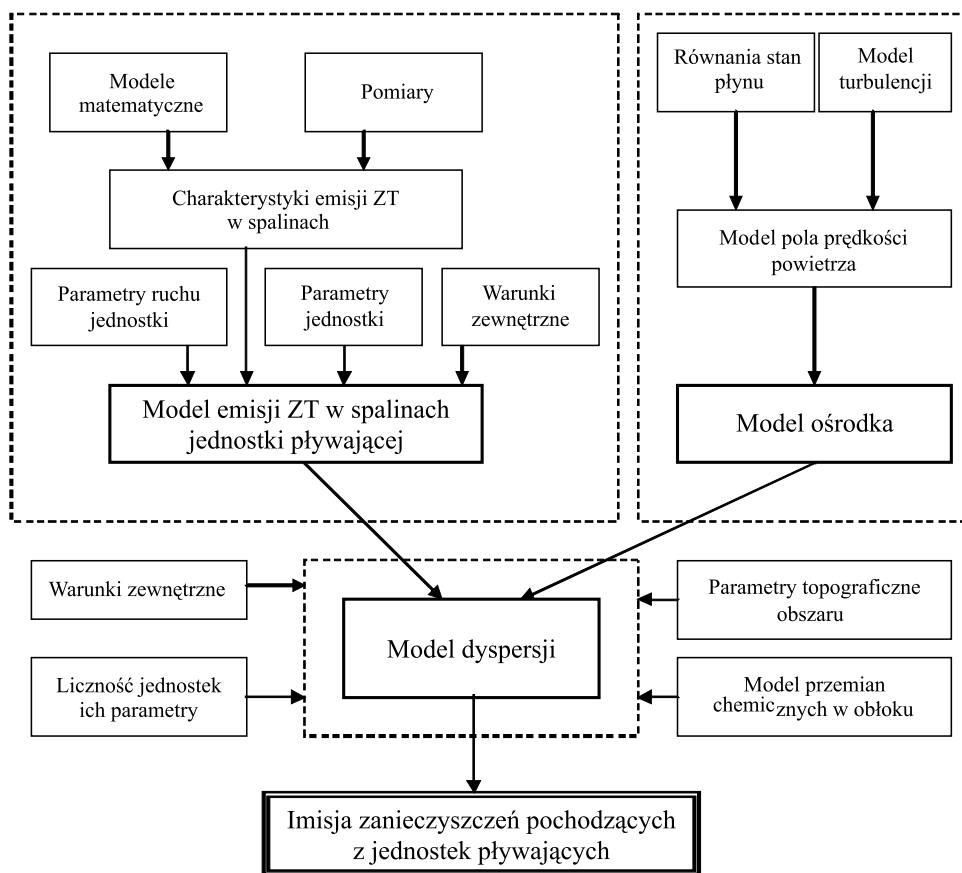
Czynniki, które determinują emisję globalną substancji zawartych w spalinach silników okrętowych, szczegółowo opisano w [3].

W modelach emisji globalnej szczególnie rolę odgrywa struktura jednostek pływających. Stopień rozbudowy struktury determinuje z jednej strony dokładność modelowania emisji globalnej, z drugiej – możliwość skutecznego użytkowania modeli z powodu problemów z dostarczeniem wiarygodnych danych o liczności jednostek pływających i intensywności ich eksploatacji. To drugie ograniczenie stanowi najpoważniejsze kryterium przyjmowania struktury jednostek pływających. w strukturze tej do celów modelowania emisji globalnej celowe jest uwzględnienie takich czynników jak:

- 1) przeznaczenie jednostek pływających;
- 2) umowna wielkość jednostki pływającej;
- 3) rodzaju zastosowanego układu napędowego;
- 4) liczba silników i urządzeń wytwarzających spaliny;
- 5) poziom techniczny jednostki pływającej ze względu na właściwości ekologiczne.

Jako kryterium można tu przyjąć międzynarodowe przepisy ochrony środowiska morskiego, np. Konwencje MARPOL 73/78. w tej kategorii możemy wyróżnić jednostki pływające, na których zastosowano nowoczesne silniki „ekologiczne” (silniki typu „flex” z rozbudowanym, komputerowym układem sterowania wtryskiem paliwa oraz pracą układu wymiany ładunku), układy oczyszczania spalin np. przez zastosowanie selektywnej redukcji katalizacyjnej (SCR), oraz jednostki, na których nie zastosowano rozwiązań proekologicznych.

Schemat modelu imisji związków toksycznych emitowanych w spalinach silników okrętowych przedstawiono na rysunku 1 [5].



Rys. 1. Schemat modelu imisji związków toksycznych emitowanych w spalinach silników okrętowych [5]

Fig. 1. Schematic model of immission of toxic compounds emitted in the exhaust gases from marine engines [5]

Z powyższego schematu wynika, że proces modelowania emisji ZT w spalinach silnika okrętowego (będący jednym z elementów modelowania imisji związków toksycznych w spalinach) jest bardzo złożony i wymaga znajomości trzech grup parametrów warunków ruchu statku:

- parametrów jednostki – długość, szerokość, zanurzenie jednostki, stan techniczny układu napędowego, rodzaj napędu (w tym rodzaj i ilość silników), rodzaj i ilość śrub napędowych itp.,
- parametrów ruchu jednostki – prędkość i kurs jednostki,
- warunków zewnętrznych – siła i kierunek wiatru, temperatura powietrza i wody, ciśnienie atmosferyczne, wilgotność powietrza, stan morza.

### 3. Problemy modelowania emisji szkodliwych składników spalin z silników okrętowych w rejonach miejskich aglomeracji nadmorskich

Istniejące obecnie modele rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza ze źródeł przemysłowych i motoryzacyjnych mogą być klasyfikowane w odniesieniu do ich atrybutów, z których za najważniejsze uważa się [6]:

- podstawową strukturę modelu (deterministyczny, statystyczny, fizyczny opis modelu),
- zastosowany układ odniesienia (Eulera, Lagrange’a),
- wymiarowość modelu oraz dynamikę procesu w czasie,
- strukturę matematyczną i sposób domknięcia członów związanych z dyfuzją turbulentną.

W przypadku propagacji zanieczyszczeń względem nieruchomego układu odniesienia model adwekcji-dyfuzji Eulera można zapisać w postaci [6]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \phi}{\partial t} + U^{(1)} \frac{\partial \phi}{\partial x^{(1)}} + U^{(2)} \frac{\partial \phi}{\partial x^{(2)}} + U^{(3)} \frac{\partial \phi}{\partial x^{(3)}} + \frac{\partial (\overline{\phi' U'^{(1)}})}{\partial x^{(1)}} + \frac{\partial (\overline{\phi' U'^{(2)}})}{\partial x^{(2)}} + \\ & + \frac{\partial (\overline{\phi' U'^{(3)}})}{\partial x^{(3)}} = D \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^{(1)2}} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^{(2)2}} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^{(3)2}} \right) + I \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie:

- $\phi$  – stężenie zanieczyszczenia w punkcie o współrzędnych  $(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)})$  w chwili  $t$ ,
- $U^{(1)}, U^{(2)}, U^{(3)}$  – składowe wektora prędkości powietrza  $U$ ,
- $D$  – współczynnik dyfuzji molekularnej,
- $I$  – człon opisujący zmianę stężenia zanieczyszczenia w wyniku emisji i przemian chemicznych,
- $(\overline{\phi' U'^{(1)}}), (\overline{\phi' U'^{(2)}}), (\overline{\phi' U'^{(3)}})$  – składowe turbulentnego strumienia stężeń  $(\overline{\phi' U'})$ .

Jeśli propagacja zanieczyszczeń rozpatrywana jest w układzie związanym z przemieszczającym się ośrodkiem-powietrzem, wówczas ogólna postać modelu Lagrange’a ma postać [6]:

$$\langle \varphi(r, t) \rangle = \int \int_V p(r, t | r', t') \cdot I(r', t') dt' dr' \quad (9)$$

gdzie:

- $\langle \varphi(r, t) \rangle$  – stężenie zanieczyszczenia, uśrednione w punkcie  $r$  w chwili  $t$ ,
- $I(r', t')$  – człon opisujący źródło emisji,
- $p(r, t | r', t')$  – funkcja określająca prawdopodobieństwo znalezienia się w chwili  $t$  w punkcie  $r$  pewnej objętości powietrza, znajdującej się w chwili  $t'$  w punkcie  $r'$ .

Spotykana obecnie duża liczba prac naukowych i badawczych, poświęcona rozprzestrzenianiu się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym, stwarza trudności w klasyfikacji i wyborze odpowiedniego modelu w zależności od potrzeb i oczekiwań [6–8]. Struktura modelu zależy bowiem nie tylko od jego przeznaczenia, ale również w dużej mierze od ilości i jakości danych wejściowych, zdeterminowanych środkami finansowymi przeznaczonymi na utworzenie, realizację i kalibrację modelu.

W przypadku modelowania emisji szkodliwych składników spalin z silników okrętowych pojawiają się dodatkowe uwarunkowania, powodujące dalsze skomplikowanie procesu modelowania. Można do nich zaliczyć:

- zmienność charakteru powietrza w rozpatrywanym obszarze,
- zmienność ukształtowania terenu i specyfikę zjawisk meteorologicznych,
- skalę wartości emisji ze źródła punktowego,
- różnorodność źródeł emisji.

W przypadku powietrza atmosferycznego, zarówno w obszarach zurbanizowanych, jak i poza nimi, możemy mówić najczęściej o układzie gaz (powietrze o podstawowym składzie chemicznym) – zanieczyszczenia gazowe (jeśli występują –  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HC}$  i inne związki pochodzenia przemysłowego i naturalnego) – ciała stałe (PM, różnorodne pyły) – oraz pewne ilości pary wodnej lub wody w postaci kropeł (opad atmosferyczny). Nad obszarami morskimi występuje natomiast tzw. aerozol morski, składający się z mieszaniny powietrza i kropeł wody morskiej. Ilość wody morskiej w aerozolu wzrasta wraz z siłą wiatru, natomiast maleje wraz ze wzrostem odległości od powierzchni morza. Dodatkowo powietrze w strefie nadmorskiej charakteryzuje się dużymi wartościami wilgotności powietrza. Począwszy od września do marca, średnia miesięczna wilgotność powietrza przekracza 80%, przyjmując najwyższe wartości w listopadzie, grudniu i styczniu – powyżej 85%, a w maju i czerwcu poniżej 78%.

Warunki topograficzne obszaru, na którym znajduje się źródło emisji, wpływają w znacznym stopniu na rozkład zanieczyszczeń i opad wokół źródła emisji [8]. Mogą one wpływać na zjawisko emisji zanieczyszczeń w sposób:

- bezpośredni – wywołując lokalne zmiany prędkości i kierunku wiatru, tworząc zawirowania, nieuporządkowane ruchy występujące i zstępujące powietrza itp.,
- pośredni – wpływając na takie czynniki meteorologiczne jak gradient temperatury, stopień burzliwości powietrza w warstwach bliskich ziemi, średnią prędkość wiatru itp.

Wartość pionowego gradientu temperatury zależy w dużym stopniu od ukształtowania i rodzaju terenu, które wpływają na wielkość nagrzewania i ochładzania się powierzchni. Istnieją znaczące różnice pomiędzy maksymalną dobową różnicą temperatur w różnych rodzajach terenu, takich jak woda, piasek, łąki, lasy, tereny zabudowane itp. w przypadku modelowania emisji związków szkodliwych z silników okrętowych w obszarach miejskich aglomeracji nadmorskich należy rozpatrywać wszystkie z powyższych rodzajów terenu. Należy tu pamiętać, że matematyczne ujęcie wpływu rodzaju terenu na pionowy gradient temperatury jest bardzo trudne, gdyż zależy on również od warunków atmosferycznych i meteorologicznych.

Na podstawie [6, 8] można zapisać, że podstawowymi parametrami, determinującymi proces dyspersji w powietrzu atmosferycznym w warunkach swobodnych, są:

- stan pionowego profilu prędkości wiatru,
- współczynnik dyfuzji turbulentnej.

Wymienia się trzy podstawowe stany atmosfery (dla warstwy przyziemnej) [6, 8]:

- stan równowagi stałej, najczęściej występujący w czasie bezchmurnej nocy nad lądem, ze słabym wiatrem. Strumień ciepła  $H$  skierowany jest od atmosfery do podłoża ( $H < 0$ );
- stan równowagi obojętnej, występującej najczęściej w czasie świtu, zmierzchu, pochmurnej pogody lub przy silnych wiatrach. Strumień ciepła  $H = 0$ ;
- stan równowagi chwiejnej, występujący najczęściej podczas słonecznych dni. Charakteryzuje się on strumieniem ciepła skierowanym od podłoża do atmosfery ( $H > 0$ ).

W przypadku atmosfery nad morzem sytuacja wymiany ciepła jest zgoła odwrotna, gdyż w słoneczne dni woda pochłania ciepło, natomiast oddaje je w nocy. w związku z tym podczas procesu modelowania należy uwzględnić zmianę kierunku strumienia ciepła  $H$  w zależności od rodzaju tereny (woda, ląd).

Kolejnym parametrem, którego wartości będą zmieniały się odmiennie nad lądem i wodą, jest parametr pionowego profilu prędkości wiatru – szorstkość aerodynamiczna podłoża charakteryzująca ukształtowanie terenu [6, 8]. Dla terenów lądowych ukształtowanie terenu nie zależy od ciśnienia atmosferycznego oraz prędkości i kierunku wiatru. w przypadku obszarów morskich parametry te będą znacząco wpływać nie tylko na ukształtowanie „terenu” (zmiana wysokości, długości oraz kierunku fal dochodzących na Bałtyku nawet do kilku metrów wysokości), ale również na obciążenie silnika, a co za tym idzie wartość emisji poszczególnych związków szkodliwych.

Należy tu zwrócić uwagę na jeszcze jeden, bardzo nietypowy problem związany z ukształtowaniem terenu, niewystępujący praktycznie w innych warunkach niż morskie. Są nim bowiem duże jednostki pływające stojące w porcie, na redzie lub płynące. Jednostki te mają długość ponad 100 m i wysokość często ponad 20 m (np. promy pasażersko-samochodowe, wycieczkowe, kontenerowce, samochodowe itp.) Jednostki te swoimi wymiarami odpowiadają dużym budynkom w obszarze aglomeracji miejskiej, przy czym ich ilość, częstota i miejsce występowania jest bardzo zmienne, a w przypadku np. promów pasażerskich pływających na regularnych liniach nie można ich pominąć.

Skala wartości emisji ze źródeł punktowych w przypadku jednostek pływających różni się znacząco zarówno w stosunku do pojazdów, jak i pomiędzy samymi jednostkami pływającymi. Wynika to przede wszystkim z następujących uwarunkowań:

- rodzaju silnika (wolno-, średnio- lub szybkoobrotowy, dwu- lub czterosurowy),
- mocy silnika,
- liczby silników na jednostce pływającej,
- rodzaju spalanego paliwa,
- sposobu obciążenia silnika.

Na jednostkach pływających stosuje się zarówno małe silniki szybkoobrotowe, podobne do stosowanych w pojazdach, jak i wolnoobrotowe silniki dwusurowe dużej mocy (rzędu kilkudziesięciu MW). Jednostki różnią się ponadto charakterem pracy silników (pracujące ze zmienną wartością prędkości obrotowej oraz obciążenia – wg tzw. charakterystyki śrubowej, lub ze stałą prędkością i zmiennym obciążeniem – silniki napędu głównego oraz zespołów prądotwórczych). Wiąże się to z problemami oceny rzeczywistej wartości emisji poszczególnych związków szkodliwych dla jednostek o różnej wielkości i przeznaczeniu [9–11].

Dodatkowo występują tu dwa dodatkowe problemy utrudniające proces modelowania emisji związków szkodliwych z silników okrętowych. Pierwszy dotyczy miejsca wylotu spalin. w przypadku jednostek pływających wylot spalin może znajdować się pod wodą, na powierzchni wody (może być częściowo zanurzony) oraz nad powierzchnią wody w odległości od kilku do nawet kilkudziesięciu metrów.

W warunkach rzeczywistych wysokość kominu emitującego zanieczyszczenia nie jest równa jego geometrycznej wysokości. Czynnikiem powodującymi zmianę rzeczywistej wysokości kominu jest wyniesienie zanieczyszczeń na pewną wysokość ponad komin wskutek prędkości przepływu spalin (wysokość wyniesienia dynamicznego) oraz różnica temperatur między otaczającym powietrzem atmosferycznym a spalinami opuszczającymi komin (wysokość wyniesienia termicznego). Wyznaczenie zastępczej wysokości kominu zależy

również od rodzaju i ilości emitowanych zanieczyszczeń oraz od chwilowych warunków meteorologicznych (prędkości wiatru i pionowego gradientu temperatury powietrza atmosferycznego).

Drugi problem dotyczy ilości pracujących silników. w przypadku pojazdów możemy, w uproszczeniu, wyróżnić stan, w którym silnik nie pracuje, pracuje na biegu jałowym lub jest obciążony. w przypadku jednostek pływających nie jest to takie proste, ponieważ mogą tu występować jednocześnie wszystkie wcześniej wymienione sytuacje w odniesieniu do różnych silników zamontowanych na jednej jednostce.

Ostatnim czynnikiem utrudniającym modelowanie emisji szkodliwych składników spalin z silników okrętowych jest różnorodność źródeł emisji spalin. Pojazdy lądowe napędzane są praktycznie tylko tłokowymi silnikami spalinowymi, natomiast jednostki pływające napędzane są tłokowymi silnikami spalinowymi, turbinowymi silnikami spalinowymi oraz turbinami parowymi, które – choć same nie są źródłem emisji spalin – jednak w połączeniu z kotłami parowymi opalanymi paliwem ciekłym stanowią również źródło zanieczyszczeń atmosfery obszarów nadmorskich.

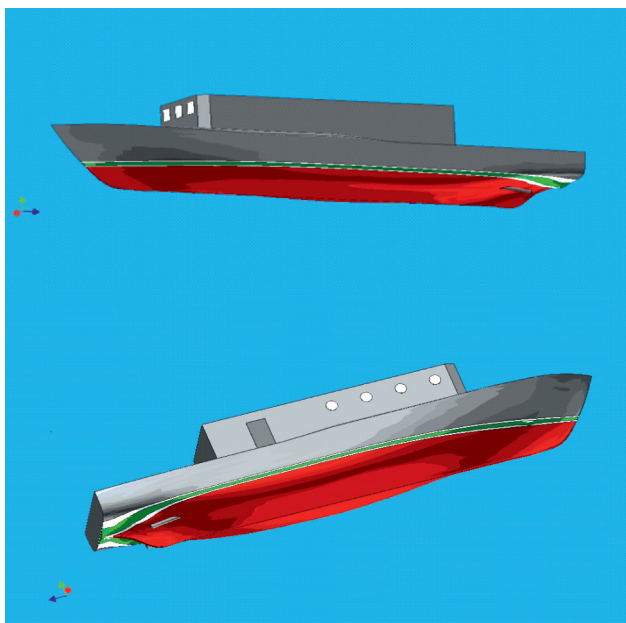
#### **4. Modelowanie emisji związków toksycznych spalin z silnika okrętowego przy powierzchni ziemi**

Analizując zagadnienie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń emitowanych przez silnik okrętowy jednostki pływającej, należało uwzględnić rodzaj jednostki pływającej oraz jej silnika napędowego, wielkości określające stan pracy silnika (moment obrotowy, prędkość obrotowa, średnia wartość emisji związków szkodliwych zawartych w spalinach, stan techniczny silnika), warunki zewnętrzne (warunki meteorologiczne: temperatura powietrza, kierunek i siła wiatru, ciśnienie atmosferyczne, wilgotność powietrza) oraz zmienne opory pływania jednostki (opór okrętu w zależności od rodzaju akwenu, opór powietrza, opór falowania). Jednostkę pływającą potraktowano jako punktowe źródło emisji związków szkodliwych w spalinach silnika okrętowego. w tym celu wyznaczono charakterystykę oporową i mocy holowania modelowanej jednostki pływającej na podstawie kryterium Papiela. Obraz trójwymiarowy kadłuba okrętu modelowanego przedstawiono na rys. 2. Jako silnik napędu głównego przyjęto silnik firmy Sulzer typu 6AL20/24, a jako obszar pływania – Zatokę Gdańską. Warunki pływania zostały określone na podstawie warunków meteorologicznych opisanych w [12].

Charakterystyka oporowa i mocy holowania modelowanej jednostki o kadłubie wypornościowym została wyznaczona na podstawie kryterium Papiela. w celu wyznaczenia tych charakterystyk dobrano następujące wymiary:

Wyporność normalna	– $D = 430 \text{ m}^3$ ,
Długość okrętu	– $L = 46,5 \text{ m}$ ,
Szerokość okrętu	– $B = 9,1 \text{ m}$ ,
Współczynnik pełnotliwości kadłuba	– $\delta = 0,38$ ,
Prędkość okrętu	– $V = 10 \text{ w}$ .





Rys. 2. Trójwymiarowy obraz kadłuba okrętu modelowanego

Fig. 2. Three-dimensional image of the hull modelled ship

Warunkiem koniecznym zastosowania metody Papiela jest spełnienie poniższych zależności dotyczących współczynników wymiarów kształtu:

$$\delta = 0,35 \div 0,8; \frac{B}{L} = 0,09 \div 0,8; \frac{B}{T} = 1,5 \div 3,5; V_{\max} = 0 \div 15 \text{ w}$$

Zanurzenie średnie okrętu wyznacza się na podstawie zależności:

$$T = \frac{D}{L \cdot B \cdot \delta} = \frac{430}{46,5 \cdot 9,1 \cdot 0,38} = 2,674 \text{ m}$$

Dla obliczanego okrętu współczynniki:  $\delta = 0,38$ ;  $\frac{B}{L} = 0,196$ ;  $\frac{B}{T} = 3,403$  oraz  $V_{\max} = 10$  w mieszczą się w granicach odpowiednich dla kryterium Papiela.

Moc potrzebną do pływania jednostką o kadłubie wypornościowym z prędkością  $V$  można wyrazić za pomocą zależności:

$$P_o = \frac{D \cdot V^3}{L \cdot c_p} \cdot \frac{X}{\lambda} \cdot \sqrt{\psi} \cdot 0,735 = f\left(\frac{V^3}{c_p}\right) \quad (10)$$

gdzie:

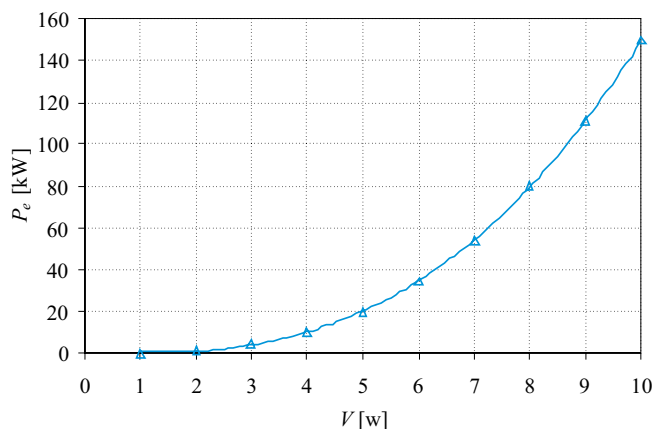
- $P_o$  – moc holowania okrętu [kW],
- $D$  – wyporność normalna [m<sup>3</sup>],
- $L$  – długość okrętu [m],

- $V$  – prędkość pływania okrętu [w],  
 $c_p$  – współczynnik wyznaczony w funkcji prędkości względnej  $V' = V \cdot \sqrt{\frac{\psi}{L}}$ ,  
 $X$  – współczynnik zależny od liczby wałów, uwzględniający wpływ części wystających,  
 $\lambda$  – współczynnik poprawkowy zależny od długości okrętu:  
 dla  $L > 100$  [m]  $\lambda = 1$ ,  
 dla  $L < 100$  [m]  $\lambda = 0,7 + 0,03 \cdot \sqrt{L}$ ,  
 $\psi$  – współczynnik smukłości kadłuba:

$$\psi = 10 \cdot \frac{B}{L} \cdot \delta \quad (11)$$

- $B$  – szerokość okrętu [m],  
 $\delta$  – współczynnik pełnotliwości kadłuba.

Zależność pomiędzy mocą użyteczną silnika napędu głównego i prędkością pływania przedstawiono na rys. 3.



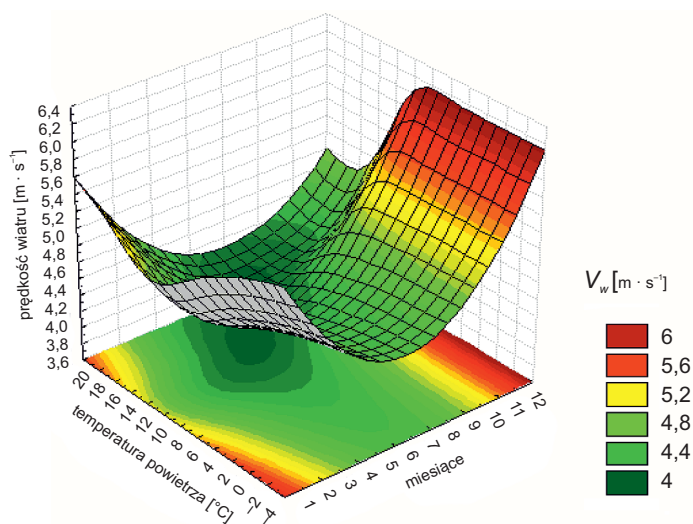
Rys. 3. Charakterystyka mocy użytecznej silnika napędu głównego jednostki pływającej jako funkcja prędkości pływania

Fig. 3. Characteristics of effective power of main ship's engine as a function of navigating speed

W przypadku warunków meteorologicznych występujących w rejonie Zatoki Gdańskiej wpływ na dyspersję zanieczyszczeń w powietrzu ma przede wszystkim temperatura powietrza, kierunek i siła wiatru, ciśnienie atmosferyczne oraz wilgotność powietrza.

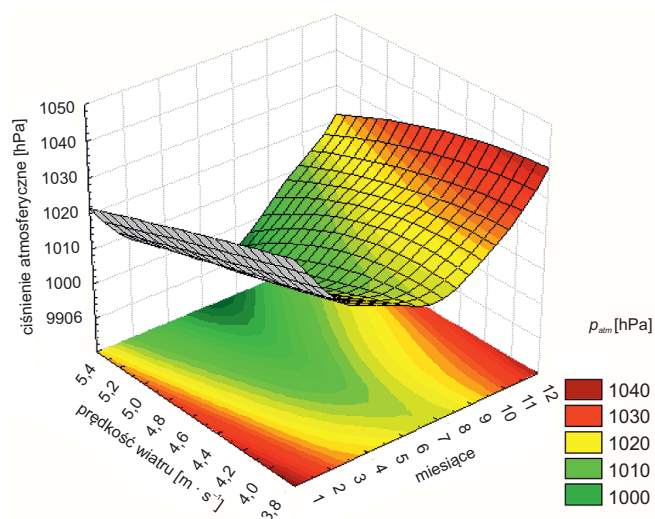
Główne zależności tych parametrów meteorologicznych w odniesieniu do miesiąca występowania dla Zatoki Gdańskiej [12] przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

Analiza procesu emitowania zanieczyszczeń z okrętowych silników spalinowych do atmosfery dotyczy przede wszystkim charakteru pracy silnika oraz wielkości i przeznaczenia jednostki. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w atmosferze jest rodzaj układu wylotowego spalin oraz ich wysokość w odniesieniu do poziomu morza.



Rys. 4. Zależność temperatury powietrza i prędkości wiatru w rejonie Zatoki Gdańskiej od miesiąca występowania

Fig. 4. The relationship of air temperature and wind speed in the Gulf of Gdansk from the month of occurrence



Rys. 5. Zależność prędkości wiatru i ciśnienia atmosferycznego w rejonie Zatoki Gdańskiej od miesiąca występowania

Fig. 5. The relationship of wind speed and atmospheric pressure in the Gulf of Gdansk from the month of occurrence

W związku z tym, że stężenie zanieczyszczeń w powietrzu zależy nie tylko od źródła emisji, ale również od jego wysokości, a w warunkach rzeczywistych wysokość komina emitującego zanieczyszczenia nie jest równa jego geometrycznej wysokości, wyznaczono zastępczą wysokość komina. W tym celu wykorzystano zależność Hollanda [13]:

$$S = \frac{E}{\sqrt{\pi} \cdot C_y \cdot \bar{v}_w \cdot x^{\frac{2-n}{2}}} \quad (12)$$

gdzie:

- $S$  – stężenie zanieczyszczeń emitowanych przez źródło punktowe [ $\text{g}/\text{m}^3$ ],
- $E$  – ilość zanieczyszczeń emitowanych w jednostce czasu [ $\text{g}/\text{h}$ ],
- $x$  – odległość rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń [ $\text{m}$ ],
- $C_y$  – współczynnik dyfuzji atmosferycznej, uwzględniający pionowy gradient temperatury,
- $\bar{v}_w$  – średnia prędkość wiatru w kierunku  $x$ ,
- $n$  – wykładnik meteorologiczny zależny od warunków meteorologicznych (prędkość wiatru i temperatury powietrza).

Do chwili obecnej nie zostały jeszcze wyznaczone modele matematyczne emisji zanieczyszczeń pochodzących z jednostek pływających, które uwzględniają zmienność warunków zewnętrznych [14].

W celu pominięcia wpływu warunków zewnętrznych na opory pływania, a co za tym idzie charakteru toksyczności spalin, przyjęto średnią wartość prędkości wiatru 5 m/s, co odpowiada 3<sup>o</sup>B (stan morza 3). Uproszczenie dotyczące oporu pływania wynika z faktu, że w warunkach rzeczywistych nie jest możliwe określenie oporu całkowitego okrętu. Wpływ powietrza na opór okrętu przy prędkościach typowych dla okrętów wypornościowych jest nieznaczący, ponieważ gęstość powietrza jest około 800 razy mniejsza niż gęstość wody.

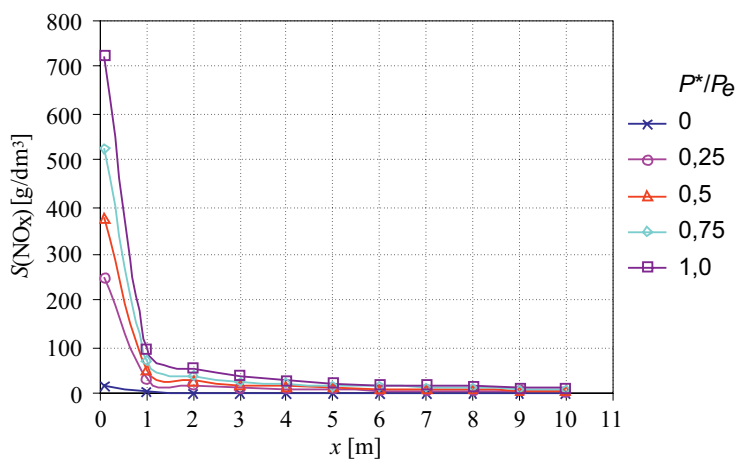
Przy doborze wykładnika meteorologicznego  $n$  dla Zatoki Gdańskiej uwzględniono wartość pionowego gradientu temperatury i prędkość wiatru. Dla Zatoki Gdańskiej pionowy gradient temperatury wynosi 0,6°C/100 m. Zakładając wysokość komina emitującego spaliny z silnika okrętowego  $H = 10$  m, określono charakter dyfuzji atmosferycznej. Przyjęta wysokość komina odpowiada przepływowi przejściowemu powietrza – dyfuzja pośrednia. Znając rodzaj dyfuzji atmosferycznej, można określić jej współczynniki. W przypadku wysokości powyżej 25 m współczynnik dyfuzji  $C_y = 0,24$ . Wartość współczynnika dyfuzji  $C_x$  i  $C_z$  pomija się, ponieważ ich wartości są dostatecznie małe w odniesieniu do prędkości wiatru [13]. Dobór powyższych współczynników odzwierciedla sytuację meteorologiczną najczęściej występującą w Zatoce Gdańskiej.

Na podstawie pomiarów wykonanych w Laboratorium Eksploatacji Urządzeń Okrętowych AMW w Gdyni na stanowisku laboratoryjnym silnika okrętowego Sulzer 6AL20/24 określono wartości stężenia i natężenia emisji związków szkodliwych spalin (tabela 1).

## Wskaźniki pracy i toksyczności spalin silnika okrętowego Sulzer typu 6AL20/24

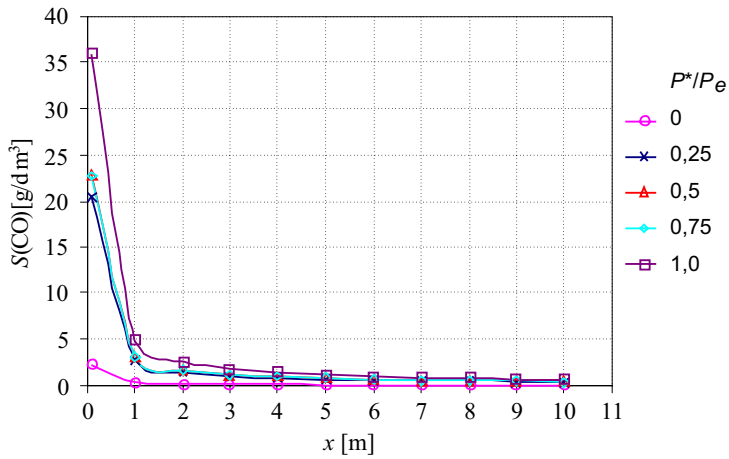
$n$ [obr/min]	340	500	600	700	750
$P^*/P_e$	0	0,25	0,5	0,75	1,0
$P_e$ [kW]	3	105	207	314	419
$\lambda$	5,03	2,40	2,28	2,50	2,57
$G_{pal}$ [kg/h]	7,00	24,10	44,20	62,90	86,00
$G_{spal}$ [kg/h]	538,67	897,48	1565,92	2437,38	3423,40
$c_{NO_x}$ [ppm]	585	1778	1544	1390	1360
$E_{NO_x}$ [g/h]	166,70	2532,42	3837,01	5376,68	7388,80
$c_{CO}$ [ppm]	240	240	154	98	111
$E_{CO}$ [g/h]	23,90	208,07	232,95	230,74	367,08
$c_{HC}$ [ppm]	30	43	42	36	35
$E_{HC}$ [g/h]	7,72	18,45	31,44	41,94	57,27

Na podstawie równania (12) wyznaczono rozkłady stężeń  $NO_x$  i CO w powietrzu na odległości w zakresie (0÷10) m i (10÷100) m od źródła emisji (rys. 6–9).



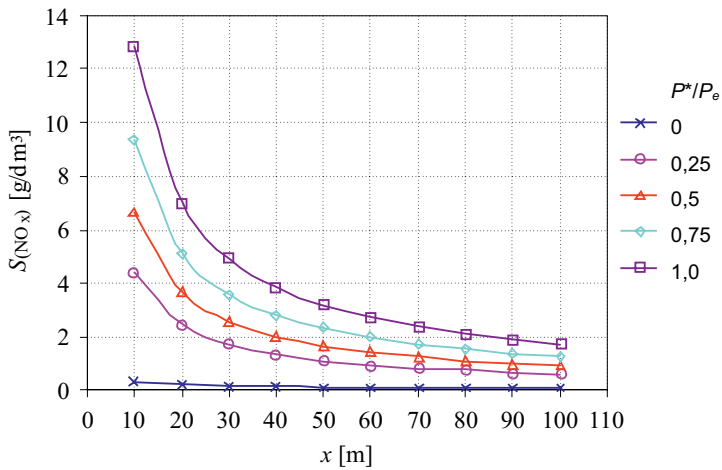
Rys. 6. Rozkład stężenia  $NO_x$  [ $g/dm^3$ ] na odległości (0–10) m od źródła emisji  $x$  dla różnych wartości obciążeń silnika okrętowego

Fig. 6. The distribution of  $NO_x$  concentration [ $g/dm^3$ ] on a distance (0–10) m from the source of emissions  $x$  for different values of loads the marine engine



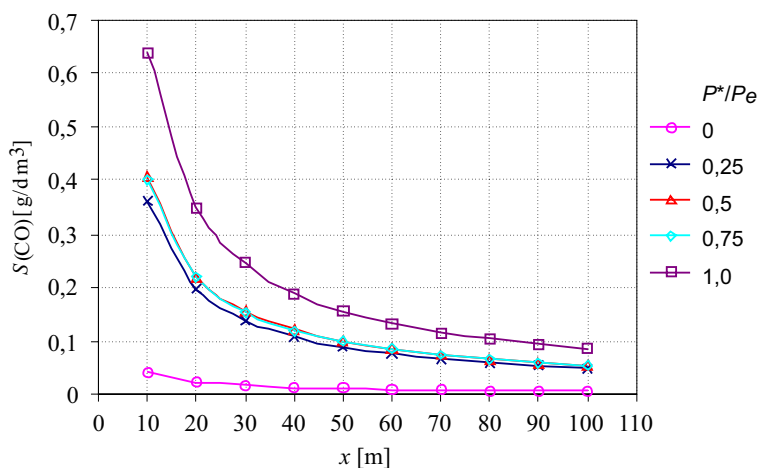
Rys. 7. Rozkład stężenia CO [ $\text{g/dm}^3$ ] na odległości (0–10) m od źródła emisji  $x$  dla różnych wartości obciążeń silnika okrętowego

Fig. 7. The distribution of CO concentration [ $\text{g/dm}^3$ ] on a distance (0–10) m from the source of emissions  $x$  for different values of loads the marine engine



Rys. 8. Rozkład stężenia NO<sub>x</sub> [ $\text{g/dm}^3$ ] na odległości (10–100) m od źródła emisji  $x$  dla różnych wartości obciążeń silnika okrętowego

Fig. 8. The distribution of NO<sub>x</sub> concentration [ $\text{g/dm}^3$ ] on a distance (10–100) m from the source of emissions  $x$  for different values of loads the marine engine



Rys. 9. Rozkład stężenia CO [ $\text{g/dm}^3$ ] na odległości (10–100) m od źródła emisji  $x$  dla różnych wartości obciążeń silnika okrętowego

Fig. 9. The distribution of CO concentration [ $\text{g/dm}^3$ ] on a distance (10–100) m from the source of emissions  $x$  for different values of loads the marine engine

## 5. Wnioski

Modelowanie emisji związków szkodliwych jest zagadnieniem bardzo ważnym, a jednocześnie bardzo złożonym. Znaczna ilość opracowań stwarza trudności w klasyfikacji i wyborze odpowiedniego modelu. w zależności od potrzeb i oczekiwań struktura modelu zależy bowiem nie tylko od jego przeznaczenia, ale również w dużej mierze od ilości i jakości danych wejściowych, zdeterminowanych środkami finansowymi przeznaczonymi na utworzenie, realizację i kalibrację modelu.

Model matematyczny emisji szkodliwych składników spalin silnika okrętowego w rejonie Zatoki Gdańskiej powinien uwzględniać zmienne warunki meteorologiczne, liczbę jednostek pływających oraz wskaźniki pracy i toksyczności okrętowych silników spalinowych. Do chwili obecnej nie zostały jeszcze wyznaczone modele matematyczne rozkładu stężenia zanieczyszczeń w powietrzu, które uwzględniają powyższe parametry, a przede wszystkim zmienność warunków zewnętrznych.

Opracowany na podstawie równania Hollanda model matematyczny emisji związków toksycznych spalin silnika okrętowego uwzględnia jedynie średnią prędkość wiatru. Pozostałe parametry hydrometeorologiczne oraz ruch jednostki zostały uproszczone lub pominięte w celu wyznaczenia wartości liczbowych w opisanym modelu.

## Literatura

- [1] Chłopek Z., *Ochrona środowiska naturalnego*, WKiŁ, Warszawa 2002.
- [2] Kniaziewicz T., Piaseczny L., *Using Information from AIS System in the Modelling of Exhausts Components from Marine Main Diesel Engines*, Journal of Polish CIMAC, Vol. 6, No. 1, Gdańsk 2011, 109-117.
- [3] Kniaziewicz T., *Problemy modelowania emisji szkodliwych składników spalin z silników okrętowych w rejonach miejskich aglomeracji nadmorskich*, Mechanika 26, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 162, Częstochowa 2006, 381-392.
- [4] *Maine Exhaust Emission Research Programme*, Lloyd's Register of Shipping, 1996.
- [5] Kniaziewicz T., Piaseczny L., *Wybrane aspekty określania emisji związków toksycznych spalin z silników statków morskich*, Prace Naukowe. Transport z. 63, Warszawa 2007, 133-140.
- [6] Brzozowska L., Brzozowski K., *Komputerowe modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń samochodowych*, Wydawnictwo Naukowe „Śląsk”, Katowice–Warszawa 2003.
- [7] Markiewicz T., *Przegląd modeli rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym*, Prace Naukowe. Inżynieria Środowiska z. 21, Warszawa 1996, 35-63.
- [8] Rup K., *Procesy przenoszenia zanieczyszczeń w środowisku naturalnym*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
- [9] Kniaziewicz T., *Metodyka pomiaru emisji związków toksycznych w gazach wylotowych tłokowych silników spalinowych okrętów wojennych i wpływ wybranych wielkości regulacyjnych na ich poziom*, rozprawa doktorska, AMW, Gdynia 1999.
- [10] Kniaziewicz T., Merkiś J., Piaseczny L., *Symulacja rzeczywistych obciążeń silników okrętowych w testach badawczych toksyczności spalin*, Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników, PAN, Oddział w Krakowie, Teza Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji, z. 18, Kraków 1999.
- [11] 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.
- [12] *Locja Bałtyku – Wybrzeże Polskie (502)*, wydanie 8, Biuro Hydrograficzne Marynarki Wojennej, Gdynia 2001.
- [13] Peavy H.S. et al., *Environmental Engineering*, McGraw-Hill Inc., 1989.
- [14] Piaseczny L. i in., *Modelowanie emisji związków szkodliwych pochodzących ze spalin okrętowych silników spalinowych w powietrzu atmosferycznym aglomeracji Trójmiasta*, Sprawozdanie z projektu badawczego N502 009 31/1187, Gdynia 2009.