

TOMASZ KNIAZIEWICZ, LESZEK PIASECZNY*

PROBLEMY MODELOWANIA EMISJI ZWIĄZKÓW TOKSYCZNYCH W SPALINACH SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

MODELING THE EMISSION OF TOXIC COMPOUNDS IN MARINE ENGINE EXHAUST GAS

Streszczenie

W celu określenia udziału jednostek pływających w zanieczyszczeniu środowiska oraz przeciwdziałania szkodliwym wpływom związków toksycznych zawartych w spalinach silników okrętowych konieczna jest znajomość wartości emisji tych związków z poszczególnych jednostek. Jest to możliwe przy znajomości parametrów ruchu jednostki, wartości stężeń poszczególnych związków dla tych parametrów oraz warunków atmosferycznych. W artykule przedstawiono problemy dotyczące modelowania emisji związków toksycznych w spalinach silników głównych jednostek pływających.

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

Abstract

In order to determine the contribution of vessels to environmental pollution and counteract the harmful effects of toxic compounds in marine engine exhaust gases, it is necessary to know the emission values of these compounds for particular vessels. This is possible with the knowledge of their movement parameters, values of concentration of particular compounds for those parameters and also atmospheric conditions. The report presents problems of modelling the toxic compounds emission in main marine engines exhaust gases.

Keywords: modelling, emission, toxic compounds, marine Diesel engine

* Dr inż. Tomasz Kniaziewicz, prof. dr hab. inż. Leszek Piaseczny, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni.

1. Wstęp

Emisja \mathbf{E} oraz stężenie (najczęściej masowe) zanieczyszczenia rozproszonego w powietrzu atmosferycznym (emisja \mathbf{I}) w obszarach zurbanizowanych jest przedmiotem intensywnych prac badawczych prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych w kraju i za granicą. Zależność pomiędzy emisją związków szkodliwych w spalinach a ich emisją można zapisać następująco [1]

$$\mathbf{I}(t) = \aleph[\mathbf{E}(t)] \quad (1)$$

gdzie \aleph oznacza pewien operator matematyczny (np. funkcjonal).

Natężenie emisji \mathbf{E} będącej funkcją czasu $m_i(t)$ z określonego źródła względem czasu t

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

gdzie m_i to masa danego związku szkodliwego.

Emisja drogową jest definiowana [1] jako pochodna emisji, będącej funkcją drogi $m_s(s)$ ze źródła, jakim jest jednostka pływająca, względem drogi s przez nią przebywanej

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

Na podstawie równania (3) można zapisać, że emisja na drodze S wyniesie

$$m_s(S) = \int_0^S b_s(s) ds \quad (4)$$

a w czasie T

$$m_i(T) = \int_0^T b_i(t)v(t)dt \quad (5)$$

gdzie $v(t)$ to prędkość jednostki pływającej.

Emisję drogową można zapisać jako funkcjonal przebiegów wielkości określających stan pracy silnika spalinowego, tzn. momentu obrotowego M_o , prędkości obrotowej n oraz wektorów opisujących stan cieplny silnika $\mathbf{R}(t)$, warunki otoczenia $\mathbf{G}(t)$, np. temperaturę otoczenia, ciśnienie, wilgotność powietrza i zmienne opory pływania jednostki $\mathbf{O}(t)$ (opór okrętu na wodzie płytkiej, opór okrętu podczas ruchu w kanale, opór powietrza i wpływ falowania)

$$b_i = \wp[M_o(t), n(t), \mathbf{R}(t), \mathbf{G}(t), \mathbf{O}(t)] \quad (6)$$

gdzie φ to operator przekształcający moment obrotowy i prędkość obrotową oraz wektory stanu cieplnego silnika, oporów ruchu i warunków otoczenia w średnią emisję drogową z jednostki pływającej.

Prowadzone obecnie badania dotyczące zanieczyszczenia atmosfery spowodowanej emisją związków szkodliwych z silników trakcyjnych dotyczą przede wszystkim silników pojazdów [1, 2] oraz silników lotniczych [3]. Stanowią one bardzo duży wkład w rozwój modelowania emisji związków szkodliwych z silników spalinowych, jednak ze względu na odmiennosć zarówno warunków topograficznych, hydrometeorologicznych, jak i specyfikę eksploatacji jednostek pływających ich zastosowanie do oceny emisji w obszarach nadmorskich jest bardzo ograniczone.

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 [4]. Czas ten określany jest przede wszystkim skutecznością uśredniania zmiennych warunków eksploatacji obiektów.

Główne czynniki, które determinują emisję globalną substancji zawartych w spalinach silników okrętowych można sklasyfikować następująco:

- struktura jednostek pływających (ze względu na wielkość i przeznaczenie jednostek pływających), wielkość i rodzaj silnika, liczba poszczególnych rodzajów silników na jednostce pływającej (silników głównych i pomocniczych) oraz ze względu na stan techniczny jednostki pływającej uwzględniający rozwiązania techniczne oraz stan kadłuba i zużycie elementów układów napędowych jednostki oraz ich licznosć,
- intensywnosć eksploatacji jednostek pływających,
- model ruchu jednostek pływających,
- warunki otoczenia: warunki atmosferyczne (falowanie, silne wiatry, oblodzenie), akweny pływania (porty, cieśniny, kanały i inne obszary niebezpieczne i trudne nawigacyjnie oraz wody otwarte), pływanie w lodach,
- właściwości ekonomiczne jednostek pływających ze względu na eksploatacyjne zużycie paliwa,
- właściwości ekologiczne silników stosowanych na jednostkach pływających,
- właściwości paliw (m.in. ze względu na rodzaj paliwa, skład i zawartość zanieczyszczeń).

Struktura jednostek pływających odgrywa szczególną rolę w modelach emisji globalnej. Stopień rozbudowy struktury determinuje, z jednej strony, dokładnosć modelowania emisji globalnej, z drugiej – możliwoć skutecznego użytkowania modeli z powodu problemów z dostarczeniem wiarygodnych danych o licznosci jednostek pływających i intensywnosci ich eksploatacji. To drugie ograniczenie stanowi najpoważniejsze kryterium przyjmowania struktury jednostek pływających. W strukturze tej do celów modelowania emisji globalnej celowe jest uwzględnienie następujących czynników:

- 1) przeznaczenie jednostek pływających,
- 2) umowna wielkość jednostki pływającej lub silnika,
- 3) rodzaju zastosowanego układu napędowego,
- 4) liczba silników i urządzeń wytwarzających spaliny,

5) poziom techniczny jednostki pływającej ze względu na właściwości ekologiczne.

Jako kryterium przydatności modeli emisji można 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 poprzez np. zastosowanie selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) oraz jednostki, na których nie zastosowano rozwiązań proekologicznych.

Liczność jednostek pływających oraz intensywność ich eksploatacji są wielkościami ekstensywnymi w modelach emisji globalnej. Pod pojęciem intensywności eksploatacji jednostek pływających w modelach emisji globalnej rozumie się liczbę i długość tras przebytych przez jednostki pływające w okresie bilansowania emisji. Problem długości tras przebytych przez jednostkę pływającą jest problemem o wiele bardziej złożonym niż długość dróg przebytych przez pojazdy (tzw. przebiegów pojazdów). Wynika on z faktu, że część jednostek pływających, takich jak holowniki, trawlerzy, trałowce czy jednostki patrolowe mają często dość długie całkowite drogi przebyte, jednak ich rzeczywista pokonywana odległość jest nieznaczna. W tym przypadku emisja globalna z jednostki pływającej przez dłuższy czas po małej powierzchni akwenu morskiego powinna być odniesiona do jednostki pola powierzchni obszaru pływania. Problem ten ma szczególne znaczenie na terenie portów i obszarów zurbanizowanych.

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

Do opracowania statystycznego strumienia ruchu jednostek morskich przyjęto trasy torów podejściowych do portów Gdynia i Gdańsk oraz toru wodnego rozdzielającego się na oba te tory. W tym celu na torach wodnych ustalono umowne, prostopadłe „bramki” o następujących współrzędnych [5]: $\overline{AB} = (54,58325^\circ; 18,85362^\circ)(54,45917^\circ; 18,88191^\circ)$, $\overline{CD} = (54,54200^\circ; 18,69511^\circ)(54,52508^\circ; 18,69326^\circ)$, $\overline{EF} = (54,48666^\circ; 18,70878^\circ)(54,47326^\circ; 18,73178^\circ)$, dla których dokonano oceny statystycznej wejść i wyjść jednostek w okresie obejmującym 11 miesięcy.

W badaniach wykorzystano dane archiwalne przesyłane w Systemie Automatycznej Identyfikacji (ang. *Automatic Identification System*), zarejestrowane brzegowym urządzeniem AIS firmy SAAB – typu R4 – śledzącym ruch jednostek morskich na Zatoce Gdańskiej.

Zgodnie z zaleceniami IMO zainstalowany na jednostce pływającej AIS powinien automatycznie transmitować i odbierać m.in. następujące dane (z zastosowaniem techniki TDMA):

- **statyczne**: numer MMSI (ang. *Maritime Mobile Service Identity*); numer IMO statku; sygnał wywoławczy i **nazwę statku; długość i szerokość statku; typ statku**,
- **dynamiczne**: współrzędne geograficzne pozycji otrzymane ze statkowego odbiornika radionawigacyjnego podłączonego do AIS, wraz ze wskazaniem jej dokładności; **czas uniwersalny** (ang. UTC – *Universal Time*); **kąt drogi nad dnem i prędkość nad dnem** (COG, VTG); kurs rzeczywisty (HDG); status nawigacyjny (np. nieodpowiadający za swoje ruchy, na kotwicy itp.); prędkość kątową zwrotu (ROT),

- **dotyczące podróży: zanurzenie statku;** port przeznaczenia i przewidywany czas przybycia do tego portu (ang. ETA – *Estimated Time of Arrival*); opcjonalnie – planowaną trasę przejścia (pozycje kolejnych punktów zwrotu).

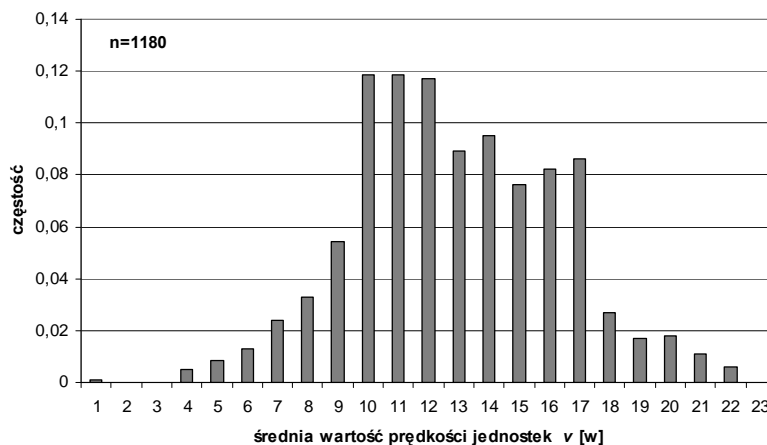
Urządzenie statkowe powinno transmitować w sposób autonomiczny w określonych odstępach czasowych:

- informację statyczną – co 6 min i na żądanie,
- informację dynamiczną – w odstępach czasowych od 3 do 12 s w zależności od prędkości jednostki,
- dane o podróży – co 6 min, po każdej zmianie którejkolwiek z danych oraz na żądanie.

Na jednostkach pływających stosowane są zarówno silniki szybkoobrotowe małej mocy ($n \geq 1200$ obr./min), podobne do stosowanych w pojazdach, jak i wolnoobrotowe ($n \leq 120$ obr./min) silniki dwusuwowe dużej mocy (rzędu kilkudziesięciu MW). Jednostki różnią się ponadto charakterem pracy silników (pracujące ze zmienną prędkością obrotową oraz obciążeniem – wg charakterystyki śrubowej lub ze stałą prędkością i zmiennym obciążeniem – np. silniki napędu głównego ze śrubami o nastawnym skoku oraz zespołów prądotwórczych). Wiąże się to z problemami oceny rzeczywistej wartości emisji poszczególnych związków szkodliwych dla jednostek o różnej wielkości i przeznaczeniu.

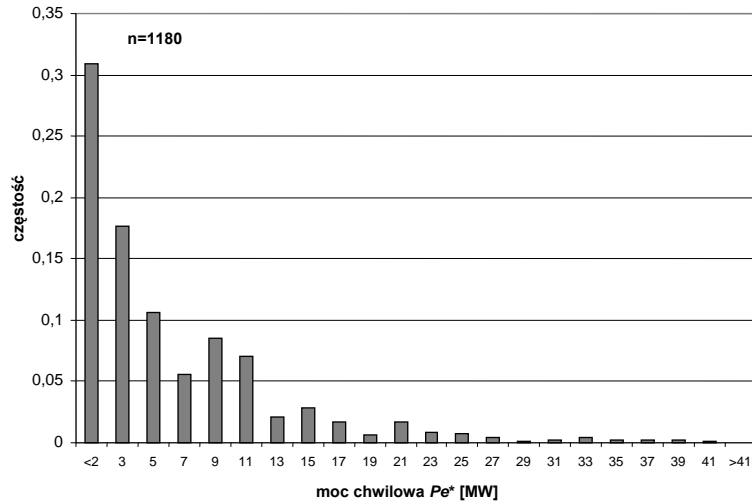
W celu oszacowania emisji związków toksycznych w spalinach na podstawie danych uzyskanych z systemu AIS [6] opracowano modele statystyczne opisujące wartość mocy chwilowej P_e^* dla prędkości chwilowej v^* w zależności od wielkości jednostki pływającej [7], czasu przebywania jednostek w badanym obszarze oraz emisji związków toksycznych.

Na rysunku 1 przedstawiono histogram prędkości chwilowej v^* , a na rys. 2 histogram wartości mocy chwilowej P_e^* dla bramki Gdynia (\overline{CD}).



Rys. 1. Histogram prędkości chwilowej v^* dla jednostek przepływających bramkę Gdynia (\overline{CD})

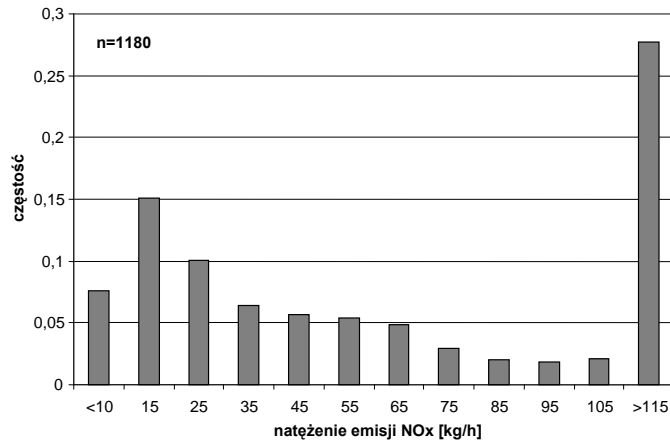
Fig. 1. Histogram of instantaneous speed v^* for ships passing through the Gdynia gate (\overline{CD})



Rys. 2. Histogram wartości mocy chwilowej P_{e^*} [MW] dla jednostek przepływających bramkę Gdynia (\overline{CD})

Fig. 2. Histogram of instantaneous engine power P_{e^*} [MW] for ships passing through the Gdynia gate (\overline{CD})

Z powyższych wykresów wynika, że największa liczba jednostek w tym rejonie płynie z prędkością 10–17 w i rozwija moc chwilową P_{e^*} w zakresie do 11 MW. Wartości te pozwalają na oszacowanie wartości natężenia emisji E_{NOx} w tym punkcie na poziomie 0,6–576 kg/h (rys. 3).

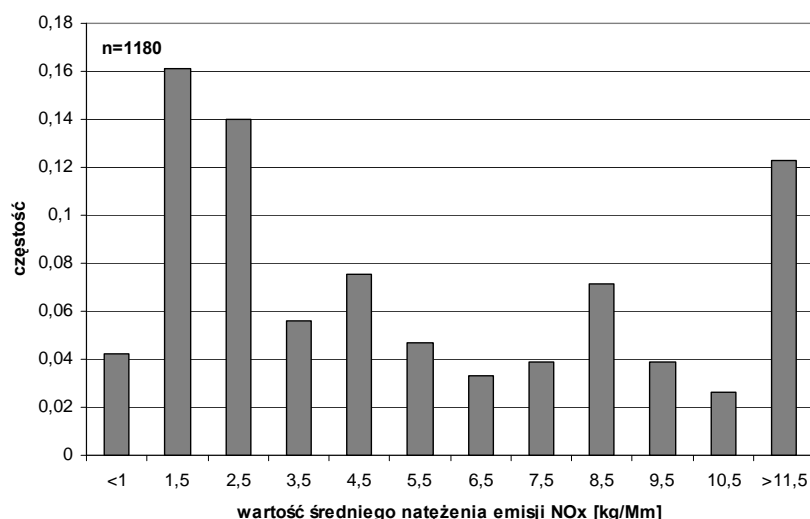


Rys. 3. Rozkład oszacowanej wartości natężenia emisji E_{NOx} [kg/h] dla jednostek przepływających bramkę Gdynia (\overline{CD})

Fig. 3. Distribution of the estimated emission intensity E_{NOx} [kg/h] for ships passing through the Gdynia gate (\overline{CD})

Znaczny udział jednostek o wartości natężenia emisji E_{NO_x} powyżej 115 kg/h wynika z tego, że powyższy zakres natężenia emisji związany jest z silnikami rowijającymi moc chwilową P_e^* powyżej 8,3 MW. Należy tu jednak zauważyć, że czas przebywania jednostki w rejonie bramki wynosi zaledwie kilka minut, a całkowity czas przebywania jednostki w rejonie podejścia Hel–Gdynia (bramki $\overline{AB-CD}$) wynosi w zależności od prędkości jednostek od 20 do 144 min. W związku z tym bardziej celowe wydaje się określenie wartości natężenia emisji E_{NO_x} w kilogramach na milę morską [kg/Mm] (rys. 4).

Istotnym 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.



Rys. 4. Rozkład oszacowanej wartości średniego natężenia emisji E_{NO_x} [kg/Mm] dla jednostek przebywających w rejonie podejścia Hel–Gdynia (bramki $\overline{AB-CD}$)

Fig. 4. Distribution of the estimated mean emission intensity E_{NO_x} [kg/Mm] for ships in area Hel–Gdynia (gate $\overline{AB-CD}$)

4. Podsumowanie

Modelowanie emisji związków szkodliwych jest zagadnieniem bardzo ważnym, a jednocześnie bardzo złożonym. Prowadzone obecnie prace naukowe i badawcze poświęcone rozprzestrzenianiu się zanieczyszczeń dotyczą zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym pochodzenia stacjonarnego (elektrownie, zakłady przemysłowe), motoryzacyjnego

oraz w ostatnim czasie również lotniczego. Obecne opracowania dotyczące przede wszystkim motoryzacji ze względu na m.in. wielkość silników okrętowych nie mogą mieć zastosowania do modelowania emisji ZT z silników okrętowych, ponieważ struktura modelu zależy nie tylko od jego przeznaczenia, ale również w dużej mierze od ilości i jakości danych wejściowych.

Należy tu dodać, że oprócz problemów, z którymi przy modelowaniu emisji związków toksycznych borykają się specjaliści od motoryzacji, w przypadku jednostek pływających do parametrów zakłócających dokładne wyznaczenie emisji poszczególnych związków (ze względu na brak informacji lub ich zmienność) można zaliczyć dodatkowo wpływ chropowatości powierzchni kadłuba (nierówności płyt kadłuba oraz ich łączeń, nierówności powłok malarskich oraz nierówności spowodowanych przez korozję i porastanie kadłuba), stan techniczny silnika, a zwłaszcza aparatury paliwowej oraz warunki atmosferyczne (szczególnie siła i kierunek wiatru).

Literatura

- [1] Chłopek Z., *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnych silników spalinowych*, Mechanika, z. 173, PN Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [2] Brzozowska L., Brzozowski K., *Komputerowe modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń samochodowych*, Wydawnictwo Naukowe „Śląsk”, Katowice–Warszawa 2003.
- [3] Kotlarz W., *Turbinowe zespoły napędowe źródłem skażeń powietrza na lotniskach wojskowych*, Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Katedra Płatowca i Silnika, Dęblin 2003.
- [4] Kniaziewicz T., *Problemy modelowania emisji szkodliwych składników spalin z silników okrętowych w rejonach miejskich aglomeracji nadmorskich*, VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa Silniki Gazowe 2006, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 162, Mechanika 26, Częstochowa 2006.
- [5] Pawlak M., Piaseczny L., *Modelowanie ruchu jednostek morskich dla określania emisji związków toksycznych spalin*, Materiały Międzynarodowej Konferencji Motoryzacyjnej KONMOT-AUTOPROGRES 2008, Szczawnica 2008.
- [6] Felski A., Piaseczny L., *Monitoring of the movement of the objects on the Gdansk bay in order to recognize the characteristics of their main propulsion systems*, Silniki Spalinowe/Combustion Engines, No. 2007-SC1, 377-382.
- [7] Kniaziewicz T., Piaseczny L., *Model of NO_x emission by sea-going vessels navigating In the gulf of Gdańsk region*, Silniki Spalinowe PTNSS – 2007-SC3, Poznań 2007.