

Tomasz Kniaziewicz
Leszek Piaseczny
Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni

MODELOWANIE EMISJI GAZÓW SPALINOWYCH W TRANSPORCIE MORSKIM

Streszczenie: Dla określenia udziału jednostek pływających w całkowitym zanieczyszczeniu środowiska oraz przeciwdziałania szkodliwym wpływom związków toksycznych w spalinach silników okrętowych konieczna jest znajomość wartości emisji tych związków z poszczególnych jednostek. Jest to możliwe po określeniu parametrów ruchu jednostki, wartości stężeń poszczególnych związków dla tych parametrów oraz warunków hydrometeorologicznych.

W opracowaniu przedstawiono warunki dotyczące modelowania emisji gazów spalinowych z silników głównych jednostek pływających oraz możliwość wykorzystania do ich budowy metody Monte Carlo.

Słowa kluczowe: emisja, modelowanie, jednostki pływające, metoda Monte Carlo

1. WPROWADZENIE

Problem zanieczyszczenia powietrza w portach oraz w miejscach podejścia do portów jest o tyle ważny, że porty znajdują się zazwyczaj w pobliżu lub na terenie dużych miast, a ich ograniczony obszar powoduje dużą koncentrację jednostek na małym obszarze. Nie bez znaczenia pozostają również szeroko pojęte uwarunkowania eksploatacyjne. Do tych ostatnich zaliczyć można sposób użytkowania silników, częstość występowania i charakter przebiegu stanów nieustalonych, procesów przejściowych charakteryzujących się znacznie większą emisją związków toksycznych niż podczas pływania na otwartych akwenach ze stałym obciążeniem silników. Na sposób użytkowania mają wpływ również warunki zewnętrzne, czyli oddziaływanie środowiska morskiego na pracę silnika.

Prowadzone obecnie badania dotyczące zanieczyszczania atmosfery spowodowanej emisją związków szkodliwych z silników trakcyjnych [1-3], jak wykazano w pracy [4] nie mogą być, ze względu na specyfikę eksploatacji i szeroko pojętych warunków hydrometeorologicznych, zastosowane do oceny emisji w obszarach nadmorskich.

Modelowanie emisji poszczególnych składników spalin z układów wylotowych silników okrętowych w czasie ruchu po określonym obszarze stanowi jeden z kluczowych

problemów w zagadnieniach bilansowania i sporządzania danych wejściowych dla modeli dyspersji.

Tworzone w Europie modele emisji związków toksycznych w spalinach ze środków transportu lądowego, takie jak HBEFA, COPERT, DVG czy DRIVE-MODEM [5,6] 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.

2. SYMULACYJNY MODEL EMISJI GAZÓW SPALINOWYCH ZE STATKÓW MORSKICH PŁYWAJĄCYCH PO OKREŚLONYM AKWENIE

Trajektorię ruchu jednostki pływającej rozpatrzono jako realizację dwuwymiarowego procesu stochastycznego, z założeniem, że proces ten jest procesem o wielowymiarowym rozkładzie typu ciągłego i ciągłych realizacjach. Realizacją takiego procesu jest dwuwymiarowa trajektoria zależna od czasu.

Przyjmując prędkość jednostki jako długość wektora $|\mathbf{v}(t)|$ i rozpatrując ruch jednostki po drodze $\{\mathbf{s}(t) = (x(t), y(t)) : t \in T\}$, równanie opisujące masę wyemitowanych spalin można przedstawić jako:

$$M = \int_{\alpha}^{\beta} f(\mathbf{s}(t)) |\mathbf{v}(t)| dt \quad (1)$$

Zakładając, że w przedziałach czasu $[t_{i-1}, t_i]$, $i = 1, \dots, N$ prędkość jednostki pływającej jest stała

$$|\mathbf{v}(t)| = v_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

oraz intensywność emisji spalin jest stała

$$f(x(t), y(t)) = \xi_i, \quad t \in [t_{i-1}, t_i), \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

otrzymujemy dolne oszacowanie masy wyemitowanych spalin

$$M = \sum_{i=1}^N M_i \quad (4)$$

gdzie: $M_i = \xi_i v_i \Delta t_i$, $i = 1, 2, \dots, N$

Masa wyemitowanych spalin w określonym akwenu A w przedziale czasu $[t_{i-1}, t_i]$ jest sumą mas wyemitowanych przez wszystkie jednostki znajdujące się w tym przedziale czasu w tym akwenu. Jeżeli $W^{(k)}$, $k = 1, \dots, K$ oznacza masę wyemitowanych spalin przez k -tą jednostkę pływającą, to łączna masa wyemitowanych spalin w akwenu A w przedziale czasu $[t_{i-1}, t_i]$ jest zmienną losową

$$\mathbf{W}_K = \sum_{k=1}^K W^{(k)} \quad (5)$$

Zmienna losowa \mathbf{W}_K jako suma niezależnych zmiennych losowych o rozkładzie normalnym ma rozkład normalny o wartości oczekiwanej

$$E(\mathbf{W}_K) = \sum_{k=1}^K W^{(k)} = \sum_{k=1}^K [E(\Delta M^{(k)}) + M^{(k)}] = \sum_{k=1}^K [M^{(k)} + \varepsilon^{(k)} \sum_{i=1}^N \xi_i^{(k)} \Delta s_i^{(k)}] \quad (6)$$

i odchyleniu standardowym

$$\sigma(\mathbf{W}_K) = \sqrt{\sum_{k=1}^K \rho^{(k)} \sum_{i=1}^N [\xi_i^{(k)} \Delta s_i^{(k)}]^2} \quad (7)$$

W modelowaniu ruchu statków płynących torem wodnym z punktu P_{i-1} do punktu P_i , można się posłużyć teorią masowej obsługi, której podstawą jest charakterystyka strumienia wchodzących jednostek („strumienia zgłoszeń”) do analizowanego obszaru („kanału obsługi”) oraz strumienia wychodzącego z „kanału” [7]. Dla jednostek pływających, które wpłynęły do „kanału” (na tor wodny), czasem obsługi będzie czas ich przejścia po rozpatrywanym torze.

Proces nadchodzenia zgłoszeń jest procesem stochastycznym, a strumień zgłoszeń może być opisany pewną funkcją $X(t)$, określającą liczbę zgłoszeń wymagających „obsługi” w przedziale czasu $(0, t)$. Funkcja $X(t)$ jest zmienną losową dla każdej wartości t .

Aby dać pełne określenie strumienia zgłoszeń, wystarczy wiedzieć, jakie będzie prawdopodobieństwo tego, że w czasie $(0, t_1)$ nadejdzie j_1 zgłoszeń, w czasie $(0, t_2)$ nadejdzie j_2 zgłoszeń itp. Jeśli to prawdopodobieństwo będzie znane dla dowolnej grupy całkowitych liczb dodatnich j_1, j_2, \dots, j_n i dodatnich t_1, t_2, \dots, t_n , to strumień zgłoszeń będzie w pełni opisany.

Istotną cechą wielu realnych strumieni zgłoszeń stanowi stacjonarność, znacznie upraszczająca budowany model. Cechę stacjonarności posiada również rozpatrywany strumień zgłoszeń jednostek wpływających na tor wodny. Strumień ten ma dodatkowo cechy strumienia *bez następstw* lub *strumienia o przyrostach niezależnych* (dystrybuanta grupy $X(t_i+a)-X(a)$, gdzie $(i = 0, 1, 2, \dots, n)$ przy $t_i > 0$ i dowolnym $a > 0$ nie zależy od wartości wielkości $X(t)$ przy $t < a$).

Oprócz określania prawdopodobieństwa liczby zgłoszeń do toru wodnego, istotne jest również określenie czasu ich podróży, który w świetle teorii masowej obsługi, można rozpatrywać jako *czas obsługi*. Oczywiście jest to, że czas ich obsługi jest różny dla poszczególnych jednostek i zależy od wielu czynników: przede wszystkim ich prędkości, ale także losowych warunków zakłócających, takich jak: warunki otoczenia, czyli warunki atmosferyczne (kierunek i siła wiatru, stan morza, prądy morskie, ciśnienie atmosferyczne, temperatura powietrza), oraz akweny pływania (otwarte morze, porty, cieśniny, itp.), jak również warunki związane z samą jednostką pływającą (oporami kadłuba, stanem technicznym, możliwościami nautycznymi itp.).

W związku z powyższym, w rozpatrywanym przypadku dla jednostek pływających, czas obsługi jest zmienną losową, a więc opisany może być przy pomocy dystrybuanty: $F(t) = P\{\gamma < t\}$ dla $t \geq 0$, gdzie γ jest czasem obsługi. Funkcja $F(t)$ określa tutaj

prawdopodobieństwo tego, że czas obsługi γ będzie mniejszy od pewnego z góry określonego t . Funkcja $F(t)$ powinna być dodatnią funkcją monotonicznie rosnącą oraz nie powinna być większa od jedności [8].

W sytuacjach, w których strumień zgłoszeń nie posiada cech strumienia prostego lub jest niestacjonarny i niejednorodny, rozkład czasu obsługi może być dowolny można wykorzystać metodę Monte Carlo (MC).

Podstawową rolę w pierwszym z tych zagadnień odgrywają realizacje zmiennych losowych o rozkładach równomiernych.

"Generowanie rozkładu" oznacza otrzymywanie realizacji niezależnych zmiennych losowych o tym rozkładzie.

Zmienna losowa U ma rozkład dyskretny równomierny, skoncentrowany w zbiorze $\{0,1,2,\dots, n-1\}$, jeżeli funkcja rozkładu (gęstość rozkładu dyskretnego) tej zmiennej losowej ma postać

$$p_U(x) = \frac{1}{n} \quad \text{dla } x \in \{0,1,\dots,n-1\} \quad (8)$$

Zmienna losowa U ma rozkład równomierny (jednostajny, prostokątny) na odcinku $(0,1)$, jeżeli gęstość rozkładu tej zmiennej losowej ma postać:

$$f_U(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x \in (-\infty, 0] \\ 1 & \text{dla } x \in (0, 1) \\ 0 & \text{dla } x \in (1, \infty) \end{cases} \quad (9)$$

Dystrybuanta tego rozkładu wyraża się wzorem

$$F_U(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x \in (-\infty, 0] \\ x & \text{dla } x \in (0, 1) \\ 1 & \text{dla } x \in (1, \infty) \end{cases} \quad (10)$$

Rozkład taki nazywamy standardowym rozkładem równomiernym i oznaczamy symbolem $U(0,1)$.

Opierając się na generatorach liczb pseudolosowych z rozkładów równomiernych można otrzymać generatory liczb pseudolosowych stanowiących realizacje zmiennych losowych o innych rozkładach. Nie istnieje jedna uniwersalna metoda uzyskiwania generatorów liczb losowych (pseudolosowych) pochodzących z różnych rozkładów. Do celów realizacji symulacyjnego modelu emisji związków toksycznych w spalinach wykorzystano następujące metody szerzej opisane w pracy [9]:

- metoda przekształcenia odwrotnego – w celu wygenerowania chwili „wejścia” statku na tor wodny oraz odstępów czasowych pomiędzy jednostkami,
- metoda oparta na reprezentacji zmiennych losowych – do generowania prędkości jednostki V_s ,
- generowanie rozkładów dyskretnych – toru wodnego oraz klasy jednostki.

3. ALGORYTM MODELU SYMULACYJNEGO EMISJI GAZÓW SPALINOWYCH ZE STATKÓW MORSKICH PŁYWAJĄCYCH PO OKREŚLONYM AKWENIE

W celu realizacji modelu symulacyjnego emisji związków toksycznych w spalinach ze statków morskich pływających po określonym akwenie przyjęto następujące założenia:

1. Informację dotyczącą miejsca wejścia jednostki na tor wodny oraz jej wyjścia z toru wodnego oznaczmy za pomocą uporządkowanych par liczb wyznaczających drogi (trasy) jednostek pływających. Przyjęto, że dla ustalonego t , D_t jest zmienną losową, której wartość oznacza trasę jednostki pływającej:

$$p_{D_t}(b) = P(D_t = d), \quad d \in \mathbf{D} = \{(1,2), (2,1), \dots, (1,z), (z,1)\}, \quad t \in \mathbf{T}$$

oraz:

$$P(D_t = (i, j)) = P(D_t = (j, i)), \quad t \in \mathbf{T}$$

2. W związku z faktem, że rodzaj i wielkość statku mają znaczący wpływ na wartość emisji związków toksycznych w spalinach (rodzaj silnika, liczba silników, moc), jednostki podzielono na klasy (rodzaje), które ponumerowano liczbami naturalnymi, należącymi do zbioru:

$$\mathbf{K} = \{1, 2, \dots, s\}$$

3. Dla ustalonego t , U_t jest zmienną losową, której wartość oznacza numer klasy do której należy wchodząca na tor wodny jednostka. Ta zmienna losowa jest zależna od zmiennej losowej D_t . Przyjęto, że rozkład warunkowy

$$p_{U_t|D_t}(s) = P(U_t = s | D_t = d), \quad s \in \mathbf{K}, \quad d \in \mathbf{D} \quad t \in \mathbf{T}$$

będzie rozkładem tej zmiennej losowej zależnym od czasu kalendarzowego. Można więc przyjąć, że w określonych przedziałach czasu ten rozkład warunkowy jest stały. Statystycznymi oszacowaniami rozkładu w tych przedziałach są częstości pochodzące z odpowiednich obserwacji.

4. Prędkość jednostki klasy $K=1, 2, \dots, s$ jest zmienną losową V_s o rozkładzie określonym przez rosnącą dystrybuantę

$$F_s(x) = P(V_s \leq x), \quad x \in \mathbf{R}, \quad s \in \mathbf{K} = \{1, 2, \dots, s\}$$

Wstępna analiza pozwala przyjąć założenie, że zmienna losowa V_s ma rozkład normalny $N(m_s, \sigma_s)$.

5. Jednostki pojawiają się na torach wodnych zatoki (przechodzą przez określone „bramki”) w chwilach, które są wzajemnie niezależnymi (stochastycznie) zmiennymi losowymi zależnymi od czasu kalendarzowego (pory dnia, dnia tygodnia, miesiąca). Te zmienne losowe oznaczamy

$$\tau_{t,n,b}, \quad t \in \mathbf{T} = [0, \infty), \quad n \in \mathbf{N}_0 = \{0, 1, 2, \dots\}, \quad b \in \mathbf{B} = \{1, 2, 3\}$$

Symbolem

$$\mathcal{G}_{t,n,b}, \quad t \in \mathbf{T} = [0, \infty), \quad n \in \mathbf{N}_0 = \{0, 1, 2, \dots\}, \quad b \in \mathbf{B} = \{1, 2, 3\}$$

oznaczono odstępy czasowe między chwilami „wejścia” na tor wodny przez określoną „bramkę” dwóch kolejnych jednostek. Między tymi zmiennymi losowymi zachodzą związki:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{t,n+1,b} &= \tau_{t,n+1,b} - \tau_{t,n,b} & n \in \mathbf{N}_0 = \{0, 1, 2, \dots\}, \quad b \in \mathbf{B} = \{1, 2, 3\} \\ \tau_{t,n+1,b} &= \tau_{t,n,b} + \mathcal{G}_{t,n+1,b} & n \in \mathbf{N}_0 = \{0, 1, 2, \dots\}, \quad b \in \mathbf{B} = \{1, 2, 3\} \end{aligned}$$

6. Nieujemne zmienne losowe

$$\mathcal{G}_{t,n,b}, \quad t \in \mathbf{T} = [0, \infty), \quad n \in \mathbf{N}_0 = \{0, 1, 2, \dots\}, \quad b \in \mathbf{B} = \{1, 2, 3\}$$

mają rozkłady określone przez rosnące w przedziale $[0, \infty)$ dystrybuanty

$$F_{t,n,b}(x) = P(\mathcal{G}_{t,n,b} \leq x), \quad t \in \mathbf{T} = [0, \infty), \quad n \in \mathbf{N}_0 = \{0, 1, 2, \dots\}, \quad b \in \mathbf{B} = \{1, 2, 3\}$$

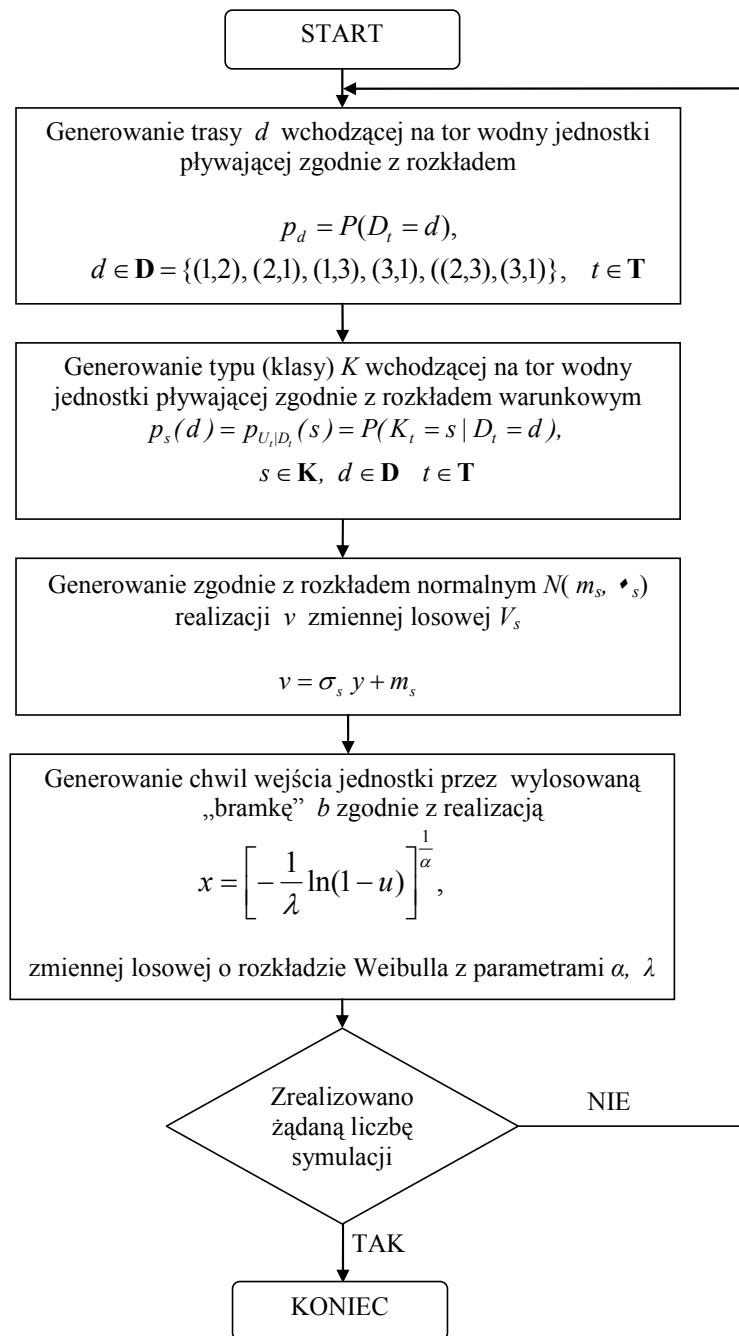
Ze wstępnej analizy wynika, że w modelu symulacyjnym można przyjąć rodzinę rozkładów Weibulla zależną od parametrów t , b i niezależną od n .

Algorytm modelu symulacyjnego emisji związków toksycznych w spalinach ze statków morskich pływających po określonym akwenie przedstawiono na rys. 1.

4. PODSUMOWANIE

Modelowanie emisji, a w dalszej kolejności dyspersji i imisji gazów spalinowych z silników okrętowych jest zagadnieniem bardzo ważnym a jednocześnie bardzo złożonym. Opracowany model matematyczny oraz program komputerowy pozwalają na symulowanie ruchu statków po określonym obszarze oraz określanie emisji związków toksycznych w spalinach

W przypadku znanego obszaru pływania statków, na podstawie danych statystycznych uzyskanych np. dzięki systemowi AIS [10] możliwy jest taki dobór parametrów i współczynników, który pozwoli na bardzo dokładne odwzorowanie sytuacji na tym obszarze. Ponadto, w przypadku zmian w ruchu statków, np. ze względu na sytuację ekonomiczną lub w sposobie napędu statków, możliwe jest bardzo szybkie dostosowanie programu do zmieniających się warunków.



Rys.1. Algorytm modelu symulacyjnego emisji związków toksycznych w spalinach ze statków morskich pływających po określonym akwenie

Możliwość dokładnego generowania ruchu i emisji z poszczególnych jednostek pływających pozwala na wyznaczenie dyspersji i imisji poszczególnych związków toksycznych w spalinach, co stanowi kolejny etap prac autorów artykułu.

Bibliografia

1. Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnych silników spalinowych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika, z.173, Warszawa 1999.
2. Brzozowska L., Brzozowski K.: Transport drogowy a jakość powietrza atmosferycznego. WKŁ, Warszawa 2009.
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. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 162, MECHANIKA 26, Częstochowa 2006.
5. Drag Ł.: Modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ze środków transportu drogowego, Archiwum Motoryzacji nr 1/2007.
6. Joumard R.: Methods of estimation of atmospheric emission from transport: European scientific state of the art, Action COST319 final report, LTE 9901 report, 1999.
7. Pawlak M., Piaseczny L.: Modelowanie ruchu jednostek morskich dla określania emisji związków toksycznych spalin. Materiały Międzynarodowej Konferencji Motoryzacyjnej KONMOT-AUTOPROGRES 2008, Szczawnica 2008.
8. Grabski F., Kniaziewicz T., Piaseczny L.: Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego Nr 502 009 31/1187. AMW Gdynia 2009.
9. Kniaziewicz T., Piaseczny L.: Stochastic models of toxic compounds emission in exhausts from sea-going vessels sailing in a particular area. Combustion Engines PTNSS – 2009-SC1. Poznań 2009.
10. Kniaziewicz T., Piaseczny L.: Możliwość wykorzystania informacji z systemu AIS w modelowaniu emisji składników spalin z silników statków w rejonie Zatoki Gdańskiej, Zeszyty Naukowe AMW Nr 4, Gdynia 2008.

MODELLING OF EXHAUST GAS EMISSION IN MARITIME TRANSPORTATION

Summary: For determine the share of vessels in the total pollution of the environment and to counteract the harmful effects of toxic compounds in marine engine exhausts it is necessary to know the values of those compounds' emission from particular vessels. It is possible by knowing the movement parameters of vessels, the values of concentrations of particular compounds for these parameters and the hydro meteorological conditions.

The study presents conditions for the modelling of exhaust gas emission from main engines of ships and the possibility of using stochastic processes for their construction such as the Monte Carlo method.

Keywords: emission, modelling, Monte Carlo method