

MODELOWANIE EMISJI SZKODLIWYCH SKŁADNIKÓW SPALIN MORSKICH SILNIKÓW OKRĘTOWYCH W CELU OCENY WPLYWU EMITOWANYCH ZANIECZYSZCZEŃ NA JAKOŚĆ POWIETRZA ATMOSFERYCZNEGO

W artykule zaprezentowano możliwości wykorzystania opracowanego na podstawie metod Monte Carlo symulacyjnego modelu emisji szkodliwych składników spalin silników okrętowych statków morskich do przeprowadzenia oceny wpływu tych zanieczyszczeń na jakość powietrza atmosferycznego. Przeprowadzono również analizę możliwości wykorzystania do tego celu istniejących modeli rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym, wskazano na ich istotne ograniczenia oraz na konieczność opracowania specjalistycznego modelu rozprzestrzeniania się związków emitowanych w spalinach statków.

WSTĘP

W celu oceny wpływu zanieczyszczeń emitowanych w spalinach statków na jakość powietrza konieczne jest zastosowanie mniej lub bardziej złożonego systemu modelowania, w którego skład powinny wejść następujące moduły:

- moduł emisji zanieczyszczeń,
- moduł rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze, czyli ich transportu, dyfuzji i przemian chemicznych w atmosferze, z uwzględnieniem procesów wymywania w chmurach oraz suchej i mokrej depozycji,
- moduł meteorologiczny, powiązany z systemem przetwarzania, analizy i asymilacji danych meteorologicznych,
- moduł emisji, a więc rozkładu stężeń w określonym obszarze przestrzeni atmosferycznej.

Emisja substancji zawartych w spalinach silników okrętowych zależy głównie od: wielkości i rodzaju silnika, liczby silników poszczególnych rodzajów zainstalowanych na jednostce pływającej (silników głównych i pomocniczych), wielkości opisujących stan pracy silnika: momentu obrotowego, prędkości obrotowej, stanu cieplnego silnika, stanu technicznego silnika (parametrów układu wymiany ładunku, stanu układu, stanu technicznego i poprawności regulacji aparatury wtryskowej), zastosowanych rozwiązań ekologicznych (np. silniki typu „flex” z rozbudowanym, komputerowym układem sterowania wtryskiem paliwa oraz pracą układu wymiany

ładunku, wykorzystywanie układów oczyszczania spalin, np. selektywnej redukcji katalitycznej), a także struktury jednostek pływających (ich wielkości i przeznaczenia), właściwości ekonomicznych statków ze względu na eksploatacyjne zużycie paliwa, stanu technicznego statków uwzględniającego rozwiązania techniczne oraz stan kadłuba i zużycie elementów układów napędowych, jak również od właściwości paliw (m.in. rodzaju paliwa, składu i zawartości zanieczyszczeń).

W modelowaniu emisji zanieczyszczeń w spalinach silników okrętowych i rozprzestrzeniania się tych zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym w pierwszej kolejności należy określić parametry i charakterystykę drogi statków. Statki poruszają się z reguły po ściśle wytyczonych szlakach żeglugowych. W celu uzyskania szczegółowych danych dotyczących danej jednostki pływającej pomocne może być wykorzystanie Systemu Automatycznej Identyfikacji Statku (AIS), czyli morskiego systemu identyfikacji statków transmitującego na paśmie VHF takie informacje o statku, jak: sygnał wywoławczy statku MMSI, numer rejestracyjny IMO, nazwa i typ statku, wymiary statku (długość, szerokość, zanurzenie), pojemność brutto (GT), czas przesłania informacji z systemu AIS (UTC), pozycja statku w czasie rzeczywistym (długość i szerokość geograficzna), kurs, prędkość, port wypłynięcia i port przeznaczenia, rodzaj transportowanego ładunku, informacje o niebezpieczeństwach i innych parametrach nawigacyjnych. Ten statkowy system nadawczy, działający jak transponder, jest zdolny do przesyłania i obsługi ponad 4500 raportów na minutę i odświeżania danych nawet co 2 sekundy. Dostępność tych szczegółowych danych pozwala na szybką identyfikację statku i jego podstawowych parametrów, co stanowi narzędzie pomocne przy wyznaczaniu charakterystyk drogi statku, a następnie przy modelowaniu emisji zanieczyszczeń zawartych w spalinach, a w dalszej kolejności ich dyspersji.

Dodatkowo, zarówno przy wyznaczaniu wskaźników emisji szkodliwych składników spalin, jak i badaniu ich rozprzestrzeniania się w powietrzu, należy uwzględnić warunki meteorologiczne otoczenia (np. temperaturę otoczenia, ciśnienie, wilgotność powietrza, opady, siłę i kierunek wiatru) i zmienne opory pływania statku (opór statku na wodzie płytkiej, opór statku podczas ruchu w kanale, opór powietrza, wpływ falowania oraz oblodzenia). W tym celu korzystne jest zintegrowanie w modelu preprocesora meteorologicznego, który zintegrowany z pozostałymi modułami systemu modelowania powinien być powiązany z systemem przetwarzania, analizy i asymilacji danych meteorologicznych.

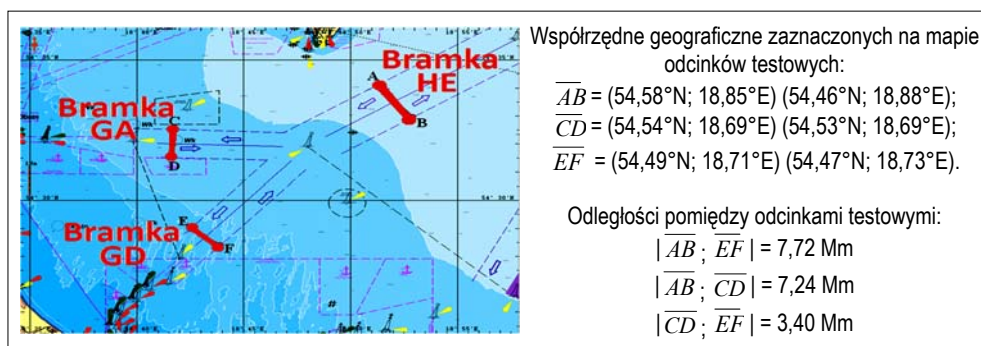
Do modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powstających w wyniku spalania paliw przez silniki okrętowe z istniejących i powszechnie stosowanych modeli najbardziej przydatne wydają się być matematyczne modele deterministyczne rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu ze źródeł punktowych, liniowych i powierzchniowych na obszarach pozamiejskich. Na podstawie tego kryterium, czyli rodzaju układu współrzędnych (poziomego, pionowego lub sferycznego), można wyróżnić następujące klasy modeli: gaussowskie (smugi, obłoku), eulerowskie (pudełkowe, siatkowe) i lagrangeowskie (pudełkowe, ruchu pseudocząstek).

1. MODELOWANIE EMISJI SZKODLIWYCH SKŁADNIKÓW SPALIN MORSKICH SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

Na podstawie pozyskanych z systemu AIS danych statystycznych dotyczących ruchu statków w wybranym do celu badań rejonie Zatoki Gdańskiej (tras torów podejściowych do portów Gdynia i Gdańsk oraz toru wodnego rozdzielającego się na oba te tory – w okolicy portu Hel) zbadano charakterystyki ruchu statków w tym rejonie oraz obliczono wskaźniki emisji związków szkodliwych zawartych w spalinach silników okrętowych tych jednostek pływających. Metodę przeprowadzonych badań oraz ich szczegółowe wyniki przedstawiono m.in. w pracach [8–10].

Na podstawie uzyskanych wyników możliwe było opracowanie mezoskalowego modelu symulacyjnego ruchu statków i emisji związków szkodliwych w ich spalinach. Model ten, oparty na metodach Monte Carlo, opracowano dla ograniczonego wirtualnymi odcinkami testowymi (bramkami) rejonu Zatoki Gdańskiej (rys. 1), do którego statki wpływały:

- przez bramkę GD, a następnie obrały kurs na Hel i przepłynęły przez bramkę HE, bądź na Gdynię i przepłynęły przez bramkę GA;
- przez bramkę GA, a następnie obrały kurs na Hel i przepłynęły przez bramkę HE, bądź na Gdańsk i przepłynęły przez bramkę GD;
- przez bramkę HE, a następnie obrały kurs na Gdańsk i przepłynęły bramkę GD, bądź na Gdynię i przepłynęły przez bramkę GA.



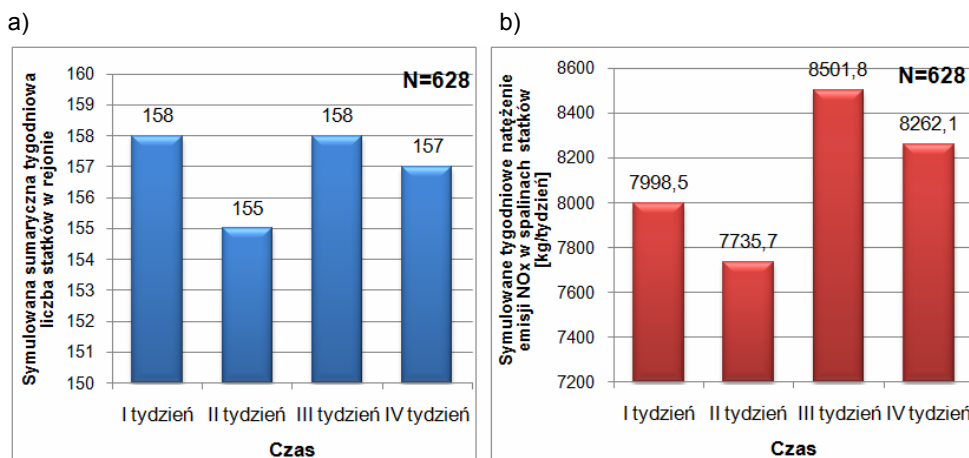
Rys. 1. Mapa rejonu Zatoki Gdańskiej z zaznaczonymi odcinkami testowymi (bramkami)

Dane wejściowe do opracowanego modelu symulacyjnego stanowiły: prawdopodobieństwo wystąpienia statku na danym torze wodnym, prawdopodobieństwo wystąpienia statku określonego typu, prędkość statku i moc silnika dla każdego typu statku, długość tras żeglugowych pomiędzy poszczególnymi bramkami, wartość natężenia emisji NO_x w jednostce czasu dla określonego typu statku. W opracowanym modelu dokonano pewnych uproszczeń, które były możliwe do zastosowania na podstawie wcześniejszych badań i analiz – np. nie uwzględniono zmiennych warunków pracy silnika (ze względu na bardzo niewielką dynamikę

ruchu w badanym akwenu). W modelu pominięto również zjawisko myszkowania statku na kursie (ze względu na to, że w wyniku występowania tego zjawiska wartości emisji wzrastają jedynie o około 5%).

Na podstawie opracowanego modelu, w celu realizacji symulacji emisji związków szkodliwych w spalinach ze statków morskich pływających po określonym akwenu, opracowano przy użyciu oprogramowania *MATHEMATICA 6.2* odpowiedni program liczący. Umożliwia on przeprowadzenie symulacji dla dowolnego okresu – może to być zaledwie kilka godzin albo nawet kilka lat. Umożliwia wyznaczenie charakterystyk ruchu i wskaźników emisji poszczególnych statków znajdujących się w dowolnej chwili w analizowanym akwenu, jak również kalkulację sumarycznej emisji związków szkodliwych w ich spalinach dla dowolnego okresu. Dzięki symulacji dla każdego statku można zatem uzyskać następujące informacje: kategoria (typ) statku, czas wpłynięcia do analizowanego akwenu oraz czas wypłynięcia z niego, średnia prędkość, z jaką statek porusza się na drodze pomiędzy dwiema kolejnymi bramkami, a także wartości emisji dowolnego składnika spalin.

Dla przykładu, w symulacji, której wyniki przedstawiono na rysunku 2, założono 4 tygodnie (672 godziny), co odpowiadało 628 próbom, czyli 628 statkom, które w tym czasie wpływały do analizowanego obszaru Zatoki Gdańskiej przez trzy bramki (GD, GA i HE). Wygenerowana przez program sumaryczna liczba statków przebywających w analizowanym rejonie Zatoki Gdańskiej w poszczególnych tygodniach badanego okresu była dość podobna – od 155 do 158 statków, natomiast różnice w wartościach tygodniowego natężenia emisji NO_x w spalinach tej grupy statków były już bardziej znaczne (od 7,7 Mg NO_x do 8,5 Mg NO_x tygodniowo).

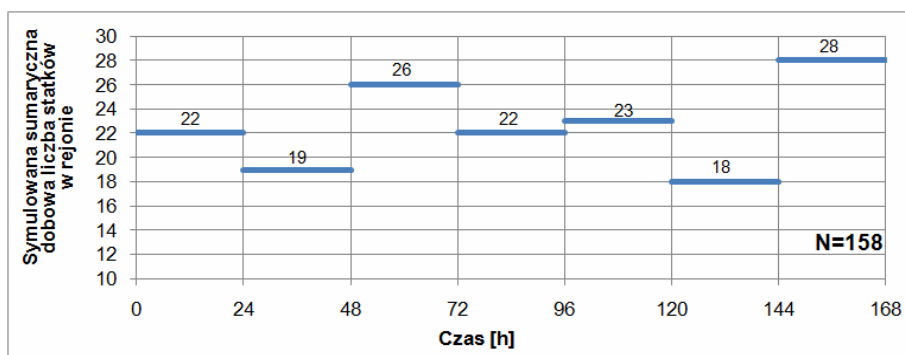


Rys. 2. Symulowana sumaryczna liczba jednostek pływających (a) oraz symulowane tygodniowe natężenie emisji NO_x [kg/tydzień] w spalinach jednostek pływających (b), przebywających w analizowanym obszarze Zatoki Gdańskiej w poszczególnych tygodniach analizowanego okresu

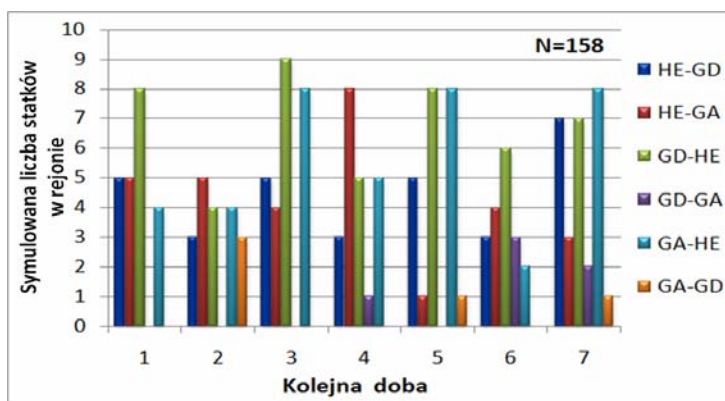
Na rysunkach 3–5 przedstawiono symulacyjne rozkłady liczby statków przebywających w badanym rejonie Zatoki Gdańskiej w pierwszych kolejnych 7 dniach (168 godzinach) analizowanego okresu (kolejnych 28 dni). Na rysunku 4 uwzględniono trasy ruchu statków w badanym obszarze, natomiast na rysunku 5 – kategorie statków.

Na podstawie wykresów oraz histogramów przedstawionych na rysunkach 2–5, można stwierdzić, że w okresie założonym do celów symulacji w ciągu jednej doby w badanym rejonie Zatoki Gdańskiej:

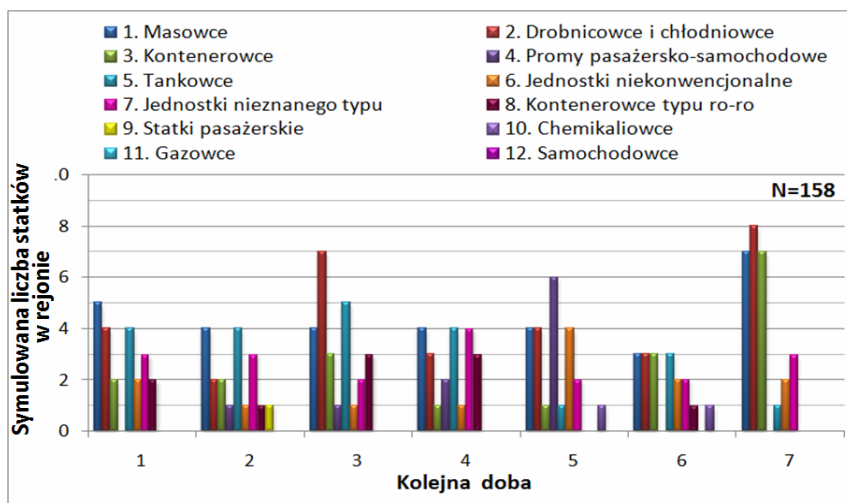
- przebywało od 19 do 28 jednostek pływających (maksymalnie 8 jednostek z jednej kategorii),
- najwięcej było masowców, drobnicowców, tankowców, kontenerowców oraz jednostek nieznanego typu,
- najmniej jednostek pływających przebywało na torach wodnych Gdańsk–Gdynia oraz Gdynia–Gdańsk.



Rys. 3. Symulowana sumaryczna liczba jednostek pływających przebywających w badanym rejonie Zatoki Gdańskiej w pierwszych kolejnych 7 dobach analizowanego okresu

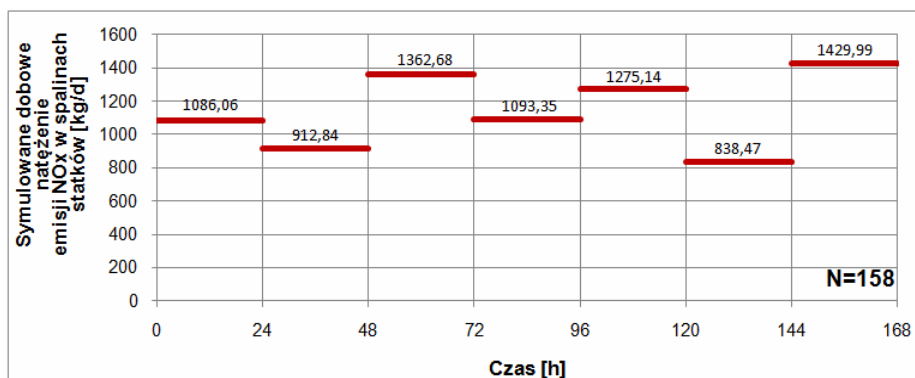


Rys. 4. Symulowana sumaryczna liczba jednostek pływających na poszczególnych torach wodnych w badanym rejonie Zatoki Gdańskiej w pierwszych kolejnych 7 dobach analizowanego okresu



Rys. 5. Symulowana sumaryczna liczba jednostek pływających poszczególnych kategorii przebywających w badanym rejonie Zatoki Gdańskiej w pierwszych kolejnych 7 dobach analizowanego okresu

Wyniki dobowego natężenia emisji [kg/d] oraz wartości skumulowanej emisji NO_x [kg] w spalinach jednostek przebywających w analizowanym rejonie Zatoki Gdańskiej przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Symulowane dobowe natężenie emisji NO_x [kg/d] w spalinach statków przebywających w badanym rejonie Zatoki Gdańskiej w pierwszych kolejnych 7 dobach analizowanego okresu

Dla pierwszych kilkunastu statków, które weszły do i wyszły z analizowanego rejonu Zatoki Gdańskiej (tab. 1, rys. 8, rys. 9) można zauważyć, że wygenerowane przez program statki były różnych kategorii, operowały różnymi prędkościami, po różnych torach żeglugowych, w różnych kierunkach. W ciągu pierwszych 15,5 h przeprowadzonej symulacji do analizowanego obszaru Zatoki Gdańskiej przez poszczególne bramki weszło 15 statków, a łączna masa wyemitowanych przez nie tlenków azotu wynosiła 695,72 kg.

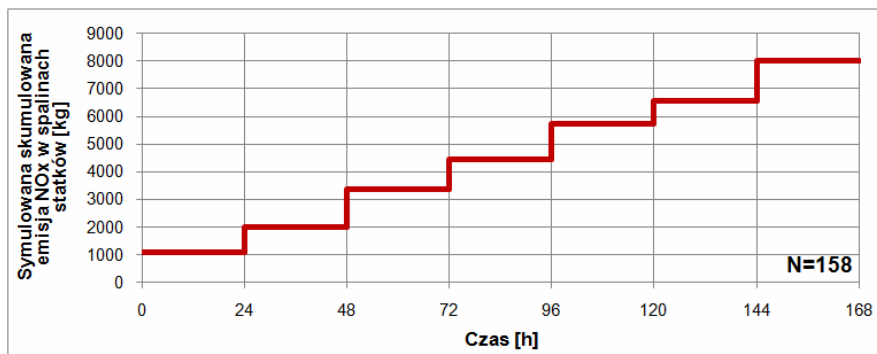
Tabela 1

Zestawienie wyników przykładowej symulacji przeprowadzonej dla próby $N = 15$ statków

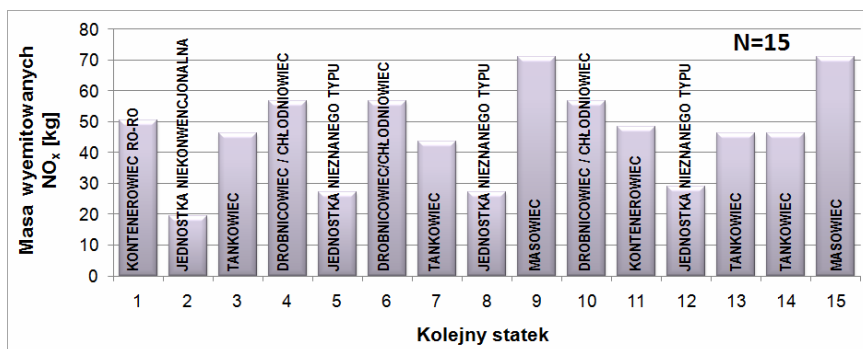
Nr próby	Trasa (*)	Długość trasy [Mm]	Kategoria statku (**)	Średnia prędkość v [węzły]	Natężenie emisji E NO_x [kg/h]	Czas na drodze między dwiema kolejnymi bramkami θ [h]	Chwila wejścia przez bramkę τ [h]	Chwila opuszczenia bramki τ^* [h]	Masa wyemitowanych NO_x μ [kg]	Sumaryczna masa wyemitowanych NO_x w rejonie Zatoki Gdańskiej M [kg]
1	HE-GD	7,72	8	13,0	85	0,5938	1,073	1,6671	50,48	50,48
2	HE-GD	7,72	6	10,0	25	0,7720	2,119	2,8907	19,30	69,78
3	GD-HE	7,72	5	15,0	90	0,5147	2,183	2,6977	46,32	116,10
4	HE-GA	7,24	2	11,5	90	0,6296	4,286	4,9151	56,66	172,76
5	GA-HE	7,24	7	8,0	30	0,9050	5,395	6,2999	27,15	199,91
6	HE-GA	7,24	2	11,5	90	0,6296	6,511	7,1404	56,66	256,57
7	HE-GA	7,24	5	15,0	90	0,4827	6,603	7,0857	43,44	300,01
8	GA-HE	7,24	7	8,0	30	0,9050	8,691	9,5962	27,15	327,16
9	GD-HE	7,72	1	12,5	115	0,6176	9,756	10,3733	71,02	398,18
10	GA-HE	7,24	2	11,5	90	0,6296	10,754	11,3836	56,66	454,84
11	HE-GA	7,24	3	12,0	80	0,6033	10,846	11,4489	48,27	503,11
12	GD-HE	7,72	7	8,0	30	0,9650	12,772	13,7367	28,95	532,06
13	GD-HE	7,72	5	15,0	90	0,5147	13,813	14,3280	46,32	578,38
14	GD-HE	7,72	5	15,0	90	0,5147	14,802	15,3164	46,32	624,70
15	GD-HE	7,72	1	12,5	115	0,6176	14,886	15,5033	71,02	695,72

(*) Trasy: HE-GD: Hel-Gdańsk; HE-GA: Hel-Gdynia, GD-HE: Gdańsk-Hel, GD-GA: Gdańsk-Gdynia, GA-HE: Gdynia-Hel, GA-GD: Gdynia-Gdańsk.

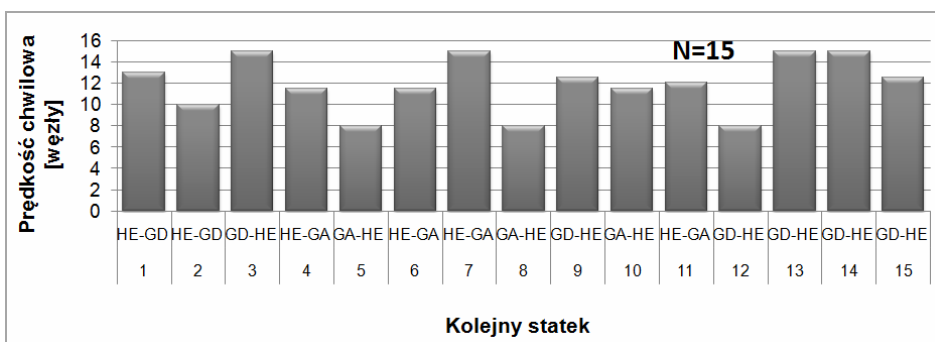
(**) Kategorie statków: 1 – masowce, 2 – drobnicowce i cichodniowce, 3 – kontenerowce, 4 – promy pasażersko-samoходowe, 5 – tankowce, 6 – jednostki niekonwencjonalne (okręty wojenne, jednostki rybackie, szkolne itp.), 7 – jednostki nieznanego typu, 8 – kontenerowce typu ro-ro, 9 – statki pasażerskie, 10 – chemikaliowce, 11 – gazowce, 12 – samoходowce.



Rys. 7. Symulowana skumulowana emisja NO_x [kg] w spalinach statków przebywających w badanym rejonie Zatoki Gdańskiej w pierwszych kolejnych 7 dobach analizowanego okresu



Rys. 8. Symulowana masa wyemitowanych NO_x [kg] w spalinach statków (z uwzględnieniem ich kategorii) na drodze pomiędzy dwoma kolejnymi bramkami



Rys. 9. Symulowana prędkość chwilowa [węzły] dla kolejnych statków wchodzących do analizowanego rejonu Zatoki Gdańskiej, z uwzględnieniem toru żeglugowego

2. METODY BADANIA WPŁYWU EMITOWANYCH W SPALINACH STATKÓW ZANIECZYSZCZEŃ NA JAKOŚĆ POWIETRZA ATMOSFERYCZNEGO

W celu przeprowadzenia analizy wpływu emitowanych w spalinach statków związków chemicznych na jakość powietrza atmosferycznego w dowolnym okresie można przykładowo rozpatrzeć sytuację, jaka miała miejsce w 11. godzinie od rozpoczęcia symulacji. Jak można zauważyć (tab. 1), w tym czasie w analizowanym rejonie Zatoki Gdańskiej znajdowały się 2 statki – statek nr 10 (drobnicowiec lub chłodniowiec), który wpłynął do badanego obszaru przez bramkę GA i poruszał się torem w kierunku Helu z prędkością 11,5 węzła, emitując $90 \text{ kgNO}_x/\text{h}$ ($25 \text{ gNO}_x/\text{s}$), oraz statek nr 11 (kontenerowiec), który wpłynął do badanego obszaru przez bramkę HE i poruszał się torem w kierunku Gdyni z prędkością 12,0 węzłów, emitując $80 \text{ kgNO}_x/\text{h}$ ($22 \text{ gNO}_x/\text{s}$). Symulując określone warunki hydrometeorologiczne i stosując odpowiedni model dyspersji zanieczyszczeń, możliwe jest wyznaczenie stężenia wybranego składnika spalin (np. NO_x) w dowolnym punkcie – w odległości kilku metrów do nawet kilkuset kilometrów od źródła emisji.

Istnieje wiele modeli opisujących zjawiska rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym – zarówno modeli fizycznych, jak i matematycznych. **Modele fizyczne** służą do modelowania przepływów mas powietrza w tunelach wiatrowych lub zbiornikach wodnych. **Matematyczne modele** natomiast można podzielić na modele empiryczne (statystyczne) oraz symulacyjne (deterministyczne). Pierwsza kategoria modeli matematycznych opiera się na analizie danych zgromadzonych w wyniku monitoringu atmosfery w danym okresie, natomiast druga – na matematycznym opisie fizycznych i chemicznych reakcji oraz procesów przebiegających w atmosferze. Równania matematyczne wyrażają prawa zachowania masy, pędu, energii, wody i substancji.

Nie jest możliwe bezpośrednio wykorzystanie istniejących, powszechnie stosowanych modeli opisujących zjawiska rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu, ponieważ większość z nich zakłada zbyt wiele uogólnień. Tak jest między innymi w przypadku **modeli gaussowskich**, np. **gaussowskich modeli smugi starej generacji**, które wprawdzie cechują się prostotą obliczeniową, ale przeznaczone są jedynie do modelowania dyspersji zanieczyszczeń emitowanych z pojedynczych źródeł, przy założeniu ciągłego i niezmiennego natężenia emisji, płaskiego terenu oraz jednorodnych warunków meteorologicznych. Ponadto, modele te nie uwzględniają stanu cisz i słabych wiatrów ani suchej i mokrej depozycji, jak również cechują się dość ograniczonym zasięgiem stosowalności (do 10–20 km) oraz niską dokładnością. Nie są więc odpowiednie do modelowania dyspersji zanieczyszczeń emitowanych w spalinach jednostek pływających.

Bardziej przydatne do tego celu wydają się być **gaussowskie modele smugi segmentowej**, które pozwalają na modelowanie dyspersji w niestacjonarnych, niejednorodnych warunkach. Jednakże ich znaczne ograniczenia (ograniczony zasięg stosowalności, nieuwzględnianie stanu cisz i słabych wiatrów ani suchej i mokrej

depozycji) przesądzają o braku ich przydatności w modelowaniu dyspersji zanieczyszczeń emitowanych w spalinach silników okrętowych. Jeszcze dokładniejsze i o większym zakresie stosowalności (do 50 km) są **gaussowskie modele smugi nowej generacji**, które opisują ciągłą zależność parametrów smugi (dyspersji, wyniesienia, asymetrii) od parametrów meteorologicznych. Modele te integrują preprocesor meteorologiczny – specjalny moduł przetwarzający dane meteorologiczne na parametry warstwy granicznej i wyznaczający pionowe profile wiatru, turbulencji i temperatury. Ponadto uwzględniają takie zjawiska, jak: częściowa penetracja smugi w warstwę inwersji nakrywającej warstwę mieszania czy asymetria konwekcyjna. Nie uwzględniają natomiast stanu cisz i słabych wiatrów ani suchej i mokrej depozycji. Zakładają wyłącznie warunki stabilne, co znacznie odbiega od warunków rzeczywistych. Co więcej, mogą być one stosowane wyłącznie do modelowania dyspersji nad obszarem o mało zróżnicowanej rzeźbie terenu. Modele te są więc przydatne do wyznaczania transportu zanieczyszczeń atmosfery z przemysłowych i energetycznych źródeł emisji zorganizowanej (punktowych, liniowych i obszarowych dla źródeł o stosunkowo niewielkich rozmiarach), najczęściej w skali lokalnej i regionalnej. Nie są natomiast przydatne do modelowania dyspersji zanieczyszczeń z silników okrętowych.

Więcej zalet, a co za tym idzie – szerszy zakres stosowalności, mają **gaussowskie modele obłoków** – podobnie jak gaussowskie modele smugi segmentowej, przystosowane są do opisu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w warunkach niestacjonarnych i niejednorodnych. Ponadto, w przeciwieństwie do gaussowskich modeli smugi, mogą być stosowane do większych skal przestrzennych (rzędu kilkuset kilometrów), uwzględniają zmienność warunków meteorologicznych w czasie ruchu zanieczyszczeń i ich zmienność przestrzenną, uwzględniają stany cisz i słabych wiatrów, jak również pochłanianie w chmurach i suchą depozycję zanieczyszczeń. Pomimo tylu zalet istotne ograniczenie tej klasy modeli w modelowaniu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń emitowanych przez silniki okrętowe stanowi założenie nieruchomego źródła emisji.

Kolejna klasa modeli – **modele lagrangeowskie** – charakteryzuje się szerszą gamą zastosowań w porównaniu z gaussowskimi modelami smugi i obłoku. Za pomocą **lagrangeowskich modeli pudełkowych** możliwe jest przeprowadzenie symulacji dyspersji zanieczyszczeń w większych skalach przestrzennych, zarówno dla wybranych receptorów, jak i dla źródeł emisji. Pozwalają na szybką ocenę wpływu parametrów wejściowych na zmianę stanu zanieczyszczenia powietrza. Idealne są też do przeprowadzania obliczeń zanieczyszczeń fotochemicznie reaktywnych. Ograniczenia tych modeli związane są z brakiem bezpośredniej możliwości opisu zmienności przestrzennej stężeń oraz niekiedy z ich niską dokładnością, która w dużej mierze zależy od poprawnego określenia warunków meteorologicznych (kierunku i prędkości wiatru, wysokości warstwy mieszania) oraz od niewielkiego zróżnicowania przestrzennego pola emisji.

Za jeszcze bardziej dokładne w opisie dyspersji zanieczyszczeń uważa się **lagrangeowskie modele ruchu pseudocząstek**. Doskonale sprawdzają się w wielu skalach przestrzennych (zakres stosowalności wynosi od kilkudziesięciu metrów do ponad 100 km), w każdych warunkach atmosferycznych i w terenie zróżnicowanym.

wanym pod względem topograficznym. Uwzględniają depozycję domieszek gazowych, sedymentację i depozycję pyłów, jak również liniowe reakcje chemiczne. Wady modelu wynikają głównie z wysokich kosztów komputerowych, jak również z konieczności generowania ze źródeł dużej liczby cząstek w przypadku, gdy przy obliczaniu stężeń korzysta się z metody, w której stosuje się wyróżnioną objętość powietrza.

Następna klasa modeli to **modele eulerowskie**. W modelach eulerowskich układ współrzędnych przyjmowany jest za nieruchomy, podczas gdy w modelach lagrangeowskich dyspersja zanieczyszczeń jest opisywana za pomocą układu współrzędnych przemieszczającego się wraz z masami powietrza. **Eulerowskie modele pudełkowe** charakteryzują się łatwym dostępem do danych meteorologicznych i danych o emisji, możliwością opisaną suchej i mokrej depozycji, jak również stosunkowo niskimi kosztami komputerowymi. Przy rozpatrywaniu ograniczeń tego typu modeli należy zwrócić uwagę na wprowadzane założenia, jak np. natychmiastowe rozcieńczenie zanieczyszczenia w całej objętości pudełka czy zaniedbanie dyfuzji. Najbardziej złożonymi i uniwersalnymi, a jednocześnie najbardziej skomplikowanymi, są **siatkowe modele euleurowskie**, za pomocą których można uwzględniać dowolne kombinacje źródeł emisji oraz dowolne pola wiatru i turbulencji. W ich skład wchodzi moduł fotochemiczny (opisujący do kilkuset reakcji pomiędzy kilkudziesięcioma substancjami) oraz pełen model meteorologiczny. Umożliwiają również przeprowadzanie symulacji kompleksowych reakcji chemicznych we wszystkich fazach (gazowej, ciekłej i stałej). Stosowane są jako modele skali narodowej, ale również jako modele zagnieżdżone nad obszarami aglomeracji miejskich.

Jak można zauważyć, pewne grupy modeli można od razu wykluczyć z dalszej analizy z powodu ich istotnych ograniczeń. Jednym z takich ograniczeń jest skala przestrzenna – modele do zastosowań w mikroskali oraz makroskali nie są odpowiednie. Do badania rozprzestrzeniania się emitowanych w spalinach statków zanieczyszczeń w rejonie Zatoki Gdańskiej przydatne są jedynie modele, które można wykorzystać w mezoskali (czyli skali, w której typowe odległości mieszczą się w przedziale od 1 km do 1000 km). Skala taka została wybrana z dwóch powodów: po pierwsze dlatego, że typowe liniowe odległości na zadanym obszarze badawczym (Zatoka Gdańska) nie przekraczają 50 km, a po drugie dlatego, że w związku z istnieniem zjawiska rozrzedzenia smugi emitowanych zanieczyszczeń przez porywanie cząsteczek przez powietrze (tło) szacuje się, że chemiczny czas trwania (życia) smugi pojedynczego statku (czyli czas, po jakim różnice pomiędzy smugą a tłem są zmniejszone do 5% lub poniżej) wynosi 2 dni [6]. A zatem, biorąc powyższe pod uwagę, można stwierdzić, że typowe liniowe odległości na obszarze badań wyniosą poniżej 1000 km (należy wziąć pod uwagę długość drogi smugi/obłoku zanieczyszczeń oraz drogi przemieszczającego się źródła emisji – statku). Kolejne ograniczenie, powodujące eliminację modelu z dalszego rozważania i uważanie go za nieprzydatny w modelowaniu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w spalinach silników okrętowych, stanowi brak pewnych możliwości technicznych niezbędnych do prawidłowego modelowania dyspersji, np. założenia wyłącznie ciągłej i niezmiennej emisji, nieuwzględnianie zmiennych warunków

meteorologicznych, stanów cisz i słabych wiatrów, przemian fotochemicznych, suchej i mokrej depozycji, jak również przemieszczania się (mobilności) źródła emisji.

Z powyższej analizy wynika, że nieprzydatne w modelowaniu dyspersji zanieczyszczeń emitowanych w spalinach jednostek pływających są gaussowskie modele smugi z powodu niewielkiej skali przestrzennej ich zastosowania (do około 50 km), a także zbyt dużych, wyżej opisanych, uogólnień wynikających z założeń tych modeli. Eliminacji ulegają również lagrangeowskie modele pseudocząstek oraz siatkowe modele eulerowskie z powodu zbyt wysokiego stopnia ich złożoności oraz wymagań dotyczących ilości i jakości danych wejściowych. Warte głębszej analizy i badań pod kątem ich przydatności do modelowania dyspersji zanieczyszczeń emitowanych przez silniki okrętowe są natomiast trzy klasy modeli: gaussowskie modele obłoku, lagrangeowskie modele pudełkowe oraz eulerowskie modele jedno- lub wielopudełkowe. Wszystkie one pozwalają na modelowanie w większych skalach przestrzennych, przy różnych warunkach atmosferycznych i w terenie o zróżnicowanej topografii. Niewątpliwą zaletą tych modeli stanowi możliwość uwzględniania łańcuchów przemian chemicznych, a także opisanie suchej i mokrej depozycji, gdyż mają one moduły fotochemiczne i meteorologiczne. Jednakże modele te nie są wolne od dość istotnego ograniczenia – nie mają możliwości modelowania dyspersji w przypadku ruchomego źródła emisji, jakim jest jednostka pływająca. To właśnie ograniczenie powoduje konieczność podjęcia próby opracowania modelu uwzględniającego mobilność źródła emisji. Pozostałe parametry, które musiałby spełniać opracowany model, to: uwzględnianie niestacjonarnych, czyli zmiennych w czasie, warunków (niejednorodnych warunków meteorologicznych, zmian natężenia emisji, również w zależności od parametrów pracy silnika), uwzględnianie reakcji wtórnych, suchej i mokrej depozycji, a także możliwość wizualizacji wyników za pomocą interfejsu graficznego.

ZAKOŃCZENIE

Prowadzone od kilkunastu lat w różnych ośrodkach naukowych na całym świecie badania wpływu emisji spalin morskich silników okrętowych na klimat, chemizm atmosfery oraz jakość powietrza atmosferycznego (np. [1–7]) nabierają coraz większego znaczenia, zwłaszcza w świetle obserwowanego w skali globalnej zwiększającego się natężenia ruchu statków oraz coraz większej ilości przewożonych drogą morską ładunków. Przekłada się to na coraz większy udział transportu morskiego w globalnym zużyciu paliwa oraz w antropogenicznej emisji związków szkodliwych do atmosfery.

Kwestie emisji szkodliwych składników spalin statków oraz ich rozprzestrzeniania się i transportu w atmosferze niosą istotne wyzwania ekonomiczne, ekologiczne, technologiczne oraz zdrowotne w szerokiej skali – od lokalnej po globalną. Jednakże badania i modelowanie tych zjawisk powinny być prowadzone komplek-

sowo – analizowane powinny być nie tylko wskaźniki emisji związków szkodliwych w spalinach statków, ale również zjawiska rozprzestrzeniania się smugi zanieczyszczeń, z uwzględnieniem zachodzących procesów fizykochemicznych i przemian fotochemicznych oraz warunków meteorologicznych.

Przeprowadzona w niniejszej pracy analiza pozwoliła uzyskać przybliżony obraz natężenia ruchu statków operujących w wybranym rejonie Zatoki Gdańskiej w dowolnym czasie (w ciągu jednego miesiąca, jednego tygodnia czy kilkunastu godzin) oraz charakterystyki wskaźników emisji związków szkodliwych w ich spalinach. W analogiczny sposób można uzyskać taki obraz natężenia ruchu jednostek pływających i charakterystykę emisji szkodliwych składników ich spalin dla dowolnego okresu, w dowolnym rejonie Zatoki Gdańskiej, a po pewnych modyfikacjach modelu również w portach, co może być szczególnie istotne do oceny zanieczyszczenia powietrza przez spaliny silników okrętowych w rejonach aglomeracji miejskich.

LITERATURA

1. Capaldo K., Corbett J.J., Kasibhatla P., Fischbeck P., Pandis S. N., *Effects of ship emissions on sulphur cycling and radiative climate forcing over the ocean*, Nature 1999, vol. 400, s. 743–746.
2. Corbett J.J., Fishbeck P.S., Pandis S.N., *Global nitrogen and sulphur inventories for oceangoing ships*, J. Geophys. Res., 1999, 104, s. 3457–3470.
3. Corbett J.J., Winebrake J.J., Green E.H., Kasibhatla P. i inni, *Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment*, Env. Sci. Tech., 2007, 41, s. 8512.
4. Davis D.D., Grodzinsky G., Kasibhatla P., Crawford J. i inni, *Impact of Ship Emissions on Marine Boundary Layer NOx and SO2 Distributions over the Pacific Basin*, Geophys. Res. Lett., 2001, 28, s. 235–238.
5. Endresen Ø., Sørgård E., Sundet J.K., Dalsøren S.B., i inni, *Emission from international sea transportation and environmental impact*, J. Geophys. Res., 2003, 108(D17), s. 4560.
6. Glasow R., Lawrence M.G., Sander R., Crutzen P.J., *Modeling the chemical effects of ship exhaust in the cloud-free marine boundary layer*, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 2002, 2, s. 525–575.
7. Jalkanen J.P., Brink A., Kalli J., Pettersson H. i inni, *A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area*, Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, Dec., no. 9, s. 9209–9223.
8. Pawlak M., Piaseczny L., *A model of marine vessels movement to estimate harmful compounds in the vessels exhausts*, Journal of Polish CIMAC, 2009, vol. 4, no. 2, s. 235–244.
9. Pawlak M., Piaseczny L., *Mathematical models of the vessels movement for determination of toxic compounds emission*, Polish Journal of Environmental Studies, 2009, vol. 18, no. 2A, s. 187–194.
10. Pawlak M., Piaseczny L., *Mezoskalowe modele ruchu statków morskich dla szacowania emisji spalin*, Logistyka, 2010, nr 4.

MODELLING EMISSION OF TOXIC COMPOUNDS OF MARINE ENGINES EXHAUSTS TO ESTIMATE THE IMPACT OF EMITTED POLLUTANTS ON AIR QUALITY

Summary

The paper presents possibilities of application of the formulated simulation model of emission of toxic compounds in marine engines exhausts to estimate the impact of these pollutants on air quality. The simulation model is based on Monte Carlo methods. Moreover, the author analyses the options of applying existing models of pollutants dispersion in the atmosphere, indicates their significant limitations and the necessity of formulating a sophisticated model of dispersion of pollutants emitted in ships exhausts.