

Symulacyjne metody określania warunków bezpiecznej eksploatacji statków na portowych drogach wodnych

Prof. dr hab. inż. kpt. ż.w. Stanisław Gucma, dr hab. inż. st. of. Maciej Gucma, dr inż. Marcin Przywarty
Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny

Morskie drogi wodne mają ograniczenia ruchu statków z nich korzystających. Ograniczenia te nazywane są warunkami bezpiecznej eksploatacji statków na danej drodze wodnej. Dotyczy to również systemu portowych dróg wodnych, takich jak: kotwiczowisko, podejściowy tor wodny, wejście do portu, wewnętrzny tor wodny, obrotnica i basen portowy z podejściami do nabrzeży.

Warunki bezpiecznej eksploatacji statków na portowych drogach wodnych definiują:

- parametry „maksymalnych statków” określonego rodzaju, które mogą bezpiecznie manewrować na danej drodze wodnej,
- dopuszczalne warunki hydrometeorologiczne, w których może bezpiecznie manewrować „maksymalny statek” określonego typu na danej drodze wodnej,

- minimalna asysta holownicza, przy której może bezpiecznie manewrować „maksymalny statek” określonego typu na danej drodze wodnej.

Budowa i eksploatacja portowych dróg wodnych generuje dwa podstawowe problemy badawcze [7, 12, 13]:

1. Określenie warunków bezpiecznej eksploatacji statków na istniejącej portowej drodze wodnej.
2. Określenie parametrów systemu portowych dróg wodnych dla założonych bezpiecznych warunków eksploatacji statków.

Artykuł dotyczy pierwszego problemu i przedstawia symulacyjne metody określania warunków bezpiecznej eksploatacji statków na portowych drogach wodnych.

W trakcie eksploatacji portowych dróg wodnych często stawianymi zadaniami są:

- określenie warunków bezpiecznej eksploatacji nowo wprowadzanych typów statków na daną drogę wodną,
- zwiększenie maksymalnych parametrów statków eksploatowanych na danej drodze wodnej,
- zmiana dopuszczalnych warunków hydrometeorologicznych lub minimalnej asysty holowniczej dla statków eksploatowanych na danej drodze wodnej.

Zadania te dotyczą opracowania przepisów z zakresu nawigacji pilotażowej w badanym systemie dróg wodnych.

W artykule przedstawiono symulacyjne metod określania warunków bezpiecznej eksploatacji statków zastosowane przy rozwiązywaniu powyższych zadań. Przedstawione przykłady zastosowania tych metod dotyczą szczegółowych rozwiązań określania warunków bezpiecznej eksploatacji statków na drogach wodnych portów Szczecina i Świnoujścia. Należy przy tym zaznaczyć, że długość podejściowego toru wodnego do portu Świnoujście wynosi 43 km, a długość toru łączącego te porty to 67 km. Do tego zespołu portowego mogą obecnie wchodzić statki o długości do 320 m (gazowiec LNG typu Q-Flex do gazoportu w Świnoujściu), a planowane jest zwiększenie maksymalnej długości eksploatowanych statków do 400 m (kontenerowiec do projektowanego terminalu kontenerowego).

WARUNKI BEZPIECZNEJ EKSPLOATACJI STATKU NA PORTOWYCH DROGACH WODNYCH

Wzajemne zależności pomiędzy parametrami systemu morskich dróg wodnych składającego się z podsystemu akwenu i podsystemu nawigacyjnego a warunkami bezpiecznej eksploatacji statków w tym systemie pozwalają na zdefiniowanie wektora stanu tych warunków. Wektor stanu warunków bezpiecznej eksploatacji statków jest funkcją parametrów systemu drogi wodnej [9].

$$W_i = F \begin{bmatrix} A_i \\ N_i \end{bmatrix}$$

gdzie:

W_i – warunki bezpiecznej eksploatacji statku (na i -tym odcinku drogi wodnej),
 A_i – podsystem akwenu (i -tego odcinka drogi wodnej),
 N_i – podsystem nawigacyjny (i -tego odcinka drogi wodnej).

Warunki bezpiecznej eksploatacji statków na drodze wodnej opisuje zbiór warunków eksploatacji, w których „statek maksy-

malny” może wykonać bezpieczny manewr na i -tym odcinku badanej drogi wodnej, który zapisuje się w postaci [2]:

$$W_i = [t_{yp}, L_c, B, T, F, M, M_{st}, V_i, n_{hi}, U_{hi}, H_i]$$

gdzie:

t_{yp} – typ statku,
 L_c – długość całkowita statku,
 B – szerokość statku,
 T – zanurzenie statku,
 F – boczna powierzchnia nawiewu statku,
 M – moc napędu głównego statku,
 M_{st} – moc dziobowych sterów strumieniowych,
 V_i – dopuszczalna prędkość statku (na i -tym odcinku drogi wodnej),
 n_{hi} – liczba holowników biorących udział w cumowaniu statku (na i -tym odcinku),
 U_{hi} – sumaryczny uciąg holowników biorących udział w cumowaniu (na i -tym odcinku),
 H_i – zbiór warunków hydrometeorologicznych dopuszczalnych dla manewru cumowania statku do danego nabrzeża i manewrowania na i -tym odcinku drogi wodnej.

Warunki bezpiecznej eksploatacji można pogrupować na:

- warunki związane ze statkiem i jego ruchem definiowane zbiorem:

$$S_i = [L_c, B, T, F, M, M_{st}, V_i]$$

- warunki związane z asystą holowników definiowane zbiorem:

$$h_i = [n_{hi}, U_{hi}]$$

- dopuszczalne warunki hydrometeorologiczne definiowane zbiorem:

$$H_i = [d/n, \Delta h_i, V_{wi}, KR_{wi}, V_{pi}, KR_{pi}, h_{fi}, KR_{fi}]$$

gdzie:

d/n – dopuszczalna pora doby (dzień lub bez ograniczeń),
 Δh_i – dopuszczalne obniżenie poziomu zwierciadła wody (na i -tym odcinku),
 V_{wi} – dopuszczalna prędkość wiatru (na i -tym odcinku),
 KR_{wi} – ograniczenia kierunku wiatru (jeśli występują),
 V_{pi} – dopuszczalna prędkość prądu (na i -tym odcinku),
 KR_{pi} – ograniczenia kierunku prądu (jeśli występują),
 h_{fi} – dopuszczalna wysokość fali (na i -tym odcinku),
 KR_{fi} – ograniczenia kierunku nabiegu fali (jeśli występują).

Biorąc powyższe pod uwagę, można zapisać:

$$W_i = [S_i, h_i, H_i]$$

czyli:

$$[S_i, h_i, H_i] = F \begin{bmatrix} A_i \\ N_i \end{bmatrix}$$

Wynika z tego, że symulacyjne metody określania warunków bezpiecznej eksploatacji statków w systemie dróg wodnych można sprowadzić do:

- określania parametrów „maksymalnego statku”, który może bezpiecznie manewrować na danej drodze wodnej w zadanych warunkach hydrometeorologicznych,
- określenie minimalnej asysty holowniczej bezpiecznej do wykonania manewru przez badany statek na danej drodze wodnej w zadanych warunkach hydrometeorologicznych,
- określenie warunków hydrometeorologicznych dopuszczalnych do wykonania manewru przez badany statek na danej drodze wodnej.

SYMULACYJNE METODY OKREŚLANIA WARUNKÓW BEZPIECZNEJ EKSPLOATACJI STATKÓW NA PORTOWYCH DROGACH WODNYCH

Opracowane metody symulacji komputerowej zastosowano przy realizacji następujących szczegółowych zadań dotyczących określenia bezpiecznych warunków eksploatacji statków na portowych drogach wodnych.

1. Określenie typu i parametrów „maksymalnych statków” przechodzących torem wodnym Świnoujście – Szczecin.
2. Określenie dopuszczalnych warunków hydrometeorologicznych dla wchodzącego gazowca LNG do gazoportu w Świnoujściu.
3. Określenie warunków bezpiecznej eksploatacji „maksymalnych masowców” wchodzących do portu w Świnoujściu.
4. Określenie minimalnej asysty holowniczej gazowców LNG typu Q-Flex przechodzących podejściowym torem wodnym do Świnoujścia.
5. Określenie dopuszczalnych warunków hydrometeorologicznych „maksymalnego promu” podchodzącego do stanowiska Nr 1 Terminalu Promowego w Świnoujściu.

Przy realizacji powyższych zadań do określenia bezpiecznych obszarów manewrowych w zadanych warunkach hydrometeorologicznych na określonym akwenie zastosowano metody symulacji komputerowej.

Bezpieczne obszary manewrowe określone były na różnych poziomach ufności (najczęściej 0,95). W badaniach wykorzystano metodę symulacji ruchu w czasie rzeczywistym (RTS), stosując modele nieautonomiczne, w których ruchem statku kieruje człowiek (pilot lub kapitan). Badania symulacyjne przepro-

wadzono na wielomostkowym symulatorze manewrowym typu FMBS firmy Kongsberg Maritime AS z wizualizacją typu 3D [8].

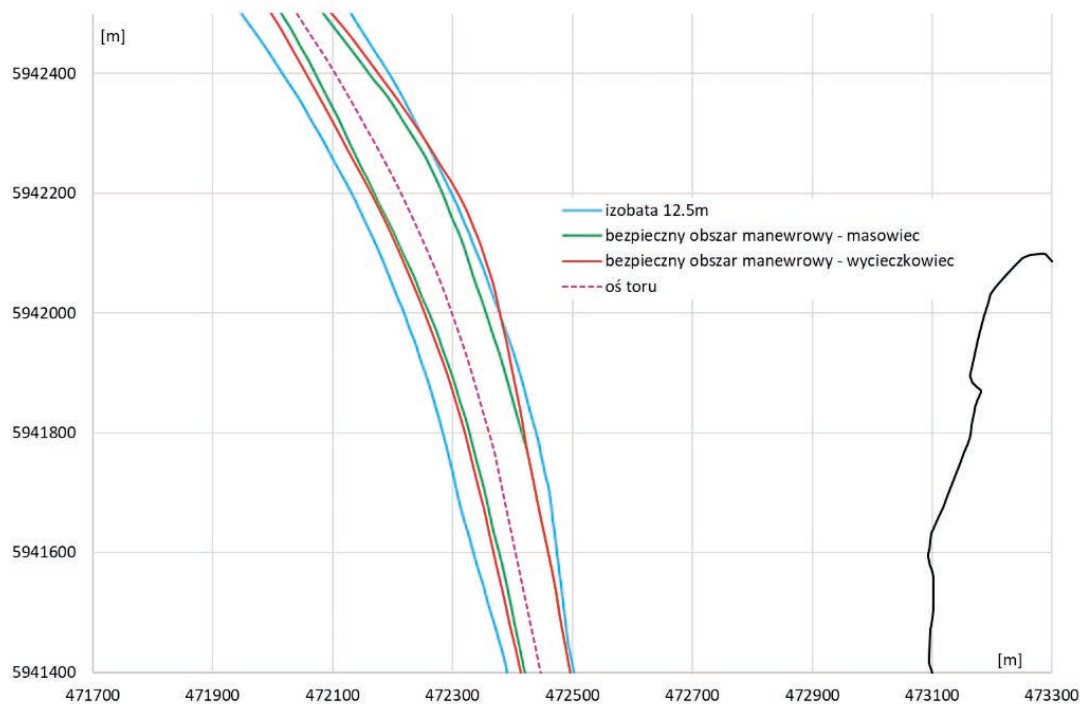
Eksperymenty symulacyjne przeprowadzono według następującej procedury [6]:

- Budowa symulacyjnego modelu akwenu (tor wodny, wejście do portu, obrotnica, basen portowy z nabrzeżami).
- Budowa i weryfikacja modeli ruchu odpowiednich „statków maksymalnych” i asystujących holowników.
- Projekt układu eksperymentalnego określający minimalną liczebność (minimum 10), warunki hydrometeorologiczne i taktykę manewrowania w serii.
- Analiza wyników badań symulacyjnych polegająca na określaniu bezpiecznych obszarów manewrowych dla odpowiednich serii na określonym poziomie ufności i porównanie ich przy wykorzystaniu parametrycznych testów zgodności.

Parametry maksymalnych statków badanych typów, które mogą bezpiecznie przechodzić modernizowanym torem wodnym Świnoujście – Szczecin określono, wykorzystując metody symulacji komputerowej. Badano trzy typy statków w dopuszczalnych warunkach hydrometeorologicznych. Są to:

- wycieczkowiec $L_c = 260$ m, $B = 33$ m, $T = 9,0$ m,
- kontenerowiec $L_c = 210$ m, $B = 30$ m, $T = 11,0$ m,
- masowiec $L_c = 195$ m, $B = 29$ m, $T = 11,0$ m.

Bezpieczne obszary manewrowe wycieczkowca i masowca na Zakręcie Mańków (41,0-43,0 km toru wodnego Świnoujście – Szczecin) przedstawiono na rys. 1. Analiza wyników eksperymentu symulacyjnego pozwala na wysunięcie następujących wniosków [1, 4, 10]:



Rys. 1. Bezpieczne obszary manewrowe wycieczkowca $L_c = 260$ m i masowca $L_c = 195$ m na Zakręcie Mańków toru wodnego Świnoujście – Szczecin ($V_w = 10$ m/s)

- wycieczkowiec $L_c = 260$ m nie spełnia warunków bezpieczeństwa przejścia torem wodnym na Zakręcie Mańków przy założonych dopuszczalnych warunkach hydrometeorologicznych ($V_w = 10$ m/s W);
- masowiec $L_c = 195$ m spełnia warunki bezpieczeństwa manewrowania na Zakręcie Mańków;
- kontenerowiec $L_c = 210$ m spełnia z zapasem warunki bezpieczeństwa manewrowania i analizowane było zwiększenie jego maksymalnych parametrów do $L_c = 240$ m.

Dopuszczalne warunki hydrometeorologiczne bezpieczne dla wchodzącego gazowca LNG o pojemności 138 000 m³ do gazoportu w Świnoujściu określono, wykorzystując metody symulacji komputerowej. Badano wejście gazowca do gazoportu, obracanie i cumowanie do stanowiska rozładunkowego w ekstremalnych warunkach hydrometeorologicznych – prędkość wiatru 12,5 m/s.

Bezpieczne obszary manewrowe wejścia, obracania i podejścia do stanowiska rozładunkowego dla wiatru NW 12,5 m/s i NE 12,5 m/s przedstawiono na rys. 2. Analiza wyników eksperymentu symulacyjnego pozwala na stwierdzenie [11]:

- gazowiec LNG 138 000 m³ może bezpiecznie wchodzić i manewrować w Porcie Zewnętrznym Świnoujście przy prędkości wiatru do 12,5 m/s;
- bezpieczny obszar manewrowy wejścia do portu dla wiatru NE 12,5 m/s jest większy od takiego obszaru dla wiatru NW 12,5 m/s; dotyczy to manewrowania w asyście 4 holowników (2 o uciagu 45 ton i 2 o uciagu 30 ton).

Warunki bezpiecznej eksploatacji „maksymalnych masowców” wchodzących do Portu Handlowego w Świnoujściu usta-

lono, wykorzystując metody symulacji komputerowej. Badano wejście i cumowanie załadowanego masowca $L_c = 300$ m, $B = 48$ m, $T = 13,5$ m oraz obracanie masowca pod balastem ($T_D = 6,0$ m; $T_R = 9,0$ m). Parametry bezpiecznych obszarów manewrowych obracającego się masowca w różnych warunkach hydrometeorologicznych

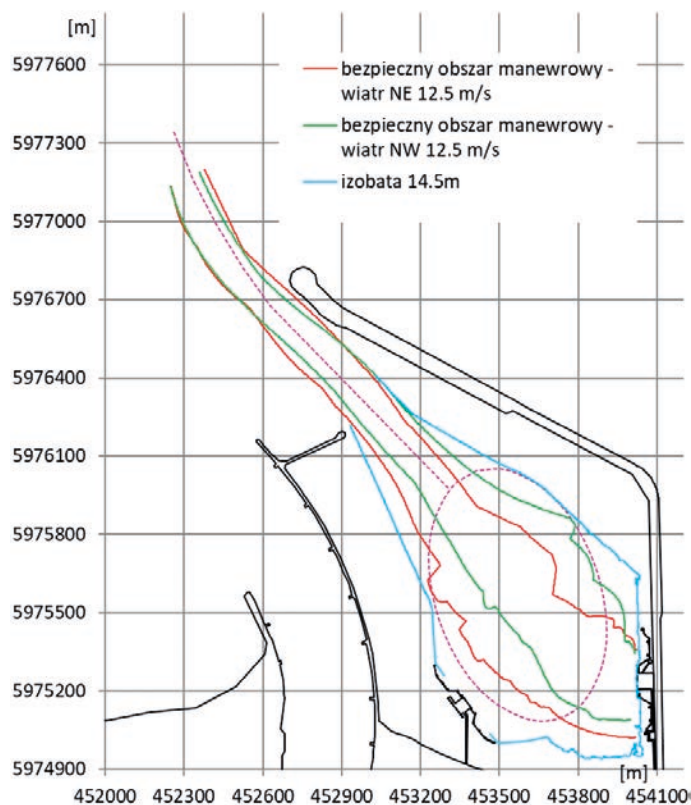
- wiatr S 10 m/s i prąd 0,6 w wyjściowy
- wiatr N 10 m/s i prąd 0,8 w wejściowy

przedstawiono na rys. 3 [3].

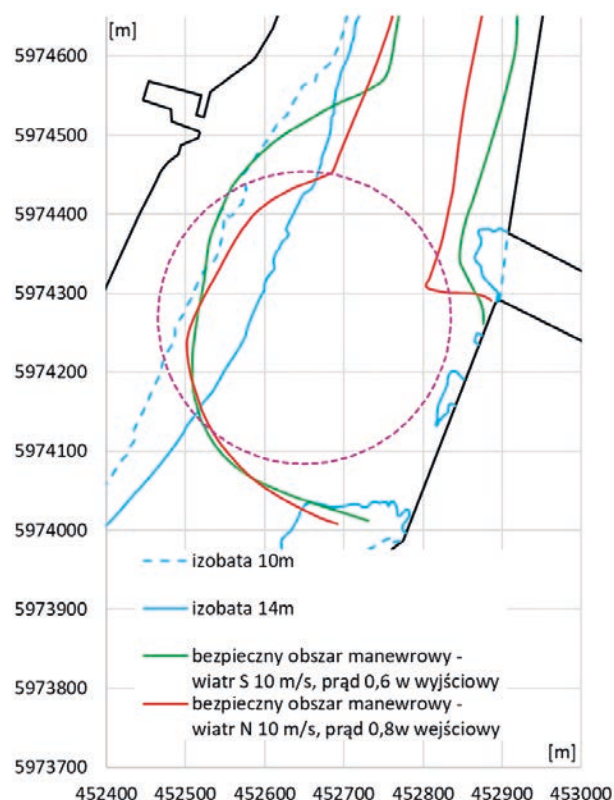
Analiza wyników eksperymentu symulacyjnego pozwala na stwierdzenie, że:

- istniejące głębokości w porcie Świnoujście umożliwiają bezpieczne obracanie „maksymalnego masowca” ($L_c = 300$ m) pod balastem przy wiatrach o prędkości do 10 m/s i prądach o prędkości do 0,8 węzła (przy małej korekcie izobaty 10 m); obrót masowców musi być wykonywany przez prawą burtę;
- należy wytyczyć nowe granice Obrotnicy Północnej w Świnoujściu (zachodnia granica obrotnicy może przebiegać po izobacie 10 m).

Minimalną asystę holowniczą gazowca LNG typu Q-Flex na torze podejściowym do Świnoujścia określono na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych. Eksperyment symulacyjny przeprowadzono w przypadku sytuacji awaryjnej gazowca – zacięcie steru 5° na burtę przeciwną do kierunku wiatru przy najmniej korzystnych warunkach hydrometeorologicznych: wiatr 10 m/s prostopadły do osi toru, prąd z rufy o prędkości 0,5 węzła, fala o wysokości 1,2 m.



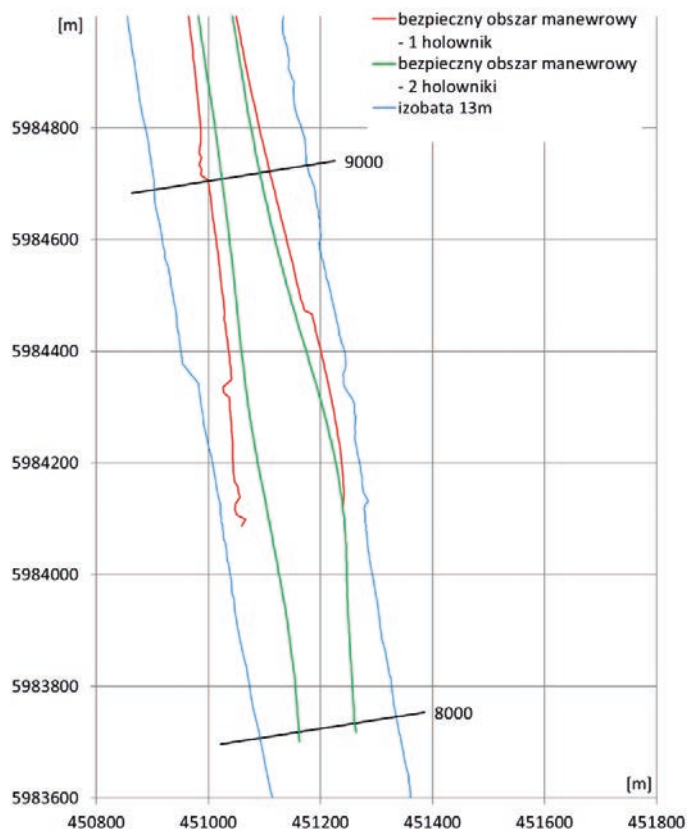
Rys. 2. Bezpieczne obszary manewrowe wejścia do gazoportu w Świnoujściu gazowca LNG 138 000 m³ w różnych warunkach hydrometeorologicznych



Rys. 3. Bezpieczne obszary manewrowe obracania masowca $L_c = 300$ m pod balastem w Porcie Świnoujście w różnych warunkach hydrometeorologicznych

Badano dwa warianty manewrów [11]:

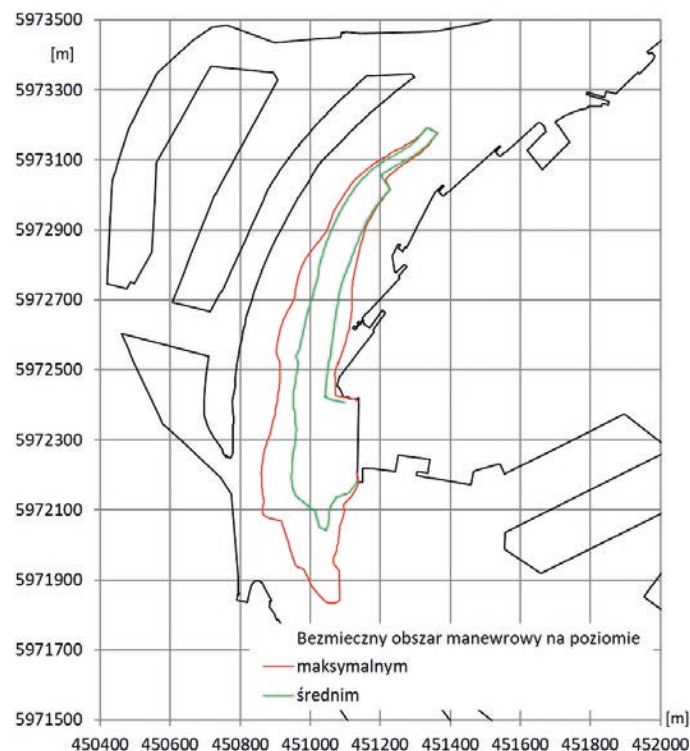
- asysta 2 holowników o uciągach 55 ton na holach,
- asysta 1 holownika o uciągu 55 ton hol rufowy,
- pierwszy wariant (dotyczy istniejących przepisów portowych) polega na kontynuacji manewru wejścia z awarią steru w asyście dwóch holowników na holach,
- drugi wariant (dotyczy zmiany przepisów portowych) polega na zatrzymaniu gazowca z awarią steru i rzuceniu kotwicy z holownikiem na holu rufowym.



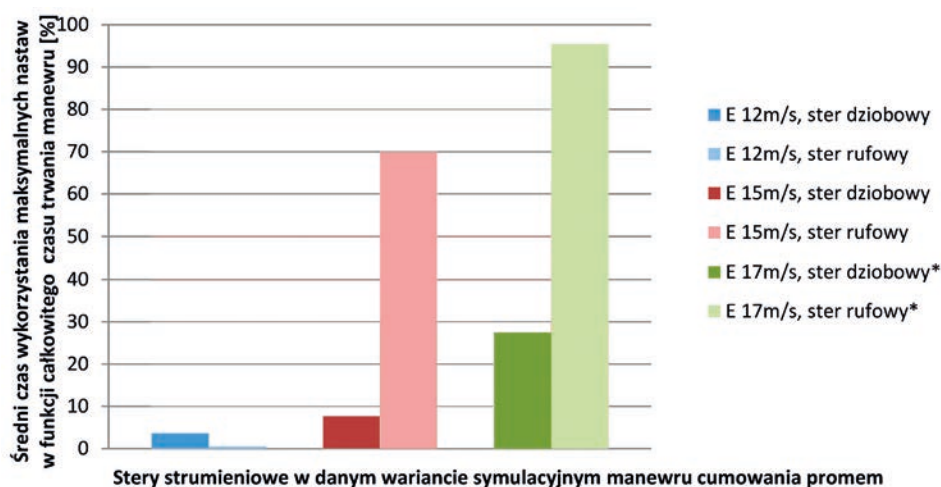
Rys. 4. Awaria steru (zacięcie 5° na PB) gazowca LNG typu Q-Flex na podejściowym torze wodnym do Świnoujścia wchodzącego w asyście dwóch i jednego holowników. Wiatr E 10 m/s; prąd S 0,5 węzła; fala 1,2 m

Analiza bezpiecznych obszarów manewrowych obu awaryjnych manewrów wykazała, że bezpieczeństwo tego manewru zapewnia już 1 holownik (rys. 4) i zmiana przepisów portowych jest zasadna. Obecne przepisy portowe wymagające na podejściowym torze wodnym do Świnoujścia (ostatnie 10 km) asysty 2 holowników są zbyt asekuracyjne.

Dopuszczalne warunki hydrometeorologiczne cumowania projektowanego „maksymalnego promu” $L_c = 228$ m do stanowiska Nr 1 Terminalu Promowego w Świnoujściu określono na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych. Eksperyment symulacyjny przeprowadzono dla manewrów cumowania projektowanego promu $L_c = 228$ m do stanowiska Nr 1 przy następujących warunkach hydrometeorologicznych [5]:



Rys. 5. Bezpieczny obszar manewrowy podejścia i cumowania promu $L_c = 228$ m do stanowiska Nr 1 Terminalu Promowego w Świnoujściu. Wiatr E 15 m/s; prąd wejściowy 1,5 węzła



Rys. 6. Wykorzystanie sterów strumieniowych promu $L_c = 228$ m podchodzącego do stanowiska Nr 1 Terminalu Promowego w Świnoujściu przy różnych prędkościach wiatru

- wiatr E 12 m/s (odpychający), prąd wejściowy 1,5 węzła,
- wiatr E 15 m/s, prąd wejściowy 1,5 węzła,
- wiatr E 17 m/s, prąd wejściowy 15 węzła.

Analiza wyników wykazała, że maksymalną bezpieczną prędkością wiatru odpychającego jest E 15 m/s (rys. 5). Przy prędkości wiatru E 17 m/s przycumowanie promu jest praktycznie niemożliwe i kończy się uderzeniem w zachodni brzeg. Dodatkowo, na rys. 6 przedstawiono wykorzystanie sterów strumieniowych promu przy tych manewrach.

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono symulacyjne metody zastosowane do określenia warunków bezpiecznej eksploatacji statków na portowych drogach wodnych. Opracowane metody symulacji komputerowej posłużyły do określenia bezpiecznych obszarów manewrowych badanych „statków maksymalnych” manewrujących w zadanych warunkach hydrometeorologicznych na określonym akwenie portowej drogi wodnej. Metody te zastosowano przy realizacji następujących szczegółowych rozwiązań dotyczących określania bezpiecznych warunków eksploatacji statków na portowych drogach wodnych.

1. Określenie typu i parametrów „maksymalnych statków” przechodzących torem wodnym Świnoujście – Szczecin.
2. Określenie dopuszczalnych warunków hydrometeorologicznych dla wchodzącego gazowca LNG do gazoportu w Świnoujściu.
3. Określenie warunków bezpiecznej eksploatacji „maksymalnych masowców” wchodzących do portu w Świnoujściu.
4. Określenie minimalnej asysty holowniczej gazowców LNG typu Q-Flex przechodzących podejściowym torem wodnym do Świnoujścia.
5. Określenie dopuszczalnych warunków hydrometeorologicznych „maksymalnego promu” podchodzącego do stanowiska Nr 1 Terminalu Promowego w Świnoujściu.

LITERATURA

1. Artyszek J., Gralak R., Gucma M., Gucma S., Ślaczka W., Zalewski P.: Optimization of waterway bend widths using computer simulation methods of ship movement. (Optymalizacja szerokości zakoli dróg wodnych metodami symulacji komputerowej ruchu statków). Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Nr 46(118)2016, 115-121, ISSN 1733-8670, Szczecin.
2. Gucma S.: Conditions of safe ship operation in sea waterway systems. Scientific Journals Maritime University of Szczecin, No 36(108)2013, z. 1, 55-58, ISSN 1733-8670,.
3. Gucma S.: Optimization of Świnoujście port areas and approach channel parameters for safe operation of 300-metre bulk carriers. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Nr 48(120)2016, 125-133, ISSN 1733-8670.
4. Gucma S.: Parameter optimization of sea waterway system dredged to the specified depth case of the modernized Świnoujście – Szczecin fairway. (Optymalizacja parametrów systemu morskich dróg wodnych pogłębionych do zadanej głębokości na przykładzie przebudowy toru wodnego Świnoujście – Szczecin). Archives of Transport, No 4/2016, Vol. 40, 29-38, ISSN 0866-9546. Warszawa 2016.
5. Gucma S., Artyszek J., Gralak R., Kowalski A.: A simulation method to determine the safe operating conditions for designed sea-going ferries. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Nr 53(125)2018, 114-122, ISSN 1733-8670, Szczecin.
6. Gucma S., Gucma L., Zalewski P.: Symulacyjne metody badań w inżynierii ruchu morskiego. Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, 2008.
7. PIANC: Harbour Approach Channels Design Guidelines. PIANC Report, PIANC Secretariat General. Bruksela, 2014.
8. Praca zbiorowa: Morskie drogi wodne. Projektowanie i eksploatacja w ujęciu inżynierii ruchu. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk, 2015.
9. Praca zbiorowa: Inżynieria Ruchu Morskiego. Wytyczne do projektowania morskich dróg wodnych i portów oraz warunków ich bezpiecznej eksploatacji. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk, 2017.
10. Raport: Analiza nawigacyjna modernizacji toru wodnego Świnoujście – Szczecin (pogłębienie do 12,5 m). Akademia Morska w Szczecinie, 2015.
11. Raport: Określenie warunków bezpiecznej eksploatacji gazowców o pojemności ładunkowej od 120 000 m³ do 220 000 m³ wchodzących do Terminalu LNG w Świnoujściu. Akademia Morska w Szczecinie, 2018.
12. Thoresen C. A.: Port Designer's Handbook. JSE Published. London, 2014.
13. Tsinker G. P.: Port Engineering, Planning, Construction, Maintenance and Security. John Wiley and Sons, INC, 2004.