

Mirosław Jurdziński

Akademia Morska w Gdyni

PROCESY NAWIGACYJNE W SYSTEMIE DYNAMICZNEGO ZAPASU WODY POD STĘPKĄ DUKC (DYNAMIC UNDER KEEL CLEARANCE)

W pracy przedstawiono założenia działania lądowego systemu wspomagania nawigacji w rejonach trudnych nawigacyjnie, w celu prowadzenia efektywnej i bezpiecznej nawigacji. Omówiono zakres informacji przekazywanych z systemu lądowego na statki do wiadomości kapitanów oraz pilotów. Opisano również metody określania zapasu wody pod stępką w systemie DUKC (Dynamic Under Keel Clearance).

Słowa kluczowe: planowanie podróży, zapas wody pod stępką.

WSTĘP

Wejście do portów dużego statku, przechodzącego przez rejon płytkowodzia, torem wodnym lub kanałem, w czasie zakłóceń zewnętrznych, wiąże się z określonym ryzykiem, szczególnie w obszarach pływowych.

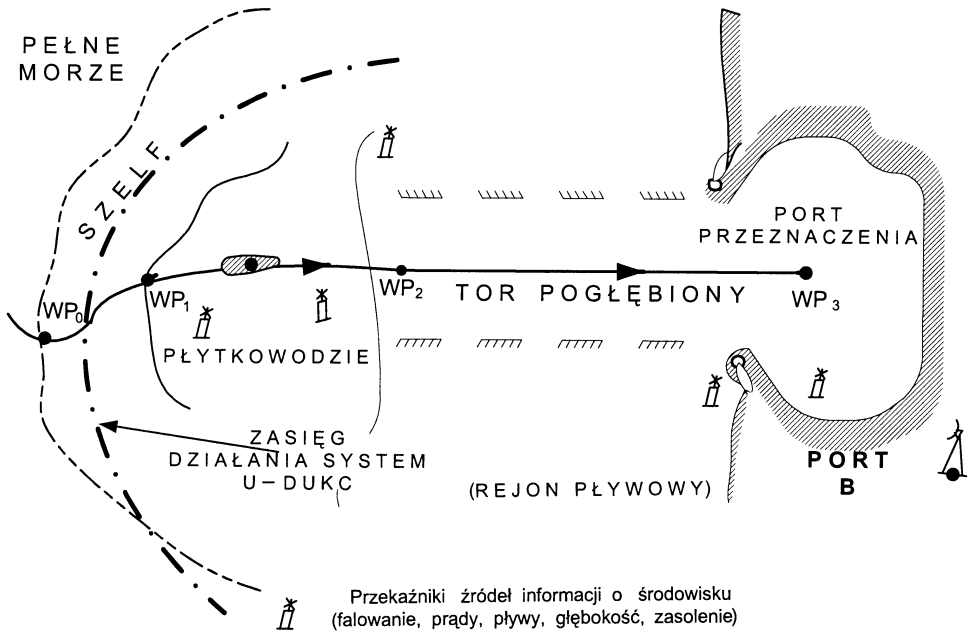
W większości portów na świecie władze portowe wprowadzają wspomaganie nawigacji morskiej po wodach będących w ich jurysdykcji, otwierając na lądzie ośrodki, których celem jest pomoc kapitanom w bezpiecznym ruchu statków przepływających lub zawijających do portów. Tworzone są systemy dynamicznego określania zapasu wody pod stępką na trasach pilotowania statku.

Głównie chodzi o przekazywanie na statki, w systemie ciągłym, informacji o bezpiecznym zapasie wody pod stępką, wartościach bezpiecznego zanurzenia, prędkości oraz czasu trwania okna pływowego w rejonach pływowych.

Kapitanowie statków o dużym zanurzeniu nie posiadają odpowiednio aktualnych informacji o dynamice zmian zakłóceń zewnętrznych, co powoduje, że nie są w stanie na bieżąco określać wartości zapasu wody pod stępką oraz innych elementów bezpiecznej żeglugi.

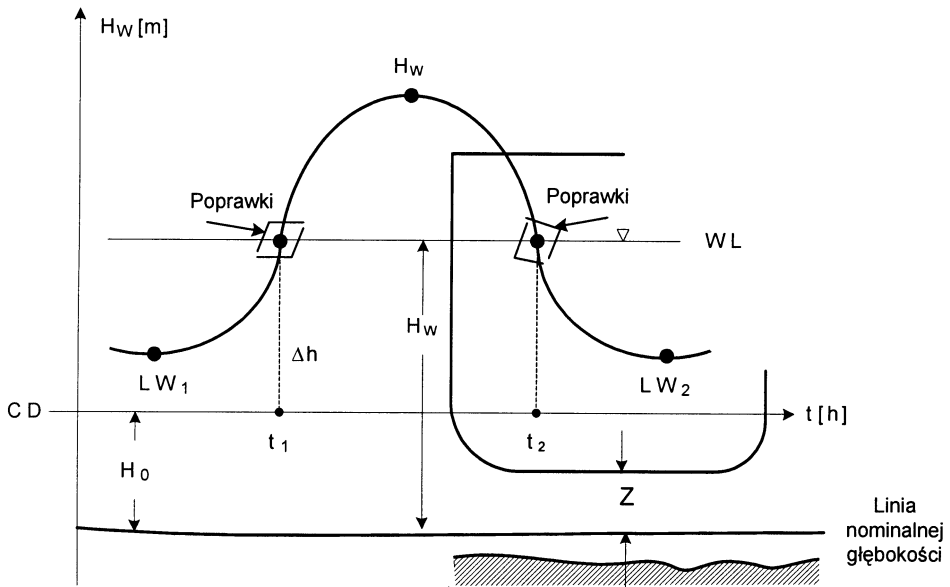
Na rysunku 1 przedstawiono ideowy schemat systemu DUKC, stosowanego w rejonach pływowych do pomocy w nawigacji, w celu bezpiecznego określania zapasu wody pod stępką oraz czasu trwania okna pływowego.

Trasa w takich systemach podzielona jest na kilka odrębnych obszarów (faz), w których statek może poruszać się z właściwą prędkością ze względu na zanurzenie, przy określonej głębokości wody zmieniającej się w czasie (w oknie pływowym).



Rys. 1. Schemat modelu systemu DUKC

Fig. 1. Diagram of DUKC system model



$$H_w = T_s + Z \text{ [m]}$$

H_w – wymagana głębokość na trasie

$$\Delta t = t_2 - t_1 \text{ [h]}$$

Δt – wymagany czas trwania okna pływowego (okres)

Rys. 2. Okno pływowe na swobodny przepływ statku na trasie dla bezpiecznej wartości Z [6]

Fig. 2. Tidal Window during the ship passage in restricted area under save UKC

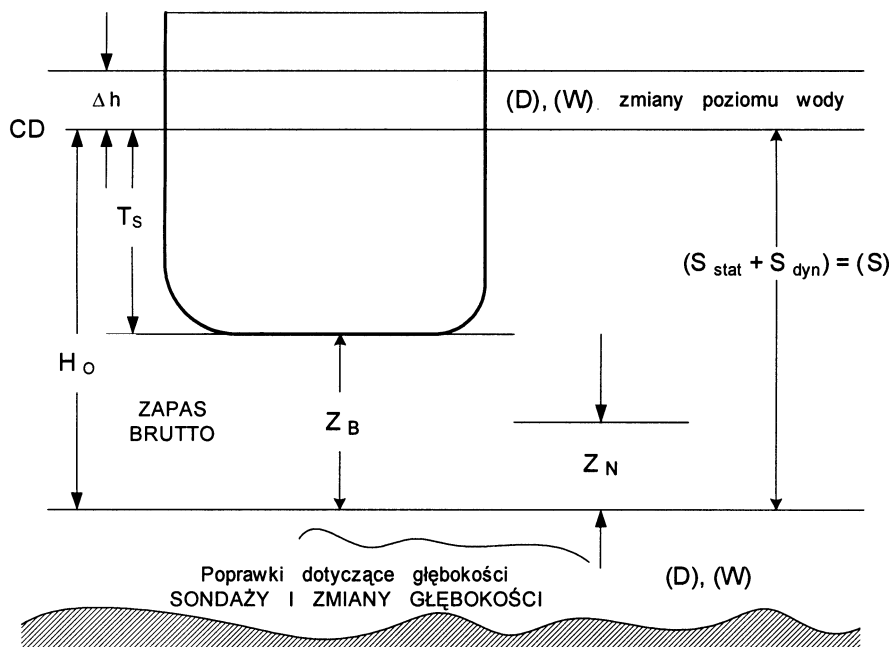
1. ZAKRES INFORMACJI WYKORZYSTYWANY W SYSTEMACH DUKC

System DUKC jest wykorzystywany do prognozowania istotnych (głównych) elementów związanych z bezpiecznym ruchem statków. Do nich zalicza się: prędkość bezpieczną statku dla wartości Z oraz zanurzenie i zapas wody pod stępką. Dodatkowym, ważnym elementem w rejonach pływowych jest informacja dla kapitana (pilota) o okresie trwania okna pływowego.

Na dłuższych trasach, odległych od portu, zachodzi konieczność prognozowania prędkości fali pływowej, dynamiki przemieszczania się okna pływowego w trakcie przyptywu lub odpływu fali pływowej.

W każdym systemie DUKC można wyróżnić trzy grupy danych, jak:

- (S) – statek (właściwości statyczne i dynamiczne o statku);
- (D) – rejon pływania (parametry);
- (W) – warunki środowiska (główne zakłócenia działające na statek).



Rys. 3. Podział poprawek do określania zapasu Z [2]

Fig. 3. Corrections classification to UKC calculation

Dynamika zmian informacji w grupach różni się. Podobnie modele rozkładu prawdopodobieństwa tych grup są różne. Prowadzi to do różnych form określania wartości zapasu wody pod stępką oraz okna pływowego w systemie DUKC.

Można tu mówić o praktycznym wykorzystaniu modelu deterministycznego lub probabilistycznego do obliczenia parametrów Z lub Δt (okna pływowego) [1, 5].

Zespół informacji związanych z warunkami środowiska i rejonem pływania, ze względu na dużą dynamikę zmian, stanowi podstawę opracowania zapasu wody pod stępką.

Przy modelowaniu wartości zapasu wody pod stępką Z należy wykorzystać informacje dotyczące:

- stateczności w danym stadium załadowania, jak KG i MG;
- głównych parametrów geometrycznych statku, jak LBT;
- kształtów kadłuba (współczynnika pełnotliwości), wyporności;
- efektów prędkości statku i kąta kursowego natarcia fali;
- wartości H/T (głębokości wody do zanurzenia statku);
- parametrów falowania, w tym okresu fali i wpływu falowania na okres kołysań statku, czyli odpowiedzi kadłuba na falę (spektrum falowania).

Tabela 1. Klasyfikacja informacji potrzebnych do oceny Z na trasie pływania [5]

Table 1. Classification of information to assess UKC during passage

Rodzaj procesu nawigacji	Zakres warunków w czasie pływania statku na trasie			
	Właściwości statyczne S_{stat}	Właściwości dynamiczne S_{dyn}	Właściwości trasy D	Warunki hydrometeorologiczne W
Zmiany probabilistyczne w czasie ruchu na trasie	Wymiary statku Moc SG Rodzaj ładunku (przegłębienie)	Trasa ruchu (faza) Czas Rozkład	Osady dennie Zmiany głębokości Przeszkody dennie	Pływy, prądy Falowanie Wiatr Gęstość wody
Zmiany deterministyczne w czasie ruchu na trasie	Osiadanie Prędkość Przechył od wiatru Zmiana zanurzenia od falowania	Prędkość Kurs Dryf Odległość od płycizn (krawędzi toru)	Głębokość Szerokość trasy Rodzaj kanału (toru wodnego)	Wartość pływu Warunki prądowe Stan falowania Siła wiatru
Zmiany probabilistyczne w czasie pływania na trasie	Osiadanie w stosunku do kształtu toru (kanału) Przechyły od wiatru	Prędkość Kąt kursowy do wiatru Kąt dryfu Odległość od brzegu kanału	Parametry kanału Kształty kanału Kształt dna	Rodzaj pływu Warunki pływu Warunki wiatru Falowanie Gęstość wody
Zmiany probabilistyczne kołysania statku na fali	Odpowiedź kadłuba na falowanie	Czas przepływu (okno pływowe)	Aktualne wartości zapasu wody pod stępką	Warunki falowania (pogoda)

gdzie:

S_{stat} – elementy dotyczące statku (statyczne),

S_{dyn} – elementy dotyczące statku (dynamiczne),

D – elementy związane z trasą ruchu statku,

W – elementy związane z warunkami pogody na trasie ruchu.

Dodatkowo zespół informacji związanych ze środowiskiem pływania (W) dotyczy:

- danych parametrów pływku na całej trasie (skok, momenty wystąpienia wód, itp.) wraz z prognozą;
- danych o pływach *on line* (z obserwacji na bieżąco);
- informacji o poziomie morza (z obserwacji, z monitoringu) wraz z prognozami;
- poziomu zera mapy (monitoring ze stacji);
- danych hydrograficznych (ostatnie badania, *on line*);
- zakresu aktualnych informacji o parametrach statku.

W tabeli 1 przedstawiono zakres informacji potrzebnych w procesie nawigacji, w różnych warunkach zewnętrznych, do dynamicznego określenia zapasu wody pod stępką.

2. OMÓWIENIE METOD OKREŚLANIA ZAPASU WODY POD STĘPKĄ – Z

Zapas Z jest to pionowa odległość między najniższą częścią zanurzonego kadłuba statku a powierzchnią dna morskiego. Wartość ta stanowi główny element uniknięcia awarii wejścia statku na mieliznę lub innego kontaktu statku z elementami dna morskiego.

W celu uniknięcia kontaktu kadłuba statku z dnem morza oraz prawidłowej oceny zapasu wody pod stępką zachodzi konieczność przestrzegania szeregu ważnych procedur, mogących mieć wpływ na bezpieczną żeglugę po akwenach ograniczonych (na płytkowodziu, w kanałach, torach wodnych itp.) [3].

1. Uwzględnienie ugięć lub wygięć kadłuba w zanurzeniu statku. Wymaga tego bezpieczne poruszanie się po zaplanowanej trasie, od strony pełnego morza do portu przeznaczenia, na której zachodzą zmiany gęstości wody.
2. Uwzględnienie zmian zanurzenia powstałych w wyniku:
 - przegłębienia i osiadania,
 - prędkości statku,
 - działania prądów,
 - głębokości wody,
 - parametrów geometrycznych statku,
 - rodzaju i mocy napędu.
3. Uwzględnienie pionowych ruchów kadłuba pojawiających się w wyniku:
 - przechyłów występujących w czasie zwrotów,
 - na fali (przechyły, kiwanie, nurzanie),
 - przechyłów od wiatru.
4. Uwzględnienie zmiany głębokości wody w czasie ruchu na trasie.

2.1. Podejście deterministyczne do oceny zapasu Z

Model deterministyczny jest to model, który danemu na wejściu zdarzeniu jednocześnie przypisuje konkretny stan. W tym modelu nie ma żadnego elementu losowości. Rozwój modelu jest z góry przesądzony i zależy od parametrów początkowych lub ich wartości poprzednio testowanych. Modele deterministyczne, posiadające zmienne czasowe, stają się modelami prognostycznymi (prognozy prądów, wiatru lub falowania). Przed rozpoczęciem obliczania wartości Z ustanawiane są kryteria, takie jak:

1. Kryterium, którego celem jest unikanie kontaktu dna statku z dnem rejonu pływania (dokładne UKC).
2. Kryterium unikania niebezpiecznych manewrów.

Obliczanie zapasu Z , wykorzystujące metodę deterministyczną, stosowane jest na statkach przez nawigatorów. W praktyce nawigacyjnej wstępną ocenę zapasu wody pod stępką określa się za pomocą metody, znanej jako określanie wartości zapasu Z , którą wyraża się procentowo w stosunku do zanurzenia statku:

$$Z = (X) \cdot T_S \quad [\text{m}] \quad (1)$$

gdzie:

- X – wartość procentowa,
- T – zanurzenie statyczne [m].

Wartość X zależy od rejonu pływania i/lub rodzaju dna morskiego. Wartość $X = 7-10$ w rejonach portowych, gdzie dno jest miękkie, równe (muliste lub piaszczyste). Na dnie kamienistym wartość X zwiększa się nawet do 50. Również rodzaj statku, jego przeznaczenie (np. chemikaliowce, zbiornikowce) wpływa na wartość X . Jednak ten typ oceny Z jest bardzo ogólny i zwykle musi być określany bezpośrednio przez obliczanie.

Obliczanie wartości Z odbywa się na podstawie aktualnych informacji oraz danych obejmujących zakres trzech elementów składowych:[3]

1. Oceny wahań poziomu wody (poprawki).
2. Oceny ruchu (dynamiki) kadłuba (zmiany T_S).
3. Oceny parametrów dna morskiego (H_0) (rys. 4).

Suma poprawek, obejmująca te trzy grupy, daje w efekcie wartość zapasu wody pod stępką.

$$Z = H - T_S \quad [\text{m}] \quad (2)$$

$$H = H_0 + \Delta h \quad [\text{m}] \quad (3)$$

$$Z = \sum_{i=1}^9 Ri \quad [\text{m}] \quad (4)$$

gdzie:

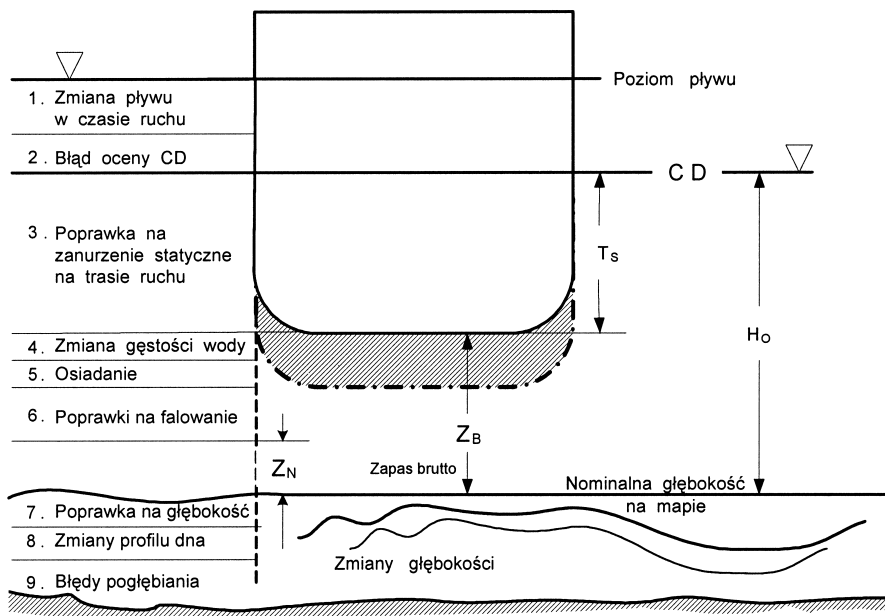
- H – głębokość wody aktualna,
- T_S – zanurzenie statyczne,
- Ri – poprawki statyczne i dynamiczne.

Na rysunku 4 przedstawiono elementy składowe zapasu Z w postaci poprawek R . W sumie pokazano 9 głównych poprawek do zanurzenia $T_S(4)$.

Poprawki R można podzielić na statyczne i dynamiczne (rys. 4). Poprawki dynamiczne są to poprawki na falowanie i osiadanie statku w ruchu, pozostałe to tzw. poprawki statyczne. Obejmują one składowe zapasu wody pod stępką i dotyczą takiego zjawiska, jak zmiany parametrów pływu w czasie pływania na trasie. Wskazują także na konieczność stosowania poprawek na:

1. Błędy oceny aktualnego poziomu wody(zera mapy) na trasie.
2. Zanurzenie statyczne.
3. Zmianę gęstości wody w czasie pływania.
4. Wartości osiadania i przegłębienia dynamicznego w ruchu.
5. Falowanie morza (nurzenie kadłuba).
6. Niepewność niektórych głębokości.
7. Zmiany profilu dna morskiego między badaniami.
8. Błędy pogłębienia.
9. Błędy oceny wartości pływu.

Na rysunku 4 pokazano inną kolejność rozkładu poprawek z różniącym się opisem.



Rys. 4. Deterministyczne podejście do oceny zapasu wody pod stępką [5, 6]

Fig. 4. Deterministic approach to UKC determination

Drugim ważnym elementem w procesie działania systemu DUKC jest określanie parametrów okna pływowego [6]. Wiąże się to z ustalaniem momentów wejścia na płytkowodziu w ściśle określonym czasie.

Ważne tu jest opracowanie kryteriów stosowania okna pływowego:

- kryterium unikania kontaktu dna statku z mielizną;
- kryterium unikania niebezpiecznych manewrów.

Jednocześnie chodzi o wykorzystanie okresu okna pływowego o maksymalnych wartościach lub maksymalnego zanurzenia w procesie pływania na całej trasie.

2.2. Podejście probabilistyczne do oceny zapasu Z

Sposób rozwiązywania wartości zapasu wody pod stępką oraz okna pływowego metodą probabilistyczną wymaga znajomości określania akceptowanego prawdopodobieństwa kontaktu z dnem morskim pojedynczego statku w czasie ruchu na określonej trasie lub znajomości ryzyka prawdopodobieństwa uderzenia kadłuba o dno morza na trasie podczas rejsu:

$$r = P \cdot c,$$

gdzie ryzyko (r) równa się prawdopodobieństwu (P) awarii razy konsekwencje (c) kontaktu z dnem pojedynczego statku.

Wielkości P i c są trudne do oceny, toteż metoda ta nie może być wykorzystywana przez nawigatorów ze względu na brak możliwości zdobycia odpowiednich danych.

Dotyczy to również znajomości średnich błędów poprawek do zanurzenia. Znając dane, wartość Z można obliczyć wzorem:

$$Z = k \cdot (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 + S_5^2 + S_6^2)^{0.5} \text{ [m]} \quad (5)$$

gdzie:

- k – wartość współczynnika w zależności od gęstości rozkładu dla awarii statku przy określonej ilości przejść na określonej trasie,
- S_1 – średni błąd oceny głębokości wody,
- S_2 – średni błąd oceny poziomu pływu,
- S_3 – średni błąd określenia wartości zamulenia trasy,
- S_4 – średni błąd oceny zmiany wartości zasolenia wody na całej trasie,
- S_5 – średni błąd oceny wartości osiadania i przechyłu statku na trasie,
- S_6 – średni błąd oceny zanurzenia statku na trasie.

Przykład: Prawdopodobieństwo awarii statku dla 10 000 przejść na określonej trasie, współczynnik $k = 3,718$ [5].

Zakłada się, że każdy wyżej wymieniony błąd ma rozkład normalny. Mankamentem tej metody jest fakt pominięcia wartości poprawki na falowanie morza. Wartość S_7 – poprawki na falowanie morza ma rozkład Raleigha.

Należy zatem dodatkowo określić część składowej związanej z falowaniem, aby uzyskać pełną wartość zapasu wody pod stępką.

2.3. Porównanie metod deterministycznej i probabilistycznej

Z badań [6] wynika, że metoda deterministyczna jest bardziej przydatna w praktyce nawigacyjnej. Analiza wykorzystania poszczególnych metod do obliczania wartości Z oraz czasu trwania okna pływowego wykazała wyższość metody deterministycznej. Daje ona możliwość obliczania wydłużenia okna pływowego, zanurzenia statku w wielu portach pływowych ze względu na dostępność danych.

Podejście probabilistyczne prowadziło do zmniejszenia czasu okna pływowego oraz zwiększenia wartości Z . W efekcie wejście statków do portów było ograniczone. Istniała konieczność oczekiwania statku przed wejściem do portu na zwiększony skok pływu.

3. WNIOSKI KOŃCOWE

1. Stworzenie w ośrodkach portowych systemu pomocy nawigacyjnej w rejonach trudnych nawigacyjnie, co podniesie poziom bezpieczeństwa i efektywność nawigacji.
2. Procesy nawigacji prowadzone w systemach powinny być optymalizowane według kryteriów unikania kontaktu kadłuba statku z dnem morza oraz ułatwienia manewrowania statkiem na całej trasie.
3. Pionowe ruchy kadłuba statku, wywołane falowaniem oraz ruchem statku, stanowią najważniejszą składową dynamiczną zapasu wody pod stępką w ruchu statku na płytkowodziu.
4. Wybór wzoru do określania wartości osiadania statku w ruchu powinien być zweryfikowany przed zastosowaniem ze względu na dużą rozpiętość wyników.
5. Z analizy 18 technik określania osiadania statku opisanych w [6] wynika, że istnieją duże rozpiętości wyników. Dla masowca o zanurzeniu $T = 14,5$ m, osiadania dla prędkości 14 w, wyniki różniły się o 1,45 m (osiadanie maksymalne 2,05; minimalne 0,6 m).
6. Na podstawie analizy porównawczej 15 wartości wyników obliczania osiadania statku wynika, że wzór ogólny Barrasa CB był najbardziej zbliżony do średniej wartości z 15 wzorów. Wyniki porównania w tabeli 2.

Tabela 2. Masowiec $T = 14,5$ m ($\delta = 0,8$)

Table 2. Bulkcarrier Dryft = 14.5 m ($C_B = 0.8$)

Prędkość [w]	4	6	8	10	12	14	16
Osiadanie śr. [m]	0,15	0,30	0,45	0,75	1,10	1,55	2,10
Osiadanie wg Barrasa [m]	0,13	0,28	0,51	0,80	1,15	1,57	2,04

7. Podejście metodą deterministyczną do obliczenia UKC i okna pływowego jest bardziej korzystne niż metodą probabilistyczną.

LITERATURA

1. *Dynamic Under Keel Clearance – Marsden Point*, www.northport.co.nz/node/1969.
2. Jurdziński M., *Ocena zapasu wody pod stępką w żegludze morskiej*, Akademia Morska w Gdyni, SDK, Gdynia 2005.
3. Jurdziński M., *Systemy dynamicznego ustalania wartości zapasu wody pod stępką na płytkowodziu*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, 2013, nr 82, s. 15–37.
4. Moes H., *Probability and risk criteria for channel depth design and channel operation*, www.hmoes@csir.co.za.
5. PIANC 919850 *Under keel Clearance for a large ship in maritime fairways with hard bottom*, Supplement to PIANC Bulletin No. 51, Brussels.
6. Vantorre M. et al., *Optimization of Tidal Windows for Deep-Drafted Vessels by means of a Probabilistic Approach Policy for Access Channels with depth limitation*.
7. www.aaai.org.

THE NAVIGATION PROCESSES IN THE DYNAMICAL UNDER KEEL CLEARANCE SYSTEM

Summary

In this paper the principle of organization of the ground DUKC system [7] activities in the areas difficult to navigation have been presented. The volume of information disseminated to the pilots and ship masters have been discussed. Methods of the UKC and tide windows calculations in the DUKC system have been described.

Keywords: *passage planning, Dynamic Under Keel Clearance.*