

Grzegorz Rutkowski
Akademia Morska w Gdyni

Andrzej Królikowski
Akademia Marynarki Wojennej

**OCENA GŁĘBOKOŚCI TORU PODEJŚCIOWEGO
NA POŁUDNIE OD ŁAWICY SŁUPSKIEJ
W ASPEKCIE OBSŁUGI
JEDNOSTEK O MAKSYMALNYCH GABARYTACH
— METODY UPROSZCZONE**

STRESZCZENIE

Artykuł obejmuje ocenę maksymalnego zanurzenia statku handlowego, który przy działaniu różnych warunków zewnętrznych (przeciętnych i ekstremalnych) mógłby bezpiecznie prowadzić żeglugę (manewrować) w „Rynnie Słupskiej”, zachowując przy tym wymagany zapas wody pod stępką, czyli minimalną rezerwę nawigacyjną głębokości. Do określenia maksymalnego zanurzenia statku posłużymy się metodą praktyczną, wykorzystując definicję ryzyka nawigacyjnego oraz model przestrzenny domeny statku. Otrzymane wyniki porównamy z wytycznymi *Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 01.06.1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać morskie budowle hydrotechniczne obsługujące statki o określonych gabarytach*.

Słowa kluczowe:

tor podejściowy, „Rynna Słupska”, maksymalne zanurzenie statku, rezerwa nawigacyjna głębokości, budowle hydrotechniczne.

WSTĘP

Pod pojęciem „Rynny Słupskiej” rozumiemy akwen spłycony, ograniczony od północy Ławicą Słupską, od południa zaś płyciznami usytuowanymi wzdłuż wybrzeża polskiego w kierunku na wschód od latarni morskiej w Darłowie poprzez latarnie morskie Jarosławiec, Ustka, Rowy, Czołpino, Łeba do latarni morskiej Stilo.

Do określenia maksymalnego zanurzenia statku posłużymy się metodą praktyczną, wykorzystując definicję ryzyka nawigacyjnego oraz model przestrzenny domeny statku [11].

Ocenę rezerwy nawigacyjnej głębokości (zapasu wody pod stępką) dokonamy przy działaniu różnych zakłóceń zewnętrznych (przeciętnych i ekstremalnych) dla przykładowych statków handlowych, a w szczególności:

- jednostki typu VLCC lub masowca o gabarytach: długość $L = 350,0$ m, szerokość $B = 60,0$ m, zanurzenie na Bałtyku¹ $T_D = T_R = 15,00$ m, współczynnik pełnotliwości kadłuba $C_B = 0,85$;
- kontenerowca o gabarytach: długość $L = 250,0$ m, szerokość $B = 32,0$ m, zanurzenie $T_D = T_R = 12,00$ m, współczynnik pełnotliwości kadłuba $C_B = 0,70$;
- promu pasażerskiego o gabarytach: długość $L = 140,0$ m, szerokość $B = 16,0$ m, zanurzenie $T_D = T_R = 7,50$ m, współczynnik pełnotliwości kadłuba $C_B = 0,65$;
- kutra rybackiego o gabarytach: długość $LOA = 40,0$ m, szerokość $B = 8,5$ m, zanurzenie $T_D = T_R = 4,00$ m, współczynnik pełnotliwości kadłuba $C_B = 0,63$.

Otrzymane wyniki porównamy z wytycznymi *Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 01.06.1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać morskie budowle hydrotechniczne obsługujące statki o określonych gabarytach*.

Wytyczne Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie głębokości akwenów przy budowach morskich i ich usytuowanie oraz sumaryczny zapas głębokości wody pod stępką kadłuba statku — metoda uproszczona 1.

Rozważając ewentualną budowę Systemu Rozgraniczenia Ruchu w obszarze „Rynny Słupskiej” zastosowanie będą miały wytyczne *Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 01.06.1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać morskie budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie* — Dział II, Rozdział 3, § 25 — § 35 (Dz.U.98.101.645).

Dla każdej budowli morskiej znajdującej się w obrębie obszaru polskiego określa się następujące trzy głębokości wody:

- głębokość projektowaną H_p ;
- głębokość dopuszczalną H_{dop} ;
- głębokość techniczną H_t .

¹ Limitowane zanurzenie $T = 15,0$ m przyjmowało się na Bałtyku jako maksymalne dla statków chcących bezpiecznie przepłynąć przez cieśniny duńskie (Wielki Belt). Od listopada 2007 r. na skutek wypłynięcia akwenu limitowane zanurzenie statków przepływających przez Wielki Belt zredukowano jednak do 14,5 m (Notice to Marines, November 2007).

Głębokość projektowana H_p określona jest wzorem:

$$H_p = H_t + t_b, \quad (1)$$

gdzie:

H_p — głębokość projektowana [m];

H_t — głębokość techniczna [m];

t_b — tolerancja bagrownicza [m].

Wartość tolerancji bagrowniczej przyjmowana do obliczeń budowli morskich i projektowania robót czerpalnych, w zależności od miejsca ich prowadzenia, wynosi:

- $t_b = 0,25$ m, przy robotach czerpalnych wykonywanych w portach morskich;
- $t_b = 0,35$ m, przy robotach czerpalnych wykonywanych na zewnątrz portów morskich, a w szczególności na redach, na torach podejściowych, na trasach układania kabli i rurociągów na morzu terytorialnym i na morskich wodach wewnętrznych oraz przy profilowaniu dna morskiego pod budowle morskie.

Projekt budowlany zawiera określenie szerokości pasa dna wzdłuż budowli morskiej, w którym ma być zachowana głębokość dopuszczalna (H_{dop}). Jeżeli posiadana dokumentacja techniczna (np. mapa morska) dla istniejących budowli morskich określa tylko jedną głębokość akwenu, uznaje się ją za głębokość dopuszczalną (H_{dop}). Wówczas głębokość techniczną (H_t) można wyrazić w metrach na podstawie wzoru:

$$H_t = H_{dop} - t_b, \quad (2)$$

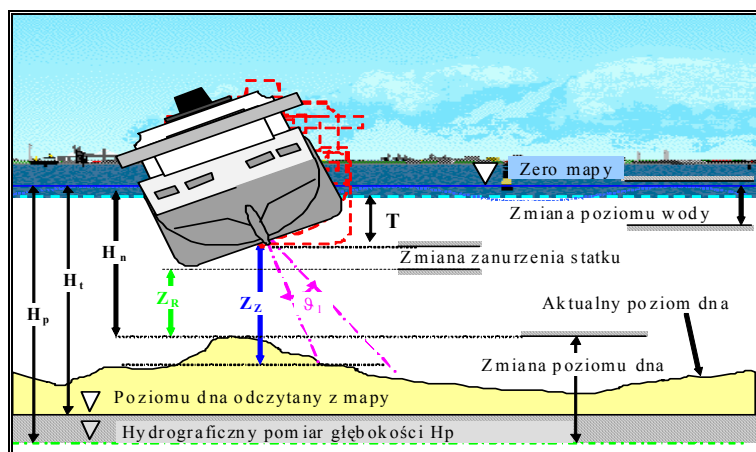
gdzie:

H_t — głębokość techniczna [m];

H_{dop} — głębokość dopuszczalna [m];

t_b — pełna tolerancja bagrownicza [m].

Przez głębokość nawigacyjną (H_n) rozumie się różnicę rzędnych mierzoną od średniego poziomu morza SW do płaszczyzny poziomej, która jest styczna do najwyższej położonego dna w rozpatrywanym akwenu przeznaczonym do żeglugi. Przez głębokość nawigacyjną aktualną (H_{na}) rozumie się głębokość nawigacyjną (H_n) odniesioną do aktualnego poziomu wody.



Rys. 1. Zobrazowanie rzeczywistego Z_R oraz odczytanego z echosondy Z_Z zapasu wody pod stępką na tle głębokości projektowanej akwenu H_p , technicznej H_t oraz nawigacyjnej H_n .
Źródło: opracował G. Rutkowski.

Dopuszczalne zanurzenie statku (T_a) na akwenach żeglugowych określa się, odejmując od głębokości nawigacyjnej aktualnej (H_{na}) wymagany w danych warunkach żeglugowych sumaryczny zapas głębokości wody pod stępką kadłuba statku (R_t):

$$T_a = H_{na} - R_t, \quad (3)$$

gdzie:

T_a — dopuszczalne zanurzenie statku [m];

H_{na} — głębokość nawigacyjna aktualna [m];

R_t — sumaryczny zapas głębokości wody pod stępką kadłuba statku charakterystycznego umożliwiający, w miejscu usytuowania danej budowli morskiej, pływalność tego statku w najniekorzystniejszych warunkach hydrologicznych [m].

Kolejna zależność (4) przedstawia relację zachodzącą pomiędzy największym dopuszczalnym zanurzeniem kadłuba statku (T_c) a głębokością techniczną (H_t):

$$H_t = T_c + R_t, \quad (4)$$

gdzie:

T_c — największe dopuszczalne zanurzenie kadłuba równomiernie załadowanego statku [m];

R_t — sumaryczny zapas głębokości wody pod stępką kadłuba statku charakterystycznego umożliwiający, w miejscu usytuowania danej budowli morskiej, pływalność tego statku w najniekorzystniejszych warunkach hydrologicznych [m].

Sumaryczny zapas głębokości wody, o którym mowa we wzorach (3) i (4), nie może być mniejszy od minimalnego sumarycznego zapasu głębokości wody (R_t^{min}) określonego w metrach według zależności:

$$R_t^{min} \geq \eta \cdot T_c, \quad (5)$$

gdzie:

- T_c — największe dopuszczalne zanurzenie kadłuba równomiernie załadowanego statku [m];
 η — współczynnik bezwymiarowy, zależny od rodzaju akwenu lub toru wodnego, określony w tabeli 1.

W przypadku badanego akwenu minimalny sumaryczny zapas głębokości wody R_t^{min} obliczony dla różnych typów statków przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 1. Wartości bezwymiarowego współczynnika η w zależności od rodzaju akwenu lub toru wodnego

Rodzaj akwenu lub toru wodnego	η
Akweny portowe osłonięte od falowania	0,05
Wewnętrzne tory wodne, obrotnice statków, baseny i kanały portowe, na których jednostki pływające korzystają z holowników	0,05
Zewnętrzne tory podejściowe z morza do portów i przystani morskich	0,10
Otwarte akweny morskie	0,15

Źródło: Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 01.06.1998 r., DzU 1998, Nr 101, poz. 645.

Przyjmując głębokość nawigacyjną aktualną akwenu przy przeciętnych warunkach nawigacyjnych $H_{na} = 17,0$ m oraz gabaryty jednostek największych, jakie mogą wpłynąć na Bałtyk przez cieśniny duńskie (Wielki Belt, $H_{na} = 17,0$ m, $T = 15$ m), minimalny zapas głębokości wody pod stępką powinien wynosić nie mniej niż 2,25 m. W badanym przypadku kryterium bezpieczeństwa nawigacyjnego głębokości nie zostanie więc spełnione, bowiem: $H_t = 17,0$ m – 2,25 m = 14,75 m i jest mniejsze od maksymalnego zanurzenia jednostki $T_a = 15,0$ m.

W przypadku warunków ekstremalnych (duże falowanie) sytuacja byłaby znacznie gorsza, w rozważaniach należałoby bowiem zredukować głębokość nawigacyjną akwenu do $H_{n1} = 16,50$ m oraz zwiększyć maksymalne zanurzenie statku T_a wskutek oddziaływania fali (przechyły boczne, wzdłużne itp.). Dla przykładu, sam przechył boczny do $\pm 5^\circ$ statku o szerokości $B = 60$ m i zanurzeniu początkowym $T_{a0} = 15,0$ m może zwiększyć nam maksymalne zanurzenie statku o 2,56 m, czyli do wartości $T_{a1} = 17,56$ m.

Tabela 2. Minimalny sumaryczny zapas głębokości wody R_t^{min} obliczony dla różnych typów statków dla akwenu spłyconego (rynnny) na południe od Ławicy Słupskiej

Typ jednostki	Zanurzenie T_c	Minimalny zapas głębokości wody R_t^{min}
VLCC ($L = 350$ m, $B = 60$ m, $T = 15$ m, $C_B = 0,85$)	15,00 m	2,25 m
Kontenerowiec ($L = 250$ m, $B = 32$ m, $T = 12$ m, $C_B = 0,70$)	12,00 m	1,80 m
Prom pasażerski ($L = 140$ m, $B = 16$ m, $T = 7,5$ m, $C_B = 0,65$)	7,50 m	1,13 m
Kuter rybacki ($L = 40$ m, $B = 8,5$ m, $T = 4$ m, $C_B = 0,63$)	4,00 m	0,60 m

Źródło: opracował G. Rutkowski.

Wzrost zanurzenia statku wywołany przechyłem bocznym możemy obliczyć z zależności:

$$\Delta T_7^H = T_M [\cos(\theta) - 1] + \frac{1}{2} \cdot B \cdot \sin(\theta), \quad (6)$$

gdzie:

ΔT_7^H — zmiana zanurzenia wywołana przechyłem bocznym statku [m];

T_M — średnie zanurzenie statku [m];

θ — kąt bocznego przechyłu statku [°];

B — szerokość statku [m].

Wzrost zanurzenia statku wywołany oscylacjami wzdłużnymi możemy obliczyć z zależności:

$$\Delta T_7^I = \frac{1}{2} \cdot L_w \cdot \operatorname{tg}(\Psi) \approx \frac{1}{2} \cdot L_{pp} \cdot \operatorname{tg}(\Psi), \quad (7)$$

gdzie:

ΔT_7^I — zmiana zanurzenia wywołana przechyłem wzdłużnym statku [m];

L_w — długość statku w obrębie wodnicy pływania [m];

L_{pp} — długość statku pomiędzy pionami [m];

Ψ — kąt przechyłu wzdłużnego statku [°].

Przy dużym oddziaływaniu fali na kadłub statku występują zarówno przechyły boczne, jak i wzdłużne. W praktyce jednak do określenia maksymalnego zanurzenia statku stosuje się jedynie większą wartość poprawek ΔT_7^I lub ΔT_7^H określonych ze wzorów (6) i (7).

Reasumując powyższe, na podstawie wzorów (4) i (5) można określić wzór uproszczony na największe dopuszczalne zanurzenie statku T_c , który mógłby bezpiecznie nawigować w akwenu o głębokości technicznej H_t :

$$T_c \leq \frac{H_t}{1 + \eta}, \quad (8)$$

gdzie:

- T_c — największe dopuszczalne zanurzenie kadłuba równomiernie załadowanego statku [m];
 η — współczynnik bezwymiarowy, zależny od rodzaju akwenu lub toru wodnego, określony w tabeli 1.
 H_t — głębokość techniczna [m].

Zgodnie z zależnością (8) największe dopuszczalne zanurzenie statku T_c , który mógłby bezpiecznie nawigować w obrębie Rynny Słupskiej (akwen otwarty), nie powinno przekroczyć wartości $T_{c1} = 14,78 \text{ m}$ dla $H_t = 17,0 \text{ m}$ (warunki przeciętne) i $T_{c1} = 14,35 \text{ m}$ dla $H_t = 16,5 \text{ m}$ (morze wzburzone falowaniem).

Przy określaniu głębokości nawigacyjnej akwenu posłużono się mapą morską Biura Hydrograficznego Marynarki Wojennej w Gdyni (Mapa Polska 252, INT1219).

Minimalna głębokość akwenu odczytana z mapy nawigacyjnej w obrębie planowanego systemu rozgraniczenia ruchu na południe od Ławicy Słupskiej określona względem średniego poziomu morza wynosi 18 m. Zgodnie z zależnością (2) głębokość ta traktowana powinna być jako głębokość dopuszczalna akwenu (H_{dop}) obciążona błędem na tzw. dopuszczalne przegłębienie dna.

Dla akwenów otwartych, takich jak Rynna Słupska, w których dno nie jest trwale umocnione, w trakcie całego okresu użytkowania budowli morskiej głębokość dopuszczalną H_{dop} stanowi wyrażona w metrach suma:

$$H_{dop} = H_t + R_p, \quad (9)$$

gdzie:

- H_{dop} — głębokość dopuszczalna budowli morskich [m];
 H_t — głębokość techniczna budowli morskiej, określona zgodnie z wyżej podanymi zasadami;
 R_p — rezerwa na dopuszczalne przegłębienie dna w rejonie, w którym dno nie jest trwale umocnione, w trakcie całego okresu użytkowania budowli morskiej.

Zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 01.06.1998 r.* wartość rezerwy na dopuszczalne przegłębienie dna nie może być w tym wypadku mniejsza niż $R_p = 1,0 \text{ m}$, przy czym dla budowli morskich, dla których zrezygnowano z wykonania trwałego umocnienia dna oraz dla budowli morskich usytuowanych w rejonie łuku wklęsłego ujść rzek lub cieśnin do morza, przewężeń koryta akwenu, występowania dużego falowania lub znacznych prądów wody przy dnie akwenu wartość rezerwy R_p przyjmuje się nie mniejszą niż 1,5 m.

Do dalszych rozważań jako głębokość nawigacyjną akwenu przyjmujemy zatem — zgodnie z zależnościami (3), (4) i (6) — wartość $H_{n1} = 17,0 \text{ m}$ podczas nor-

malnych warunków nawigacyjnych ($18,0\text{ m} - 1,0\text{ m} = 17,0\text{ m}$) oraz $H_{n2} = 16,5\text{ m}$ ($18,0\text{ m} - 1,5\text{ m} = 17,0\text{ m}$) dla warunków ekstremalnych (duże falowanie, silne prądy wody przy dnie akwenu).

Powyższe rozważania dotyczące faktycznej wartości głębokości nawigacyjnej badanego akwenu potwierdziła opinia pracowników Urzędu Morskiego w Gdyni. Kontrola głębokości akwenu wykonana przez nich w 2007 roku potwierdziła występowanie w bliskim sąsiedztwie lub w obrębie badanego akwenu odosobnionych niebezpieczeństw nawigacyjnych w postaci głazów, łach piachu, wraków morskich i innych wypłaceń umiejscowionych na głębokościach od 17 m od aktualnego poziomu morza podczas pomiarów ($\pm 0,50\text{ m}$).

Polskie obszary morskie traktuje się jako morze bezpływowe. Głębokość wody mierzy się na nich od poziomu zera mapy, który dla badanego obszaru morskiego określony jest względem średniego poziomu morza SW ($\pm 0,50\text{ m}$). Zgodnie z wieloletnimi obserwacjami prowadzonymi przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Gdyni w badanym akwenu można spodziewać się znacznych zmian poziomu morza względem poziomu wody średniej (SW = 500) przekraczających wartość $\Delta H_n = R_p = 1\text{ m}$. Zmiany te są szczególnie widoczne w okresie jesienno-zimowym. Dla przykładu, w 2001 roku różnice pomiędzy ekstremalnymi wartościami poziomów wody wysokiej (WW) i wody niskiej (NW) na polskim wybrzeżu wahały się od 146 cm w Ustce, 150 cm w Łebie do 206 cm w Świnoujściu [13]. W skali wielolecia (lata 1971–2000) obserwowano wodę wysoką (WW) wyższą od poziomu wody średniej (SW) o ponad 130 cm w Ustce i 140 cm w Łebie oraz wodę niską (NW) niższą od wody średniej (SW) o 54 cm w Łebie i 60 cm w Ustce. Porównanie ekstremalnych poziomów wody zanotowanych w 2001 roku wzdłuż polskiego wybrzeża Bałtyku z wartościami ekstremalnymi z wielolecia 1971–2000 przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Skrajne i średnie stany wody (cm) przy polskim wybrzeżu Bałtyku w 2001 roku (P.Z. wodowskazu = -508 cm, Kr.tj. -500 cm N.N.55)

Miejscowość		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
Kołobrzeg	WW	560	566	546	558	531	560	527	554	588	522	610	590	610
	SW	492	500	491	491	496	512	502	507	520	497	537	511	505
	NW	436	434	440	453	475	492	475	484	486	462	456	427	427
Ustka	WW	547	550	527	552	526	553	523	542	565	527	606	582	606
	SW	494	496	489	488	492	511	500	508	519	500	540	511	504
	NW	440	440	445	456	471	494	477	484	488	468	478	453	440
Łeba	WW	548	554	531	556	527	548	527	533	562	530	596	574	596
	SW	498	502	494	491	496	515	505	513	522	502	543	516	508
	NW	446	451	449	460	480	498	485	483	489	473	508	488	446
Władysławowo	WW	552	563	525	555	531	547	526	536	558	536	608	581	608
	SW	498	502	492	491	497	514	505	513	521	504	543	515	508
	NW	439	452	446	463	475	498	479	485	483	474	512	476	439

Źródło: Warunki środowiskowe Polskiej Strefy Południowego Bałtyku, IMiGW, Gdynia 2004.

Metoda uproszczona 2 na określenie maksymalnego zanurzenia statku mogącego bezpiecznie nawigować w akwenu spłyconym przy wykorzystaniu przestrzennego modelu domeny statku.

Z definicji domeny [10] (z jej cechy wyłączności) wynika, że statek będzie bezpieczny, dopóki w obrębie swojej domeny będzie on jedynym obiektem ruchomym lub stałym, stanowiącym (z nawigacyjnego punktu widzenia) jedyne źródło mogące generować tam zagrożenie (w naszych rozważaniach pomija się możliwość zaistnienia innych wypadków morskich niż te, które związane są bezpośrednio z ruchem statku i jego nawigacją).

W odniesieniu do płaszczyzny pionowej lokalnego (statkowego) układu odniesienia, liczonej w dół od środka tego układu, można jednoznacznie stwierdzić, że statek pozostanie bezpieczny, dopóki wartość głębokości jego domeny G_D będzie mniejsza od rzeczywistej głębokości akwenu H . A zatem składową R_{NG} ryzyka nawigacyjnego R_N (nazwijmy ją składową pionową ryzyka nawigacyjnego od zachowania rezerwy głębokości lub krócej — ryzykiem od zachowania głębokości) można będzie przedstawić za pomocą następującej zależności:

$$R_{NG} = \begin{cases} 0 & \text{gdy} & H > G_D \\ 0 \div 1 & \text{gdy} & T_{max} < H \leq G_D \\ 1 & \text{gdy} & H \leq T_{max} \end{cases} \quad (10)$$

Z definicji ryzyka nawigacyjnego [11] wiemy, że jeżeli wartość ryzyka pochodzącego od czynników A_i (obiektów) wynosi 0, oznacza to pełne bezpieczeństwo nawigacyjne względem tych czynników (obiektów). Zgodnie z zależnością (10) warunek $H > G_D$ może więc być definiowany jako gwarancja bezpiecznej żeglugi statku względem obiektów podwodnych umieszczonych na głębokościach mniejszych od H . Jeżeli głębokość akwenu H okazałaby się jednak mniejsza lub równa zanurzeniu statku ($H \leq T_{max}$), wówczas — zgodnie z zależnością (10) — realizacja podróży morskiej może okazać się niemożliwa² lub wysoce niebezpieczna (ryzykowna). Zaistnienie powyższej sytuacji sprawi zatem, że wartość ryzyka nawigacyjnego R_{NG} wzrośnie do jedności, a to można interpretować jako pewne (stuprocentowe) prawdopodobieństwo zaistnienia awarii morskiej (wypadku) wskutek zderzenia (kontaktu) z podwodną przeszkodą nawigacyjną umieszczoną na głębokości mniejszej lub równej H .

Po przeprowadzeniu dalszej analizy logicznej dla przedstawionej powyżej sytuacji można wysunąć wniosek, że dla głębokości h ograniczonych przedziałem $T_{max} < H \leq G_D$ ryzyko nawigacyjne R_{NG} będzie przybierać wartości pośrednie z przedziału

² W rozważaniach pomija się możliwość zmniejszenia zanurzenia statku na przykład przez jego odbalastowanie.

$R_{NG} \in \langle 0, 1 \rangle$, co jasno wyraża część środkowa zależności (10). Wzór ogólny na wartość ryzyka R_{NG} dla argumentów H z tak opisanego przedziału ($T_{max} < H \leq G_D$) można wyrazić wzorem:

$$R_{NG} = \frac{G_D - H}{G_D - T_{max}}. \quad (11)$$

Wyznaczenie głębokości G_D i wysokości W_D domeny statku w praktyce sprowadza się do określenia pionowej rezerwy nawigacyjnej statku R_G . Mając jednak na względzie informacje zawarte w pracy [10], wzory uproszczone na głębokość i wysokość domeny przybiorą wówczas postać:

$$G_D = T_{max} + R_G = T_{max} + \sum_{i=1}^{35} R_i \text{ [m]}, \quad (12)$$

gdzie:

- G_D — głębokość domeny statku [m];
- T_{max} — maksymalne zanurzenie statku [m];
- R_i — składowe pionowej rezerwy nawigacyjnej statku według opisu zamieszczonego w pracy [10], [m]

lub w wersji bardziej rozbudowanej:

$$G_D = \left(T + \sum_{i=1}^{11} R_i + \sum_{i=12}^{18} R_i + \sum_{i=19}^{24} R_i \right) + \sum_{i=25}^{26} R_i + \sum_{i=27}^{35} R_i = R_{ThH}(T, TA, RD) + R_{FW}(v, L, B, h_f, q) + R_{z,t_d}(v, B, L, T, C_B, b, H) \text{ [m]}, \quad (13)$$

gdzie:

- R_{ThH} — funkcja określająca części składowe R_1 – R_{24} nawigacyjnej rezerwy głębokości (składowe statyczne dotyczące określenia zanurzenia statku T , głębokości akwenu H oraz pochodzące od działania czynników hydrometeorologicznych H (R_H)) zależna od zanurzenia statku T [m], typu akwenu pływania TA oraz rodzaju dna RD [m];
- R_{FW} — funkcja określająca części składowe R_{25} – R_{26} nawigacyjnej rezerwy głębokości, określająca zmianę pionowej rezerwy nawigacyjnej statku na skutek dynamicznego działania fali F i wiatru W , zależna od parametrów statku: v, B, L, C_B oraz parametrów fali: λ, h_f i q [m];
- R_{z,t_d} — funkcja określająca części składowe R_{27} – R_{35} nawigacyjnej rezerwy głębokości określająca osiadanie statku z oraz dynamiczne przegłębienie t_d , zależna głównie od parametrów statku: v, B, L, T, C_B oraz parametrów akwenu: b, H [m];
- $|t|$ — wartość bezwzględna przegłębienia statku (trymu): $|t| = |T_R - T_D| \approx |T_{max} - T_{min}|$ [m].

Dokładna znajomość wyszczególnionych czynników R_i pionowej rezerwy nawigacyjnej statku R_G umożliwi dokładne oszacowanie pionowych parametrów domeny. Ponieważ jednak nie wszystkie dane są osiągalne (dostępne) podczas normalnej eksploatacji statku, wyrażenie (12) zredukujemy do postaci wzorów uproszczonych zawierających najbardziej istotne parametry funkcji G_D . Mając na względzie aspekty natury bezpieczeństwa przyjęto, iż oszacowane wzory uproszczone powinny zawiązać nieco wartości parametrów G_D względem ich wartości rzeczywistych. W toku prowadzonych badań [10] postanowiono również wyodrębnić statyczną rezerwę głębokości ($n \cdot T_{max}$), osiadanie statku ($k \cdot z_{max}$) oraz dynamiczne działanie wiatru i fali ($0,66 \cdot m \cdot h_f$).

Przyjmując ponadto zalecaną przez konstruktorów kadłuba i armatorów statków metodę C. B. Barrassa na osiadanie statku w ruchu oraz uwzględniając aktualne wartości zakłóceń zewnętrznych, ostrzeżenia nawigacyjne oraz inne dane dostępne na statku podczas normalnej jego eksploatacji, wzory uproszczone na głębokość G_D domeny statku przybiorą następującą postać:

- uwzględniając metodę dokładną C. B. Barrassa na osiadanie statku w ruchu (z ograniczeniem metody)

$$0,5 \leq C_B \leq 0,9; 0 \leq t/L \leq 0,005; 1,1 \leq h/T \leq 1,4)$$

$$G_D = n \cdot T_{max} + 0,66 \cdot m \cdot h_f + k \cdot \left(\frac{1}{30} \cdot C_B \cdot \left(\frac{BT}{bH - BT} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot v_d^{2,08} \right) \text{ [m];} \quad (14)$$

- uwzględniając metodę uproszczoną C. B. Barrassa na osiadanie statku w ruchu w akwenu płytkim (z ograniczeniem metody):

$$1,1 \leq H/T \leq 1,2)$$

$$G_D = n \cdot T_{max} + 0,66 \cdot m \cdot h_f + k \cdot (0,01 \cdot C_B \cdot v^2) \text{ [m],} \quad (15)$$

gdzie:

- G_D — głębokość domeny liczona od linii zanurzenia statku w dół [m];
- v_d — prędkość statku nad dnem obliczona ze wzoru, „odczytana z mapy” lub uzyskana ze wskazań takich przyrządów nawigacyjnych, jak log dopplerowski bądź systemy nawigacyjne dużej dokładności, np. DARPS, DGPS [w];
- B, L, T, C_B — parametry statku: szerokość B [m], długość L [m], zanurzenie T [m], współczynnik pełnotliwości kadłuba C_B ;
- b, H, h_f — parametry akwenu: głębokość H [m], szerokość b [m], wysokość fali h_f [m];
- n — współczynnik liczbowy ($1,1 \leq n \leq 1,3$) zależny od typu akwenu i rodzaju dna morskiego decydujący o wartości składowej statycznej pionowej rezerwy nawigacyjnej statku.

Tabela 4. Wartości liczbowe współczynnika n funkcji zależnej od typu akwenu i rodzaju dna

n	Typ akwenu (TA)	Rodzaj dna (RD)
1,1	Akweny portowe	Dno muliste
1,15	Redy, podejścia do portów	Dno piaszczyste
> 1,2	Akweny odsłonięte	Dno skaliste

Źródło: opracował G. Rutkowski.

m — współczynnik liczbowy ($0,5 \leq m \leq 1,5$) zależny od parametrów statku: v , B , L , C_B oraz fali: λ , h_f i q

Tabela 5. Wartości liczbowe współczynnika m w funkcji $R_{FW} = f(m, L, B, \lambda, h_f, q)$ zależnej od parametrów statku i fali

m	Dla fali z dziobu lub rufy ($q \approx 000^\circ$ lub 180°)	Dla fali z burty ($q \approx 090^\circ$)
0,500	Gdy: $v = 0$, a $L > \lambda$	Gdy: $v = 0$, a $B > 0,5 \cdot \lambda$
1,000	Gdy: $v \geq 10 w$, a $L > \lambda$	Gdy: $v \geq 10 w$, a $B > 0,5 \cdot \lambda$
1,125	Gdy: $v < 10 w$, a $L < 0,5 \cdot \lambda$	Gdy: $v < 10 w$, a $B < 0,5 \cdot \lambda$
$\geq 1,250$	Gdy: $v \geq 10 w$, a $L < 0,5 \cdot \lambda$	Gdy: $v \geq 10 w$, a $B < 0,5 \cdot \lambda$

Źródło: opracował G. Rutkowski.

k — współczynnik liczbowy ($1,0 \leq k \leq 2,0$) zależny od parametrów statku i typu akwenu oraz sytuacji nawigacyjnej, w jakiej znalazł się statek podczas żeglugi (np. wyprzedzanie, mijanie, żegluga nad nierównościami dennymi, żegluga w lodach, mule); współczynnik ten wynika z rozbieżności, jakie mogą powstać na skutek błędnie ocenionego osiadania statku (przyjętej metody obliczeń)

Tabela 6. Wartości liczbowe współczynnika k funkcji $R_{z,td} = f(k, v, B, L, T, C_B, H, b)$ zależnej od parametrów statku i akwenu

k	Parametry statku	Parametry akwenu
1,0	Zgodne z przyjętą metodą obliczeń lub niezgodne, ale mniej rygorystyczne, np. statki smuklejsze i wolniejsze od statków przyjętych w metodzie obliczeń	Zgodne z przyjętą metodą obliczeń lub niezgodne, ale mniej rygorystyczne, np. parametry akwenu większe od polecanych w metodzie (b, H, S)
1,5	Niezgodne z przyjętą metodą obliczeń, np. statki bardziej pełnotliwe od zalecanych w metodzie	Zgodne z przyjętą metodą obliczeń lub niezgodne, ale mniej rygorystyczne, np. parametry akwenu większe od polecanych w metodzie (b, H, S)
	Zgodne z przyjętą metodą obliczeń lub niezgodne, ale mniej rygorystyczne, np. statki smuklejsze i wolniejsze od statków przyjętych w metodzie obliczeń	Niezgodne z przyjętą metodą obliczeń (parametry akwenu mniejsze od zalecanych), żegluga poza osią kanału, wyprzedzanie lub mijanie w kanale
2,0	Niezgodne z przyjętą metodą obliczeń, np. statki bardziej pełnotliwe od zalecanych w metodzie	Niezgodne z przyjętą metodą obliczeń (parametry akwenu mniejsze od zalecanych), żegluga poza osią kanału, wyprzedzanie lub mijanie w kanale

Źródło: opracował G. Rutkowski.

Zakładając, że ryzyko nawigacyjne określone względem głębokości R_{NG} przyjmować będzie nadal graniczną wartość zero, gdy głębokość domeny statku G_D równa będzie głębokości nawigacyjnej akwenu H_N , wówczas przekształcając wzory (14) i (15) względem niewiadomej T , otrzymamy wzory ogólne na pożądaną wartość maksymalnego zanurzenia statku T_{max} , który mógłby jeszcze bezpiecznie nawigować w akwenu.

Dla przykładu, wykorzystując wzór uproszczony (15) słuszny dla płytkowodzia (z ograniczeniem metody: $1,1 \leq H_N/T \leq 1,2$), maksymalne dopuszczalne zanurzenie statku w akwenu spłyconym można obliczyć z zależności:

$$T_{max} = \frac{H_N - 0,66 \cdot m \cdot h_f - k \cdot (0,01 \cdot C_B \cdot v^2)}{n} \text{ [m]}, \quad (16)$$

gdzie:

- T_{max} — maksymalne zanurzenie statku [m];
- H_N — głębokość nawigacyjna akwenu [m];
- h_f — wysokość fali [m];
- C_B — współczynnik pełnotliwości kadłuba [-];
- v_d — prędkość statku nad dnem [w];
- n — współczynnik liczbowy ($1,1 \leq n \leq 1,3$) zależny od typu akwenu i rodzaju dna morskiego decydujący o wartości składowej statycznej pionowej rezerwy nawigacyjnej statku (tabela 4);
- m — współczynnik liczbowy ($0,5 \leq m \leq 1,5$) zależny od parametrów statku: v , B , L , C_B oraz parametrów fali: λ , h_f i q określany z tabeli 5;
- k — współczynnik liczbowy ($1,0 \leq k \leq 2,0$) zależny od parametrów statku i typu akwenu oraz sytuacji nawigacyjnej, w jakiej znalazł się statek podczas żeglugi (np. wyprzedzanie, mijanie, żegluga nad nierównościami dennymi, żegluga w lodach, mule); współczynnik ten wynika z rozbieżności jakie mogą powstać na skutek błędnie ocenionego osiadania statku (przyjętej metody obliczeń).

Wyniki obliczeń dokonane dla akwenu Rynny Słupskiej w funkcji prędkości statku oraz współczynnika pełnotliwości jego kadłuba przedstawiono w tabeli 7. W obliczeniach przyjęto głębokość domeny G_D równoznaczną z nawigacyjną bezpieczną głębokością akwenu H_N . Dla warunków przeciętnych przyjęto $H_{N1} = 17,70$ m, co wynika z poprawienia głębokości wody odczytanej z mapy $H_1 = 18,00$ m określonej względem poziomu wody średniej (SW) o możliwe średnie oscylacje lustra wody $\Delta h = \pm 0,30$ m ($18,00$ m $- 0,30$ m = $17,70$ m). Dla warunków ekstremalnych przyjęto oscylacje $\Delta h = \pm 0,60$ m oraz głębokość nawigacyjną akwenu $H_{N2} = 17,40$ m.

Tabela 7. Przykładowe wartości maksymalnego zanurzenia statku obliczone według zależności (16) z ograniczeniem metody $1,1 \leq H/T \leq 1,2$, dla warunków przeciętnych ($h_f = 3$ m, $\lambda = 150$ m, $\Delta h = \pm 0,30$ m, $H_{M1} = 17,70$ m) i ekstremalnych ($h_f = 5$ m, $\lambda = 160$ m, $\Delta h = \pm 0,60$ m, $H_{M2} = 17,40$ m) oraz różnych typów statków (współczynnik pełnotliwości kadłuba) i prędkości przejścia. W obliczeniach przyjęto następujące wartości współczynników: $n = 1,20$, $m = 1$ oraz $k = 1$

Współczynnik pełnotliwości kadłuba C_B	Prędkość statku w węzłach [w]											
	4 w		6 w		8 w		10 w		12 w		14 w	
	Średnie	Ekstrem.	Średnie	Ekstrem.	Średnie	Ekstrem.	Średnie	Ekstrem.	Średnie	Ekstrem.	Średnie	Ekstrem.
0,5	13,03	11,68	12,95	11,60	12,83	11,48	12,68	11,33	12,50	11,15	12,28	10,93
0,6	13,02	11,67	12,92	11,57	12,78	11,43	12,60	11,25	12,38	11,03	12,12	10,77
0,7	13,01	11,66	12,89	11,54	12,73	11,38	12,52	11,17	12,26	10,91	11,96	10,61
0,8	12,99	11,64	12,86	11,51	12,67	11,32	12,43	11,08	12,14	10,79	11,79	10,44
0,9	12,98	11,63	12,83	11,48	12,62	11,27	12,35	11,00	12,02	10,67	11,63	10,28
1,0	12,97	11,62	12,80	11,45	12,57	11,22	12,27	10,92	11,90	10,55	11,47	10,12

Źródło opracował G. Rutkowski.

Dla uproszczenia w obliczeniach przyjęto falę nadchodzącą z dziobu lub rufy statku o wysokości do 3,00 m i długości do 150 m dla warunków przeciętnych oraz falę o wysokości do 5,00 m i długości około 160 m dla warunków ekstremalnych. Bezwymiarowe współczynniki odczytane z tabel 5. i 6. przyjęto według zasady: $m = 1,0$ i $k = 1,0$, a współczynnik n określony z tabeli 4. dla akwenu odsłoniętego z twardym dnem piaszczysto-skalistym charakterystycznym dla Rynny Słupskiej przyjęto jako $n = 1,20$. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 7.

PODSUMOWANIE

Reasumując powyższe, zgodnie z zależnością (8) (metoda 1) największe dopuszczalne zanurzenie statku T_c , który mógłby bezpiecznie nawigować w obrębie Rynny Słupskiej (akwen otwarty), nie powinien przekroczyć wartości $T_{c1} = 14,78$ m dla $H_t = 17,0$ m (warunki przeciętne) oraz $T_{c1} = 14,35$ m dla $H_t = 16,5$ m (morze wzburzone falowaniem).

Nieco inne wyniki obliczeń (patrz tabela 7.) uzyskano, wykorzystując metodę uproszczoną 2 opartą na modelu przestrzennym domeny statku. Maksymalne dopuszczalne zanurzenie T_c obliczone według wzoru (16) dla statku handlowego o współczynniku pełnotliwości kadłuba $C_B = 0,8$ w zależności od panujących warunków hydrometeorologicznych w akwenie oraz prędkości statku nad dnem przyjmuje wartości od 10,44 m dla warunków ekstremalnych i prędkości statku nad dnem $v = 14$ w do 12,99 m dla warunków przeciętnych oraz prędkości statku $v = 4$ w. Metoda uproszczona druga umożliwia więc określenie większego marginesu bezpieczeństwa dla Rynny Słupskiej.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Blomgren S., Larson M., Hanson H., *Numerical Modeling of the Wave Climate In the Southern Baltic Sea*, „Journal of Coastal Research”, CERF, Spring 2001.
- [2] *Dynamics of Coastal Waters and their modeling*, ed. by J. Sundermann, Institut fur Meereskunde, Hamburg 2005.
- [3] Gucma S., Jagniszczak I., *Nawigacja morska dla kapitanów*, Wydawnictwo Foka, Szczecin 1997.
- [4] *Intersea I, Intrasea II*, materiały Urzędu Morskiego w Gdyni, 2007.
- [5] Joseph M., *Assesing the Precision of Depth Data*, „International Hydrographic Review”, Monaco, July 1991, LXVII (2).
- [6] Jurdziński M., *Planowanie nawigacji w żegludze przybrzeżnej*, Fundacja Rozwoju WSM w Gdyni, 1998.
- [7] Nowicki A., *Wiedza o manewrowaniu statkami morskimi*, Wydawnictwo Trademar, Gdynia 1999.
- [8] Paszkiewicz Cz., *Falowanie wiatrowe Morza Bałtyckiego*, rozprawa habilitacyjna, Polska Akademia Nauk Komitet Badań Morza, Wydawnictwo PAN, Warszawa 1989.
- [9] *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 7 maja 2002 roku w sprawie dróg wodnych*.
- [10] Rutkowski G., *Modelowanie domeny statku w procesie manewrowania w ograniczonych akwenach*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska WT, Warszawa 2000.

- [11] Rutkowski G., *Modelowanie domeny statku w procesie manewrowania w ograniczonych akwenach*, Politechnika Warszawska WT, Prace Naukowe „T”, Warszawa 2001.
- [12] Rutkowski G. *Zastosowanie modelu domeny do oceny bezpieczeństwa nawigacyjnego statków poruszających się w akwenach ograniczonych*, Politechnika Warszawska WT, Prace Naukowe „T”, Warszawa 2001.
- [13] *Warunki środowiskowe Polskiej Strefy Południowego Bałtyku w 2001 roku*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Gdynia 2004.

**ESTIMATION OF APPROACH LANE’S
DEPTH SOUTH OF SLUPSK SANDBANK
WITH REGARD TO SERVICES PROVIDED
FOR VESSELS OF MAXIMUM DIMENSIONS
— SIMPLIFIED METHODS**

ABSTRACT

The paper includes an analysis of maximum draught of a merchant vessel to maintain safety of navigation in different external condition (average and extreme) in ‘Slupsk Trough’ and keep required under keel clearance, i.e. navigational reserve of depth. To determine the maximum draught of a vessel we use practical method which incorporates risk of navigational and three-dimensional model of ship’s domain. The results obtained will be compared with guidelines published by Decree of Minister of Transport and Maritime Economy dated 01 June 1998 on technical conditions to be met by hydro mechanical marine structures which provide service for vessels of specific dimensions.

Keywords:

approach lane, ‘Slupsk Trough’, maximum draught of ship, navigational reserve of depth, marine structures.

Recenzent dr inż. Wacław Morgaś, prof. AMW