

## **OKREŚLENIE OGRANICZEŃ BEZPIECZEŃSTWA ŻEGLUGI JEDNOSTEK MORSKO-RZECZNYCH I ŚRÓDLĄDOWYCH NA PODSTAWIE BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH**

*W artykule określono ograniczenia bezpieczeństwa żeglugi ze szczególnym uwzględnieniem jednostek morsko-rzecznych i śródlądowych. Podstawą analizy ryzyka nawigacyjnego były badania eksperymentalne.*

### **1. WPROWADZENIE**

Pod pojęciem **bezpieczeństwa żeglugi** w niniejszym artykule określa się warunki „środowiskowe” oraz tę część czynników wewnętrznych (statek, załoga), która warunkować będzie bezpieczny ruch. W tym ujęciu bezpieczeństwo żeglugi równoznaczne będzie z pojęciem **bezpieczeństwa nawigacyjnego**.

Jest oczywiste, że ze względu na potrzeby racjonalnych działań na rzecz bezpieczeństwa żeglugi wysoce pożyteczne będzie opracowanie kryteriów, które w sposób w miarę jednoznaczny definiowałyby skalę „trudności” nawigacyjnych, czyli „ograniczeń bezpieczeństwa żeglugi” w akwenu [8].

Definiowanie akwenu trudnego pod względem nawigacyjnym wymaga zatem określenia tych czynników i okoliczności, które występując w granicach tego akwenu, będą generować lub zwiększać ryzyko wypadku. Każdy więc akwen, który ze względu na swój charakter lub okoliczności stanowić będzie duże utrudnienie w prowadzeniu bezpiecznej nawigacji (żeglugi), nazywany będzie **akwenum trudnym pod względem nawigacyjnym** lub krócej **akwenum trudnym** [8].

Pod pojęciem **akwenu ograniczonego** [8] rozumieć należy każdy akwen, który uznany będzie za akwen trudny ze względu na bliskość lądu (brzegu lub dna). Pojęcie akwenu ograniczonego będzie zatem pojęciem węższym w znaczeniu, obejmującym tylko część akwenów trudnych pod względem nawigacyjnym.

A zatem w tym ujęciu akwenu śródlądowe, takie jak Wisła, jej delta oraz Zalew Wiślany, uznać można za akwenu trudne i zarazem ograniczone pod względem nawigacyjnym. Podstawową trudność zaś w prowadzeniu bezpiecznej żeglugi (nawigacji) generuje głównie niski stan wody (głębokość nawigacyjna akwenu), szerokość kanału żeglownego (bliskość brzegu) oraz prześwit wody pod

obiektami zawieszonymi nad wodą (mosty, linie energetyczne itp.). W chwili obecnej natężenie ruchu w badanym akwenu jest nieznaczne, stąd też jego wpływ na prowadzenie bezpiecznej żeglugi (nawigacji) w akwenu jest niewielki.

Przez **prowadzenie bezpiecznej żeglugi (nawigacji)** rozumieć należy kierowanie ruchem statku z punktu wyjścia do punktu docelowego przy zachowaniu wszelkich miar bezpieczeństwa i środków ostrożności, zgodnie z odpowiednimi przepisami Międzynarodowego Prawa Drogi Morskiej (MPDM) i z zachowaniem zasad dobrej praktyki morskiej [8].

## 2. ANALIZA RYZYKA NAWIGACYJNEGO

Na potrzeby dalszej analizy, związanej z badaniem ograniczeń bezpieczeństwa żeglugi (nawigacji), trzeba wprowadzić pojęcie **ryzyka nawigacyjnego** (jako przeciwieństwo **bezpieczeństwa nawigacyjnego**):

$$B_N + R_N = 1 \quad [-] \quad (1)$$

$$B_N = 1 - R_N \quad [-] \quad (2)$$

gdzie:

$B_N$  – wielkość bezwymiarowa opisująca umownie przez wartość liczbową ( $B_N \in (0,1)$ ) skalę bezpieczeństwa nawigacyjnego,

$R_N$  – wielkość bezwymiarowa opisująca umownie przez wartość liczbową ( $R_N \in (0,1)$ ) skalę ryzyka nawigacyjnego.

Do analizy ryzyka nawigacyjnego w akwenu ograniczonym posłużono się definicją domeny statku, definicją ryzyka nawigacyjnego [8] (wzór (1) i (2)) oraz wzorami uproszczonymi (wzory (3)-(8)) na parametry domeny. Ponadto, mając na względzie aspekty natury bezpieczeństwa, przeprowadzone badania, przy określaniu parametrów domeny postanowiono 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 również zalecaną przez konstruktorów i armatorów statków metodę dokładną C.B. Barrassa na osiadanie statku w ruchu (z ograniczeniem metody:  $0,5 \leq C_B \leq 0,9$ ;  $0 \leq t/L \leq 0,005$ ;  $1,1 \leq h/T \leq 1,4$ ) oraz uwzględniając charakterystyki manewrowe statków ustalone podczas prób wodnych, jak również biorąc pod uwagę aktualne wartości zakłóceń zewnętrznych, ostrzeżenia nawigacyjne oraz inne dane dostępne na statku podczas normalnej jego eksploatacji, wzory uproszczone [8] na długość  $D_D$ , szerokość  $S_D$ , głębokość  $G_D$  i wysokość  $W_D$  domeny statku przybiorą następującą postać:

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

$$W_D = H_C + (n-2) \cdot T_{\max} + |t| + 0,66 \cdot m \cdot h_f + k \cdot \left( \frac{1}{30} \cdot C_B \cdot \left( \frac{BT}{bh - BT} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot v_d^{2,08} \right) \quad [\text{m}] \quad (4)$$

$$D_{Ddz} = p \cdot (L_{RD} + \Delta L) + 30,8666 \cdot t_r v_d \cos(KDd - KR) + r_D \left[ s_D PC_{\max} + 30,8666 \cdot t_m v_p \cos(K_p - KR) \right] \quad [\text{m}] \quad (5)$$

$$D_{Dr} = p \cdot (L - L_{RD} + \Delta L) + 30,8666 \cdot t_r v_d \cos(KDd - KR) \quad [\text{m}] \quad (6)$$

$$S_{Dp} = p \cdot \left[ \frac{B_c}{2} + \Delta B \right] + 30,8666 \cdot t_r v_d \sin(KDd - KR) + r_s \left[ s_s \cdot PB_{\max} + 30,8666 \cdot t_m v_p \sin(K_p - KR) \right] \quad [\text{m}] \quad (7)$$

$$S_{Dl} = p \cdot \left[ \frac{B_c}{2} + \Delta B \right] + 30,8666 \cdot t_r v_d \sin(KDd - KR) + r_s \left[ s_s PU_{\max} + 30,8666 \cdot t_m v_p \sin(K_p - KR) \right] \quad [\text{m}] \quad (8)$$

gdzie:

- $G_D$  – głębokość domeny liczona od linii zanurzenia statku w dół [m],
- $W_D$  – wysokość domeny liczona od linii zanurzenia statku w górę [m],
- $D_{Ddz}$  – długość domeny liczona od środka układu współrzędnych (pozycja anteny radarowej, mostek nawigacyjny) do jej granicy w kierunku przed dziobem [m],
- $D_{Dr}$  – długość domeny liczona od środka układu współrzędnych do jej granicy w kierunku za rufę [m],
- $S_{Dl}$  – szerokość domeny statku liczona od wzdłużnej osi symetrii w kierunku na lewą burtę [m],
- $S_{Dp}$  – szerokość domeny statku liczona od wzdłużnej osi symetrii w kierunku na prawą burtę statku [m],
- $B, L, T, t, H_C, C_B$  – parametry statku: szerokość  $B$  [m], długość  $L$  [m], zanurzenie  $T$  [m], trym (przegłębienie)  $t = 0$  [m], wysokość całkowita statku od stępki do masztu  $H_C$  [m], wysokość nadwodna  $H_N = H_C - T_{\max}$  [m]; współczynnik pełnotliwości kadłuba  $C_B$ ,
- $KDd, v_d$  – kąt drogi nad dnem [°] oraz prędkość statku nad dnem [w],
- $KR$  – kurs rzeczywisty [°],
- $b, h, h_f$  – parametry akwenu: głębokość  $h$  [m], szerokość  $b$  [m], wysokość fali [m],

- $v_p, K_p$  – odpowiednio prędkość prądu w węzłach [w] oraz kierunek prądu w stopniach [°],  
 $n, m, k$  – współczynniki liczbowe [8].

W niniejszym opracowaniu przyjęto:

$$n = 1,1; m = 0,5; k = 1.$$

- $L_{RD}$  – odległość umiejscowienia anteny radarowej od dziobu statku liczona horyzontalnie pomiędzy punktami rzutowania na płaszczyznę wodnicy pływania anteny radarowej oraz najdalej wysuniętych w kierunku dziobu punktów kadłuba statku [m],
- $p$  – współczynnik liczbowy ( $1,0 \leq p \leq 2,0$ ) zależny od szkodliwości ładunku, jaki przewozi statek na swoim pokładzie. Współczynnik ten zwiększa margines bezpieczeństwa rezerwy nawigacyjnej statku na wypadek zaistnienia nieprzewidzianych i wyjątkowych sytuacji nawigacyjnych prowadzących w efekcie do katastrofy lub skażenia środowiska wodnego,
- $r_D, r_S$  – współczynniki korygujące długość ( $r_D$ ) i szerokość ( $r_S$ ) domeny statku ( $r_D$  i  $r_S \in [0,2]$ ) w zależności od jego uprzywilejowania według MPDM,
- $s_D, s_S$  – bezwymiarowe współczynniki korygujące parametry  $PC$  i  $PB$  w przypadku wystąpienia innych warunków zewnętrznych (z wyłączeniem prądu) od tych, jakie obserwowano podczas wykonywania prób manewrowych statku [–],
- $PC_{max}$  – maksymalne czołowe przemieszczenie statku (wzdłuż osi  $OX$ ) powstałe podczas manewru zmiany kursu o  $090^\circ$  względem kursu początkowego lub podczas manewru zatrzymywania statku w ruchu [m],
- $PB_{max}$  – maksymalne przemieszczenie boczne (poprzeczne) statku (wzdłuż osi  $OY$ ) powstałe podczas manewru zmiany kursu o  $180^\circ$  względem kursu początkowego lub podczas manewru zatrzymywania statku w ruchu [m],
- $PU_{max}$  – przemieszczenie ujemne statku w stronę przeciwną niż burta, na którą wychylono ster [m],
- $B_C$  – pozorna szerokość pasa ruchu statku [m] przy dryfie od wiatru równym  $\alpha$  [°], znosie od prądu równym  $\beta$  [°], kącie oscylacji poziomych (w tym myszkowania) równym  $\Delta$  [°],
- $$B_C = L \cdot \sin(\alpha + \beta + \Delta) + B \cdot \cos(\alpha + \beta + \Delta) \quad [m] \quad (9)$$
- $\Delta L$  – przyrost długości domeny statku równy błędowi kierunkowemu  $M_{OX}$  sumarycznej elipsy błędów  $\delta_x(B_i)$  wszystkich czynników  $B_i$  wpływających na  $D_D$ , obliczony z poziomem ufności  $P = 95\%$  ( $C = 2,44$ ),  $\Delta L = 15$  m,
- $\Delta B$  – przyrost szerokości domeny statku, równy błędowi kierunkowemu  $M_{OY}$  sumarycznej elipsy błędów  $\delta_y(B_i)$  wszystkich czynników  $B_i$  wpływających na  $S_D$ , obliczony z poziomem ufności  $P = 95\%$  ( $C = 2,44$ ),  $\Delta B = 15$  m,
- $t_m$  – czas trwania manewru zatrzymywania statku lub cyrkulacji [min], odczytany z danych manewrowych statku (karty pilotowej),
- $t_r$  – czas reakcji, czyli czas potrzebny na ocenę sytuacji nawigacyjnej statku i wydanie właściwej komendy na ster. Sugerując się przesłankami natury praktycznej,  $t_m$  przyjęto za równy 0,5 minuty.

Tabela 1

Wartości liczbowe współczynnika  $n$  funkcji zależnej od typu akwenu i rodzaju dna [8]

$n$	Typ akwenu (TA)	Rodzaj dna (RD)
1,1	akwenu portowe	muliste
1,15	redy, podejścia do portów	piaszczyste
>1,2	akwenu odslonięte	skaliste

Tabela 2

Wartości liczbowe współczynnika  $m$  w funkcji zależnej od parametrów statku i fali [8]

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

Tabela 3

Wartości liczbowe współczynnika  $k$  funkcji zależnej od parametrów statku i akwenu [8]

$k$	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 pełnotłiwie 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 pełnotłiwie od zalecanych w metodzie	Niezgodne z przyjętą metodą obliczeń (parametry akwenu mniejsze od zalecanych), żegluga poza osią kanału, wyprzedzanie lub mijanie w kanale

Tabela 4

Przykładowe wartości współczynnika  $p$   
w funkcji szkodliwości przewożonego ładunku [8]

Wartości współczynnika $p$	Cechy ładunku przewożonego statkiem
1,0	brak ładunku na statku (statek pod balastem), ładunek nieszkodliwy (neutralny dla ludzi i środowiska)
1,5	ładunek o dużej szkodliwości dla ludzi i środowiska, np. substancje łatwopalne, ropa naftowa, gaz ziemny
2,0	ładunek bardzo szkodliwy dla ludzi i środowiska, np. substancje radioaktywne, żrące środki chemiczne, substancje wybuchowe

Tabela 5

Przykładowe wartości współczynników  $r_D$  i  $r_S$  [8]

Wartości współczynników		Sytuacja nawigacyjna lub rodzaj uprzywilejowania
$r_D$	$r_S$	
0	0	statek na mieliźnie, statek na kotwicy
1,5	1,5	statek o ograniczonej zdolności manewrowej (z wyjątkiem statku oczyszczającego akwen z min), statek zajęty połowem
2,0	2,0	statek, który nie odpowiada za swoje ruchy, statek żaglowy
2,0	1,0	statek ograniczony swym zanurzeniem

Tabela 6

Zależność wartości taktycznej średnicy cyrkulacji od wartości kąta wychylenia steru  
oraz odpowiadające jej wartości współczynników  $s_D$  i  $s_S$  [8]

Kąt wychylenia steru $\alpha$ [°]	$D_t$ w procentach $D_{t-CN}$ przy $\alpha = 35^\circ$	Wartości współczynników $s_D$ i $s_S$
35	100	1,00
30	110	1,10
25	132	1,32
20	140	1,40
15	165	1,65
10	200	2,00
5	235	2,35

Tabela 7

Wpływ głębokości akwenu na średnicę cyrkulacji taktycznej, wartość kąta dryfu, prędkość liniową i kątową na cyrkulacji ustalonej, położenie bieguna obrotu względem środka ciężkości statku oraz wartość współczynników  $s_D$  i  $s_S$  [8]

$h_o / T$	$D_t$ [%]	Współczynniki $s_D$ i $s_S$	$\beta_C$ [%]	$v_c$ [%]	$\varpi_c$ [%]			PG [%]
					$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	
2,0	100	1,00	100	100	89	86	83	96
1,8	104	1,04	91	100	85	83	79	93
1,6	115	1,15	80	101	80	76	73	86
1,4	132	1,32	63	106	73	70	68	74
1,2	155	1,55	37	115	55	55	55	51
1,1	168	1,68	18	125	--	--	--	19

**Uwaga:** 100% wartości  $\varpi_c$  oraz PG ustalono dla stosunku  $h_o / T = 5,0$ .

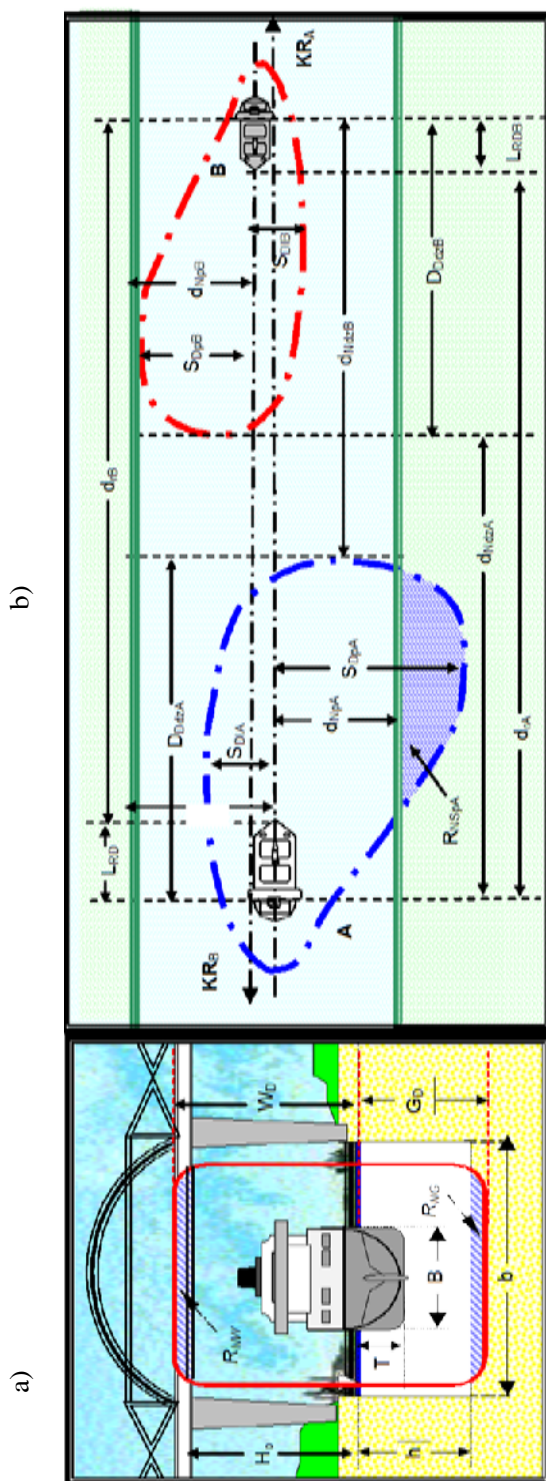
Na podstawie powyższych informacji, wykorzystując model przestrzenny domeny statku, podjęto próbę określenia wartości ryzyka nawigacyjnego  $R_N$  – wzory (10)÷(13) dla przykładowych statków (jednostek żeglugi śródlądowej), nawigujących w akwenu ograniczonym szerokością kanału żeglownego  $b$ , głębokością akwenu  $T$  oraz prześwitem wody pod mostem  $H$  (rys. 1).

Z definicji domeny (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 rozważaniach pomija się możliwość zaistnienia innych wypadków morskich niż te, które związane są bezpośrednio z ruchem statku i jego nawigacją (żeglugą).

Parametry domen  $G_D$  i  $W_D$  obliczono za pomocą wzorów (3) i (4) dla przykładowych czterech statków (jednostek) żeglugi śródlądowej:

- **statek A – barka towarowa duża** o parametrach:  $L = 90$  m;  $B = 12$  m;  $T = 3,80$  m;  $t = 0$ ;  $T_{\max} = 3,90$  m przy  $\alpha \cong \pm 1^\circ$  i  $4,11$  m przy  $\alpha \cong \pm 3^\circ$ ;  $H_C = 9,10$  m;  $C_B = 0,98$ ;
- **statek B – barka towarowa mała** o parametrach:  $L = 75$  m;  $B = 9,5$  m;  $T = 1,80$  m;  $t = 0$ ;  $T_{\max} = 1,88$  m przy  $\alpha \cong \pm 1^\circ$  i  $2,05$  m przy  $\alpha \cong \pm 3^\circ$ ;  $H_C = 6,20$  m;  $C_B = 0,98$ ;
- **statek C – prom pasażerski** o parametrach:  $L = 60$  m;  $B = 12$  m;  $T = 2,20$  m;  $t = 0$ ;  $T_{\max} = 2,30$  m przy  $\alpha \cong \pm 1^\circ$  i  $2,51$  m przy  $\alpha \cong \pm 3^\circ$ ;  $H_C = 7,0$  m;  $C_B = 0,80$ ;
- **statek D – jacht żaglowy motorowodny** o parametrach:  $L = 25$  m;  $B = 4,2$  m;  $T = 2,80$  m;  $t = 0$ ;  $T_{\max} = 2,84$  m przy  $\alpha \cong \pm 1^\circ$  i  $2,85$  m przy  $\alpha \cong \pm 3^\circ$ ;  $H_C = 0,80$  m;  $C_B = 0,62$ .

Parametry domen obliczone według wzorów (3) i (4) dla przykładowych jednostek śródlądowych oraz statków morsko-rzecznych A, B, C, D dla warunków nawigacyjnych dogodnych i niedogodnych zestawiono w tabeli 8.



Rys. 1. Zobrazowanie ryzyka nawigacyjnego statku przechodzącego: a) płytkim kanałem pod mostem, b) wąskim torem wodnym podczas sytuacji spotkania z innym statkiem

Źródło: G. Rutkowski, opracowanie własne.



Tabela 8

Parametry domen  $G_D$  i  $W_D$  obliczone wzorami (3) i (4)  
dla przykładowych statków śródlądowych oraz morsko-rzecznych [8]

Statek A – barka towarowa duża					Statek B – barka towarowa mała				
Parametry					Parametry				
$L = 90$ m; $B = 12$ m; $T = 3,80$ m; $t = 0$ ; $T_{\max} = 3,90$ m przy $\alpha \cong \pm 1^\circ$ i $4,11$ m przy $\alpha \cong \pm 3^\circ$ ; $H_C = 9,10$ m; $C_B = 0,98$ ; $b = 50$ m; $h_1 = 5$ m, $h_{f1} = 0,30$ m; $Vp_1 = 1,5$ w (dogodne); $h_2 = 4,5$ m, $h_{f2} = 0,60$ m; $Vp_1 = 2,5$ w (niedogodne)					$L = 75$ m; $B = 9,5$ m; $T = 1,80$ m; $t = 0$ ; $T_{\max} = 1,88$ m przy $\alpha \cong \pm 1^\circ$ i $2,05$ m przy $\alpha \cong \pm 3^\circ$ ; $H_C = 6,20$ m; $C_B = 0,98$ ; $b = 50$ m; $h_1 = 5$ m, $h_{f1} = 0,30$ m; $Vp_1 = 1,5$ w (dogodne); $h_2 = 4,5$ m, $h_{f2} = 0,60$ m; $Vp_1 = 2,5$ w (niedogodne)				
Vd [w]	Warunki dogodne		Warunki niedogodne		Vd [w]	Warunki dogodne		Warunki niedogodne	
	$T_{\max 1} = 3,90$ m; $H_{N1} = 5,20$ m		$T_{\max 2} = 4,11$ m; $H_{N2} = 4,99$ m			$T_{\max 1} = 1,88$ m; $H_{N1} = 4,32$ m		$T_{\max 2} = 2,05$ m; $H_{N2} = 4,15$ m	
	$G_{D1}$ [m]	$W_{D1}$ [m]	$G_{D2}$ [m]	$W_{D2}$ [m]		$G_{D1}$ [m]	$W_{D1}$ [m]	$G_{D2}$ [m]	$W_{D2}$ [m]
0	4,39	5,59	4,72	5,40	0	2,17	4,51	2,45	4,36
3	4,51	5,71	4,86	5,54	3	2,23	4,56	2,52	4,43
6	4,90	6,10	5,30	8,98	6	2,42	4,75	2,73	4,64
9	5,58	6,77	6,07	6,75	9	2,74	5,08	3,10	5,01
12	6,55	7,74	7,18	7,86	12	3,21	5,54	3,64	5,55
Statek C – prom pasażerski					Statek D – jacht żaglowy motorowodny				
Parametry					Parametry				
$L = 60$ m; $B = 12$ m; $T = 2,20$ m; $t = 0$ ; $T_{\max} = 2,30$ m przy $\alpha \cong \pm 1^\circ$ i $2,51$ m przy $\alpha \cong \pm 3^\circ$ ; $H_C = 7,0$ m; $C_B = 0,80$ ; $b = 50$ m; $h_1 = 5$ m, $h_{f1} = 0,30$ m; $Vp_1 = 1,5$ w (dogodne); $h_2 = 4,5$ m, $h_{f2} = 0,60$ m; $Vp_1 = 2,5$ w (niedogodne)					$L = 25$ m; $B = 4,2$ m; $T = 2,80$ m; $t = 0$ ; $T_{\max} = 2,84$ m przy $\alpha \cong \pm 1^\circ$ i $2,85$ m przy $\alpha \cong \pm 3^\circ$ ; $H_C = 10,80$ m; $C_B = 0,62$ ; $b = 50$ m; $h_1 = 5$ m, $h_{f1} = 0,30$ m; $Vp_1 = 1,5$ w (dogodne); $h_2 = 4,5$ m, $h_{f2} = 0,60$ m; $Vp_1 = 2,5$ w (niedogodne)				
Vd [w]	Warunki dogodne		Warunki niedogodne		Vd [w]	Warunki dogodne		Warunki niedogodne	
	$T_{\max 1} = 2,30$ m; $H_{N1} = 4,70$ m		$T_{\max 2} = 2,51$ m; $H_{N2} = 4,49$ m			$T_{\max 1} = 2,84$ m; $H_{N1} = 7,96$ m		$T_{\max 2} = 2,91$ m; $H_{N2} = 7,89$ m	
	$G_{D1}$ [m]	$W_{D1}$ [m]	$G_{D2}$ [m]	$W_{D2}$ [m]		$G_{D1}$ [m]	$W_{D1}$ [m]	$G_{D2}$ [m]	$W_{D2}$ [m]
0	2,63	4,93	2,96	4,74	0	3,22	8,25	3,39	8,18
3	2,70	4,99	3,04	4,82	3	3,25	8,27	3,42	8,21
6	2,91	5,20	3,28	5,06	6	3,34	8,36	3,52	8,31
9	3,28	5,57	3,70	5,48	9	3,49	8,52	3,69	8,48
12	3,80	6,09	4,31	6,09	12	3,71	8,74	3,93	8,72

W obliczeniach przyjęto parametry akwenów śródlądowych dostępne w locjach, na mapach nawigacyjnych akwenu, wzbogacone o dane z wodowskazów oraz pomiary hydrograficzne dostępne w Urzędzie Morskim w Gdyni [5], [10].

W opracowaniu korzystano również z danych eksperymentalnych, uzyskanych podczas prób wodnych rejestrowanych na jednostkach śródlądowych, spływających Wisłą w okresie maja-lipca 2008 roku w ramach współpracy z flisakami z Ligi Morskiej i Rzecznej.

Określenie ograniczeń bezpieczeństwa żeglugi dokonano dla przykładowych jednostek śródlądowych (A, B, C i D) dla warunków nawigacyjnych:

- dogodnych – widzialność dobra, woda spokojna  $h_f \leq 0,3$  m, wiatr umiarkowany 3–4°B, prąd o prędkości  $v_p \leq 1,5$  w i kierunku zgodnym z kierunkiem toru wodnego, pionowe oscylacje lustra wody określone względem zera mapy (MSL), nieprzekraczające  $\pm 0,10$  m, gęstość wody  $\gamma = 1,000$  g/cm<sup>3</sup>, dryf statku nieprzekraczający  $\pm 1^\circ$ , maksymalne myszkowanie do  $\pm 1^\circ$ , przechył boczny  $\alpha$  do  $\pm 1^\circ$ ;
- niedogodnych – widzialność umiarkowana, miejscami ograniczona, wody nieco wzburzone ( $h_f \approx 0,6$  m), wiatr do 6–7°B, prąd o prędkości  $v_p \approx 2,5$  w z zawirowaniami prostopadłymi do osi toru, pionowe oscylacje lustra wody określone względem zera mapy (MSL) do  $\pm 0,50$  m, gęstość wody  $\gamma = 1,000$  g/cm<sup>3</sup>, dryf statku do  $\pm 2^\circ$ , myszkowanie do  $\pm 2^\circ$ , przechył boczny  $\alpha$  do  $\pm 3^\circ$ .

Zgodnie z [8] do analizy ryzyka nawigacyjnego  $R_{NG}$  względem obiektów podwodnych wykorzystano zależność (10), do analizy zaś ryzyka nawigacyjnego  $R_{NW}$  względem obiektów nadwodnych (rys. 1) wykorzystano zależność (11):

$$R_{NG} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } h > G_D \\ \frac{G_D - h}{G_D - T_{\max}} & \text{gdy } T_{\max} < h \leq G_D \\ 1 & \text{gdy } h \leq T_{\max} \end{cases} \quad [-] \quad (10)$$

$$R_{NW} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } H_o > W_D \\ \frac{W_D - H_o}{W_D - H_N} & \text{gdy } H_N < H_o \leq W_D \\ 1 & \text{gdy } H_o \leq H_N \end{cases} \quad [-] \quad (11)$$

gdzie:

- $R_{NG}$  – składowa pionowa ryzyka nawigacyjnego od zachowania rezerwy głębokości, lub krócej ryzyko od zachowania głębokości [-],
- $R_{NW}$  – składowa pionowa ryzyka nawigacyjnego od zachowania rezerwy wysokości, lub krócej ryzyko od zachowania wysokości [-],
- $H_o$  – wysokość zawieszenia obiektu nad wodą (prześwit wody pod mostem) [m],
- $H_N$  – wysokość nadwodnej części kadłuba [m],
- $G_D$  – głębokość domeny statku liczona od linii zanurzenia w dół [m],
- $W_D$  – wysokość domeny statku liczona od linii zanurzenia w górę [m],
- $h$  – najmniejsza głębokość wody w kanale [m],
- $T_{\max}$  – maksymalne zanurzenie statku [m].

Z definicji ryzyka nawigacyjnego [9] wiadomo, że jeżeli wartość ryzyka pochodzącego od czynników  $A_i$  (obiektów) wynosi 0, oznacza to pełne bezpieczeństwo nawigacyjne względem tych czynników (obiektów). Zgodnie zatem z zależnością (10) warunek  $h > G_D$  może 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 ( $h \leq T_{\max}$ ), to wówczas zgodnie z zależnością (10) realizacja podróży morskiej może okazać się niemożliwa 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 uderzenia (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  $R_{NG} \in (0,1)$ , co jasno wyraża część środkowa zależności (10).

Analogicznie w płaszczyźnie poziomej (rys. 1), składowe  $R_{NDdz}$  i  $R_{NDr}$  ryzyka nawigacyjnego  $R_N$  (składowe poziome ryzyka nawigacyjnego od zachowania rezerwy długości lub odległości bezpiecznej odpowiednio przed dziobem i za rufą statku albo krócej – ryzyko od zachowania bezpiecznej odległości) można przedstawić za pomocą następujących równań:

$$R_{NDdz} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } d_{Ndz} > D_{Ddz} \\ \frac{D_{Ddz} - d_{Ndz}}{D_{Ddz} - L_{RD}} & \text{gdy } L_{RD} < d_{Ndz} \leq D_{Ddz} \\ 1 & \text{gdy } d_{Ndz} \leq L_{RD} \end{cases} \quad [-] \quad (12)$$

oraz

$$R_{NDr} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } d_{Nr} > D_{Dr} \\ \frac{D_{Dr} - d_{Nr}}{D_{Dr} - (L - L_{RD})} & \text{gdy } (L - L_{RD}) < d_{Nr} \leq D_{Dr} \\ 1 & \text{gdy } d_{Nr} \leq (L - L_{RD}) \end{cases} \quad [-] \quad (13)$$

Interpretacja wzorów (12) i (13) będzie przebiegać podobnie, jak przy omawianiu pionowej rezerwy nawigacyjnej statku. Stąd zgodnie z zależnością (12) warunek  $d_{Ndz} > D_{Ddz}$  oraz (13) warunek  $d_{Nr} > D_{Dr}$  będzie gwarancją bezpiecznej żeglugi statku względem obiektów wykrytych odpowiednio przed dziobem i za rufą statku. Z analizy wzoru (12) można ustalić również, iż wartość ryzyka nawigacyjnego  $R_{NDdz}$ , zawarta w przedziale  $R_{NDdz} \in (0,1)$ , pojawi się dopiero wówczas, gdy odległość  $d_{Ndz}$  okaże się równa lub mniejsza od długości domeny  $D_{Ddz}$ . Przy czym zaistnienie warunku  $d_{Ndz} < L_{RD}$  oznaczać będzie już zaistnienie

kolizji lub pewne prawdopodobieństwo jej zaistnienia (sytuacja wątpliwa dotyczy tylko obiektów ruchomych, mających własną domenę, o której wartość zmniejszono parametr  $d_{Ndz}$ ).

Analogicznie wyróżniając składowe ryzyka nawigacyjnego  $R_{NS}$ , określone względem obiektów położonych po lewej  $R_{NSl}$  i po prawej  $R_{NSp}$  burcie statku (składowe ryzyka nawigacyjnego od zachowania rezerwy szerokości odpowiednio po lewej i prawej burcie statku lub krócej – ryzyko od zachowania szerokości), można zapisać następujące równania:

$$R_{NSl} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } d_{NI} > S_{DI} \\ \frac{S_{DI} - d_{NI}}{S_{DI} - 0,5B} & \text{gdy } \frac{B}{2} < d_{NI} \leq S_{DI} \\ 1 & \text{gdy } d_{NI} \leq \frac{B}{2} \end{cases} \quad [-] \quad (14)$$

oraz

$$R_{NSp} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } d_{Np} > S_{Dp} \\ \frac{S_{Dp} - d_{Np}}{S_{Dp} - 0,5B} & \text{gdy } \frac{B}{2} < d_{Np} \leq S_{Dp} \\ 1 & \text{gdy } d_{Np} \leq \frac{B}{2} \end{cases} \quad [-] \quad (15)$$

Analizę ryzyka nawigacyjnego przeprowadzono dla przykładowych statków manewrujących na wyznaczonych torach wodnych dróg śródlądowych rejonu Wisły i Zalewu Wiślanego, czyli w akwenach ograniczonych szerokością, głębokością i wysokością nadwodną podczas panowania przeciętnych (dogodnych) i niedogodnych (niekorzystnych) warunków hydrometeorologicznych oraz innych zakłóceń ruchu.

### 3. WNIOSKI

Analizując rynek turystyczny w Europie, trzeba zdawać sobie sprawę, iż Europa Zachodnia dysponuje przynajmniej 7 milionami jachtów żaglowych i motorowych, z czego większość przypada na Francję, Niemcy, kraje Beneluksu. Modernizacja dróg śródlądowych E70 oraz E40 umożliwiłaby zatem rozwój handlu i turystyki od rejonu Wrocławia, poprzez Wielkopolskę, Mazury, Pojezierze Ostródzko-Ławskie po Zalew Wiślany.

Ze względu na zaniedbania i brak inwestycji wykorzystanie Wisły jako śródlądowej drogi wodnej jest niemożliwe. Na odcinku ponad 500 km ma ona

klasę zaledwie Ib, tam zaś, gdzie dorównuje klasom międzynarodowym, odcinki są tak krótkie, że transport staje się nieekonomiczny. Jednostki o zanurzeniu powyżej 0,5 m mogą obecnie dotrzeć do Warszawy. Będą jednak miały trudności z dotarciem do Krakowa czy na Mazury. Według ekspertów [1, 3, 5, 10], należy zatem udrożnić drogi wodne oraz rozwiązać kwestię zbyt niskich mostów. Mosty na Dolnej Wiśle mają prześwity, pozwalające na modernizację drogi wodnej do klasy IV, ich wartości wahają się od 5,17 – Toruń, 6,48 – Włocławek, 6,79 – Kieźmark. Most w Toruniu stanowi jedyny problem, gdyż wymagany dla klasy IV prześwit wynosi 5,25 m.

Według standardów europejskich szlaki turystyczne (motorowodne) powinny posiadać klasę przynajmniej Ib lub II. Wisła od stopnia wodnego Przewóz do Płocka ma klasę Ib, co pozwala na nawigację barkami do ładowności 180 ton. Odcinek Płock-Włocławek sklasyfikowany jest jako Vb (barki 1500–3000 ton), jednak ze względu na długość odcinka przewóz towarowy nie istnieje (jest nieopłacalny). Droga Włocławek-Ciechocinek pozwala na transport barkami do 180 ton, ale odcinek ten jest niebezpieczny dla nawigacji ze względu na liczne przemiały. Drogę Ciechocinek-Tczew obsługują barki do 500 ton. Utrudnieniem są tam jednak niskie stany wody powstałe w wyniku susz. Odcinek Tczew-Gdańsk jest zaś zbyt krótki, aby był opłacalny. Ponadto barki o nośności 1000–1200 ton mają utrudnione wejście na Bałtyk ze względu na nieuregulowane ujście Wisły – niestabilny szlak żeglowny na Przekopie Wisły.

Nowy przekop przez Mierzę Wiślaną do Zatoki Gdańskiej wydaje się zatem bardzo istotny. Mógłby on nie tylko skrócić trasę wodną do portów śródlądowych, takich jak Elbląg, Tolkmicko, Frombork, ale przede wszystkim otworzyć ten rejon na Europę w myśl zasady *from road to sea*. Ukończenie powyższej inwestycji wzmogłoby również rozwój handlu i turystyki w rejonie, uniezależniając aspekty ekonomiczne od aspektów natury politycznej. Ponadto trasa wodna na Wiśle mogłaby w znacznym stopniu odciążać transport drogowy, a w szczególności drogę nr 7 Warszawa-Gdańsk, i stać się jednocześnie alternatywą dla budowanej obecnie autostrady A1 (Północ-Południe).

Kolejnym ważnym aspektem w strukturach transportu śródlądowego jest modernizacja międzynarodowej drogi wodnej **E70** (z Antwerpii do Kaliningradu). Polski odcinek trasy E70 **Wisła-Odra** ma być zmodernizowany, aby osiągnąć klasę III do roku 2020, co pozwoli pływać na tej trasie barkom o nośności 700 ton. Umożliwi to przede wszystkim uruchomienie transportu kontenerowego na trasie o opłacalnej długości, a także transportu kombinowanego rzeczno-morskiego. Dzięki temu wzrosną możliwości oraz ranga portów w Gdańsku, Gdyni i Elblągu. W chwili obecnej wykorzystuje się żeglugę na odcinkach tylko lokalnie, a ogranicza się ona głównie do przewozu piasku i żwiru, choć sporadycznie coraz częściej instalowane są również lokalne linie pasażerskie.

**Nieszawa** – aby zapobiec katastrofie związanej z erozją dna poniżej zapory we Włocławku 22 grudnia 2000 roku Sejm RP uchwalił decyzję o budowie stopnia wodnego w Nieszawie, który jednocześnie poprawi warunki żeglowne na Wiśle.

Port rzeczny **Bydgoszcz** stanowi naturalne skrzyżowanie dwóch ważnych dróg wodnych w Europie: E40 z Gdańska do Odessy oraz E70 z Kaliningradu

do Antwerpii. Ze względu na niską klasę odcinka pomiędzy Odrą a Wisłą oraz Wisłą a Bugiem nie można uruchomić na nim transportu wielkoskalowego. Planowe jest podniesienie do roku 2020 tego odcinka do poziomu klasy III, aby mogły poruszać się na nim barki o wyporności przynajmniej 700 ton.

**Nogat i Szarpawa** są sporadycznie wykorzystywane przez barki o nośności 500 ton. Utrudnienie stanowi most dla pieszych do zamku w Malborku (Nogat) oraz brak obrotnicy przy moście w Drewnicy (Szarpawa).

Pogłębienie i udroźnienie kanałów wodnych w Delcie Wisły i na Zalewie Wiślanym w znacznym stopniu umożliwiłoby zwiększenie aktywności gospodarczej gmin, a w szczególności rozwój handlu i turystyki. Rozwój turystyki na drogach śródlądowych nie potrzebuje takich nakładów, jak transport towarowy, wymaga jednak rozbudowanej infrastruktury typowej dla turystyki – hotele, kempingi, mariny, przystanie itp. Elementy przyciągające turystę w rejonie Dolnej Wisły są to wartości przyrodnicze, infrastruktura miejska, obiekty zabytkowe, średniowieczne zamki oraz produkcje behawioralne, takie jak rekonstrukcje historyczne, festyny itp.

Reasumując, do głównych zadań związanych z zagospodarowaniem turystycznym szlaków wodnych (*Polish Waterways*) należy więc zaliczyć:

- pogłębienie szlaków wodnych;
- usuwanie naturalnych i sztucznych przeszkód.
- uporządkowanie, liberalizację i dostosowanie przepisów do realiów europejskich;
- rozbudowę sieci marin, przystani i kempingów;
- rozwój kartografii szlaków wodnych, wprowadzenie map elektronicznych;
- promocję regionów – udroźnienie dróg wodnych w celu ułatwienia rozwoju turystyki motorowodnej, szlaki turystyczne powinny posiadać klasę przynajmniej Ib lub II;
- rozwiązanie kwestii zbyt niskich mostów.

## LITERATURA

1. Bąbczyńska-Jelonek Z., *Zapomniany sektor*, „Namiary na Morze i Handel”, nr 23/2006.
2. Canadian Shipowners' Association – Teekay Vancouver, Marpol Annex VI Consultation Meeting, Washington, DC, February 2006.
3. Czerny M., *Materiały Zarządu Głównego PTTK*, Komisja Turystyki Żeglarskiej.
4. Luks K., *Otworzyć Zalew na Europę*, „Namiary na Morze i Handel”, nr 23/2006.
5. Materiały Urzędu Morskiego w Gdyni, Intrasea I, Intrasea II, Gdynia 2007.
6. Nikolayev V.K., *The Purposes, Objectives and Principles of Development of Inland Water Transportation In Russia In The Future*, Head of The Volga-Baltic State Basin Board of Waterways and Navigation, Inland Waterway Vision 2020, Helsinki 2004.
7. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 7 maja 2002 roku w sprawie klasyfikacji dróg wodnych.
8. Rutkowski G., *Modelowanie domeny statku w procesie manewrowania w ograniczonych akwenach*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Prace Naukowe „T”, Warszawa 2001.

9. Rutkowski G., *Zastosowanie modelu domeny do oceny bezpieczeństwa nawigacyjnego statków poruszających się w akwenach ograniczonych*, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Prace Naukowe „T”, Warszawa 2001.
10. Siekanowicz R., Stromski L., *Perspektywy żeglugi bliskiego zasięgu – „Short Sea Shipping” w połączeniu ze środkami śródlądowego transportu wodnego i turystyki w obszarze Dolnej Wisły w aspekcie międzynarodowej drogi wodnej E70*, Intrasea II, Gdynia 2007.
11. *Strategia Gospodarki Wodnej*, Ministerstwo Środowiska, Warszawa, marzec 2006.
12. Załącznik 1 do Rozporządzenia nr 77 Rady Ministrów z dnia 18 czerwca 2002 roku.
13. Załącznik 3 do Rozporządzenia nr 77 Rady Ministrów z dnia 18 czerwca 2002 roku.
14. *Żegluga śródlądowa w Polsce w latach 2001–2005*, Główny Urząd Statystyczny, Wrocław 2006.

Źródła internetowe:

15. <http://inlandwaterways.lrh.usace.army.mil/>.
16. <http://www.inlandnavigation.org>.
17. <http://www.intrasea.org>.
18. [http://www.kolej.most.org.pl/transport\\_w\\_liczbach/index.htm](http://www.kolej.most.org.pl/transport_w_liczbach/index.htm).
19. <http://www.pfz.org.pl>.
20. <http://www.rzgw.gda.pl>.
21. <http://www.wisla.turystyka.pl/locja>.

## **LIMITATION OF SAFETY OF NAVIGATION ON THE BASE OF EXPERIMENTAL STUDY FOR INLAND AND SEA-RIVER VESSELS**

### *Summary*

*In this article authors describes limitations of safety of navigation especially of sea-river and inland vessels. The base of analysis of navigational risk are experimental study.*