

WPŁYW ZATOPIENIA POMIESZCZEŃ POKŁADU ŁODZIOWEGO NA STATECZNOŚĆ POCZĄTKOWĄ OKRĘTU SZKOLNEGO

Streszczenie

W referacie przedstawiono zagadnienia obliczeniowe stateczności okrętu szkolnego z zatopionymi przedziałami okrętowymi na pokładzie łodziowym. Określono algorytm obliczeń wysokości metacentrycznej z uwzględnieniem powierzchni swobodnej po zatopieniu wysoko położonych przedziałów okrętu szkolnego. Na podstawie wyników obliczeń przedstawionych w postaci tabelarycznej i graficznej sformułowano odpowiednie wnioski.

WSTĘP

Okręt jako złożony system techniczny składa się z licznej grupy środków technicznych, które mają znaczny wpływ na jego zdolność bojową. Uszkodzenia tych środków mogą wynikać z różnych przyczyn. Okręt jest złożonym systemem technicznym intensywnie eksploatowanym szczególnie podczas działań wojennych. Jego zdolność bojowa w głównej mierze jest uzależniona od środków bojowych, w które wyposażony jest okręt oraz od pozostałych środków technicznych zapewniających jego ruch [6].

Uszkodzenia tych środków powodują obniżenie zdolności bojowej okrętu. Praktyka morska wykazuje, że nawet wyposażone w nowoczesne środki techniczne floty wojenne borykają się z wypadkami i awariami. Z analizy statystycznej danych uzyskanych od Głównej Komisji ds. wypadków i awarii okrętowych MW RP wynika, że w latach 1985 – 2004 zarejestrowano łącznie 155 różnego rodzaju uszkodzeń okrętowych, co średnio daje ponad 7 wypadków na rok. Podczas pobytu okrętu na morzu znaczne zagrożenie dla jego bezpieczeństwa stanowi pożar. Rzadko powoduje on zatonięcie okrętu, jednak zniszczenia, jakie pozostawia są zazwyczaj bardzo poważne i jak zawsze, uzależnione od poziomu wyszkolenia załogi w zakresie obrony przeciwwawaryjnej. Źródłem pożaru podczas pokojowej eksploatacji okrętu są zazwyczaj zwarcia w instalacjach elektrycznych, awarie urządzeń i mechanizmów, samozapłon czystego tlenu w kontakcie z materiałami ropopochodnymi itp. Głównym środkiem gaśniczym stosowanym na okrętach jest zazwyczaj woda zaburtowa, która w dużych ilościach stanowi zagrożenie dla stateczności i niezatapialności okrętu. Dlatego w pracy główny nacisk położono na określenie wpływu zalania przedziałów wysoko położonych na położenie i bezpieczeństwo statecznościowe okrętu. Przedstawione w pracy wyniki obliczeń zawierają informacje o ilości wody w przedziale powodującej pogorszenie stateczności okrętu.

1. CHARAKTERYSTYKA OKRĘTU SZKOLNEGO

Wybrany do badań okręt szkolny jest okrętem flagowym zespołu jednostek szkolno badawczych naszej floty. Badany okręt podzielony jest dziesięcioma poprzecznymi grodziami wodoszczelnymi na 11 przedziałów wodoszczelnych usytuowanych na wręgach: 3, 16, 25, 35, 50, 60, 71, 80, 91, 101. Taki podział zapewnia zachowanie niezatapialności przy zatopieniu dwóch sąsiednich przedziałów za wyjątkiem zatopienia przedziału siłowni głównej i przedziału sąsiadującego.

Ponieważ okręt pływa w różnych akwenach morskich, więc i w zmiennych i niebezpiecznych warunkach pogodowych gdzie ryzyko

uszkodzeń jest duże, analiza stateczności awaryjnej po zatopieniu wysoko położonych pomieszczeń była zasadna.

Charakterystyka ogólna okrętu:

- wymiary główne:
 - długość całkowita:
 $L_c=72,20\text{m}$,
 - długość między pionami:
 $L_{pp}=L=64,20\text{m}$,
 - szerokość maksymalna:
 $B_{max}=12,00\text{m}$,
 - szerokość:
 $B=11,60\text{m}$,
 - wysokość boczna:
 $H=5,55\text{m}$.



Rys. 1. Okręt szkolny projektu 888 [9]

Obliczenia przeprowadzono dla wyporności pełnej bez obłodzenia. Stan ten charakteryzuje się następującymi wielkościami:

- wyporność:
 $D=1745,34\text{t}$,
- rzędna środka masy od płaszczyzny podstawowej:
 $z_G=4,31\text{m}$,
- zanurzenia rufy:
 $T_R=3,97\text{m}$,
- zanurzenie dziobu:
 $T_D=4,05\text{m}$,
- zanurzenie średnie:
 $T_{sr}=4,01\text{m}$,
- przegłębienie:
 $t=0,08\text{m}$,
- wysokość metacentryczna od płaszczyzny podstawowej:
 $z_M=5,44\text{m}$,

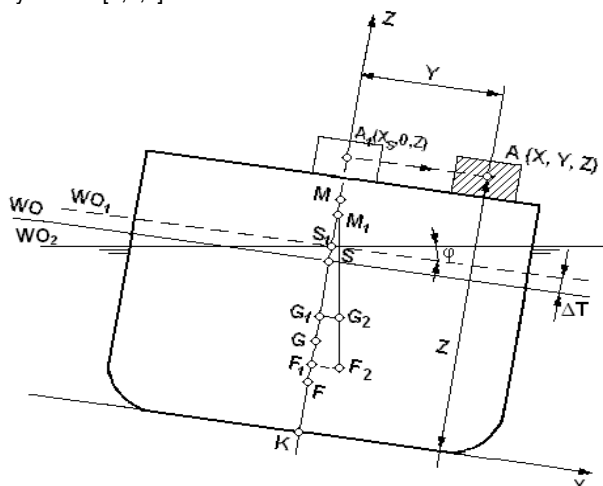
- wysokość metacentryczna:
GM=1,13m,
- prędkość: V=16,8w
- współrzędne środka masy:
 - $x_G=29,649m$ od pionu rufowego,
 - $y_G=-0,007m$ od płaszczyzny symetrii,
 - $z_G=4,314m$ od płaszczyzny podstawowej [1].

2. OBLICZENIA STATECZNOŚCI OKRĘTU

Wdarcie się wody do wnętrza kadłuba okrętu i zatopienie przedziału lub zbiornika pociąga za sobą zwiększenie zanurzenia okrętu, możliwość wystąpienia przechyłu i przegłębienia oraz zmianę stateczności. Zmiana ta może poprawić lub pogorszyć warunki pływania okrętu. W pewnych przypadkach występujące zmniejszenie stateczności może być tak duże, że może zagrozić bezpieczeństwu okrętu i załogi oraz może spowodować przewrócenie okrętu. Dla uniknięcia wypadków tego rodzaju konieczne jest sprawdzenie stateczności okrętu uszkodzonego i zastosowanie odpowiednich środków zaradczych przeciw zmniejszaniu się jej.

Zalanie wysoko położonego przedziału lub kilku przedziałów powoduje zawsze pogorszenie się stateczności okrętu. W konsekwencji może wystąpić przechył i przegłębienie okrętu, zmiana wysokości metacentrycznej oraz ramion prostujących.

W obliczeniach stateczności uwzględniono okręt o wyporności standardowej D, na który przyjęto masę m w punkcie A (X, Y, Z) jak na rysunku 2[1,2,3].



Rys. 2. Schemat położenia okrętu po przyjęciu masy m w punkcie A [1,2,3]

Początkowo założono przyjęcie masy, tak by jej środek znalazł się pionowo ponad środkiem powierzchni pola przekroju wodnicowego WO w punkcie $A_1(X_s, 0, Z)$. Można wówczas obliczyć [1,2,3]:
- przyrost zanurzenia według wzoru:

$$\Delta T = \frac{m}{\rho * F_{WO}} \quad (1)$$

- nową poprzeczną wysokość metacentryczną według wzoru:

$$\overline{G_1M_1} = \overline{GM} + \frac{m}{D+m} * \left(T + \frac{\Delta T}{2} - Z - \overline{GM} \right) \quad (2)$$

- nową wzdłużną wysokość metacentryczną według wzoru:

$$\overline{G_1M_{L1}} = \frac{m}{D+m} * \overline{GM_L} \quad (3)$$

W kolejnym etapie przesunięto masę z położenia urojonego na miejsce rzeczywiście zajmowane:

- w kierunku poprzecznym o odległość $e=Y-Y_1=Y-0=Y$,

- w kierunku wzdłużnym o odległość $l=X-X_s$.

Kąt przechyłu okrętu obliczono ze wzoru:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{m * Y}{(D+m) * \overline{G_1M_1}} \quad (4)$$

a przegłębienie okrętu ze wzoru:

$$\operatorname{tg} \Psi = \frac{m * (X - X_s)}{D * \overline{GM_L}} \quad (5)$$

Nowe zanurzenie dziobu i rufy określa się równaniami:

$$T_{d1} = T_d + \Delta T + \Delta T_d \quad (6)$$

$$T_{r1} = T_r + \Delta T + \Delta T_r \quad (7)$$

ostatecznie otrzymano:

$$T_{d1} = T_d + \frac{m}{\rho * F_{WO}} + \left(\frac{L}{2} - X_s \right) * \frac{m * (X - X_s)}{D * \overline{GM_L}} \quad (8)$$

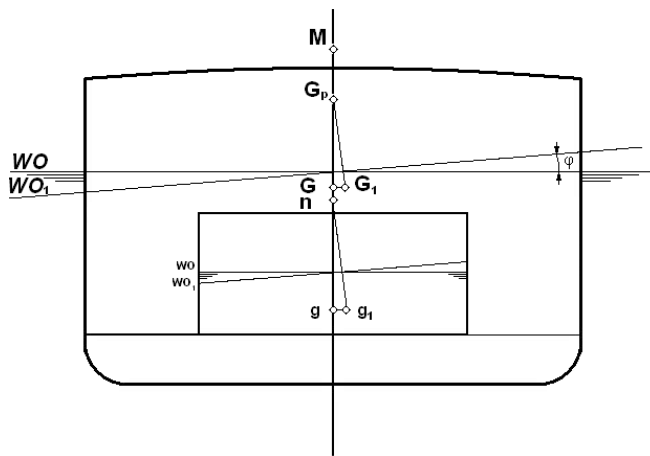
$$T_{r1} = T_r + \frac{m}{\rho * F_{WO}} + \left(-\frac{L}{2} - X_s \right) * \frac{m * (X - X_s)}{D * \overline{GM_L}} \quad (9)$$

3. WPŁYW SWOBODNEJ POWIERZCHNI NA STATECZNOŚĆ OKRĘTU

Występowanie swobodnej powierzchni cieczy po częściowym zatopieniu przedziału powoduje zawsze zmniejszenie wysokości metacentrycznej okrętu. Zmniejszenie to zależy m.in. od kształtu i wielkości tej powierzchni.

Określając wpływ swobodnej powierzchni cieczy na stateczność okrętu przechylnono okręt o kąt φ . Schemat zbiornika częściowo wypełnionego cieczą o gęstości właściwej ρ_1 i o objętości v pokazano na rys. 3. Masa cieczy w zbiorniku wynosi[1,2,3]:

$$m = \rho_1 * v \quad (10)$$



Rys. 3. Powierzchnia swobodna na okręcie [14]

Przy dowolnym kącie przechyłu ciecz w zbiorniku przelewa się na burtę, a jej powierzchnia układa się równoległe do powierzchni wody za burtą okrętu, przybierając położenie WO₁. Środek masy cieczy, który w położeniu wyprostowanym okrętu znajdował się w punkcie g, przesunie się do punktu g₁ wskutek zmiany kształtu wypełnionej płynem objętości. Kształt zbiornika w przekroju poprzecznym okrętu przypomina prostopadłościan. Środek masy cieczy g przesuwa się po łuku okręgu ze środkiem w punkcie n (podobnie jak przesuwał się środek wyporu F po łuku ze środkiem krzywizny w metacentrum M). Zatem odległość \overline{gn} można wyrazić wzorem [1,2,3]:

$$\overline{gn} = \frac{i_b}{v} \quad (11)$$

w którym:

i_b – moment bezwładności swobodnej powierzchni cieczy w zbiorniku względem osi wzdłużnej, równoległej do płaszczyzny symetrii okrętu i przechodzącej przez środek masy tej powierzchni [m⁴],
 v – objętość płynu w zbiorniku [m³].

Ponieważ przy małych kątach przechyłu kierunki działania siły ciężkości cieczy przechodzą przez punkt n, zatem wpływ swobodnej powierzchni cieczy w zbiorniku na wysokość metacentryczną okrętu będzie identyczny z wpływem, jaki wywołałoby przesunięcie stałej masy (równej ciężarowi cieczy), której środek przeszedł z punktu g do punktu n. Rzeczywiste przesunięcie się przy przechylenie środka masy płynu $\overline{gg_1}$ spowoduje równoległe przesunięcie się środka masy okrętu z punktu G do punktu G₁, pociągnie to za sobą zmniejszenie się ramienia prostującego \overline{GH} a tym samym zmniejszenie stateczności. Kierunek działania siły ciężkości przy przechylenie będzie więc przechodził przez punkt G₁, przecinając płaszczyznę symetrii okrętu w punkcie G_p. W zakresie małych kątów punkt G_p jest stały. Zmniejszenie zatem wysokości metacentrycznej wskutek przesunięcia się środka masy okrętu z punktu G do punktu G₁ będzie takie same, jak w wyniku przesunięcia się środka masy do punktu G_p. Z tego też powodu punkt ten nazywamy pozornym środkiem masy. Pozorne przesunięcie środka masy okrętu z punktu G do G_p wywołane jest pozornym przesunięciem środka masy cieczy z punktu g do punktu n. Stąd też odległość $\overline{GG_p}$ wyliczana jest wzorem [1,2,3]:

$$\overline{GG_p} = \frac{\rho_1 * v}{\rho * V} * \overline{gn} = \frac{\rho_1 * v}{\rho * V} * \frac{i_b}{v} = \frac{\rho_1 * i_b}{V} \quad (12)$$

Ponieważ umowne przesunięcie masy cieczy zawsze ma kierunek pionowy i skierowane jest ku górze, to towarzyszy temu zmniejszenie wysokości metacentrycznej $\overline{G_p M}$ [1,2,3]:

$$\overline{G_p M} = \overline{FM} - \overline{FG} - \overline{GG_p} = \frac{J_B}{V} - \overline{FG} - \frac{\rho_1 * i_b}{V} \quad (13)$$

ostatecznie:

$$\overline{G_p M} = \frac{J_B - \rho_1 * i_b}{V} - \overline{FG} \quad (14)$$

W przypadku, gdy gęstość cieczy jest równa gęstości wody za burtowej (np. gdy zbiorniki napełnione są wodą morską) powyższy wzór ma postać:

$$\overline{G_p M} = \frac{J_B - i_b}{V} - \overline{FG} \quad (15)$$

Przy większej ilości zbiorników niezupełnie napełnionych cieczami o różnych gęstościach wpływ swobodnych powierzchni sumuje się zgodnie ze wzorem:

$$\overline{G_p M} = \frac{J_B - \sum_{k=1}^n \frac{\rho_k}{\rho} * i_{bk}}{V} \quad (16)$$

Badając wpływ swobodnej powierzchni na stateczność wzdłużną otrzyma się po przeprowadzeniu podobnego rozumowania wzór na zredukowaną wzdłużną wysokość metacentryczną:

$$\overline{G_p M_L} = \frac{J_L - \sum_{k=1}^n \frac{\rho_k}{\rho} * i_{lk}}{V} - \overline{FG} \quad (17)$$

gdzie:

i_{lk} – kolejne momenty bezwładności swobodnych powierzchni ładunków płynnych względem osi poprzecznych, prostopadłych do płaszczyzny symetrii i przechodzących przez środki masy poszczególnych powierzchni [m⁴].

Jak wynika z powyższych wzorów, obecność swobodnej powierzchni powoduje zmniejszenie wysokości metacentrycznej okrętu, przy czym zmniejszenie to zależne jest od momentów bezwładności swobodnych powierzchni. Dotyczy to szczególnie okrętów przeznaczonych do przewozu ładunków płynnych (zbiornikowców). Utrata początkowej stateczności poprzecznej spowodowana swobodną powierzchnią cieczy będzie miała miejsce wówczas, gdy punkt G_p znajdzie się w punkcie M, czyli gdy [1,2,3]:

$$\overline{GG_p} = \frac{i_b}{V} = \overline{GM} \quad (18)$$

ponieważ:

$$\overline{FM} = \frac{J_B}{V} \quad (19)$$

o stosunek:

$$\frac{\overline{GM}}{\overline{FM}} = \frac{i_b}{J_B} \quad (20)$$

wynosi:

$$i_b = J_B * \frac{\overline{GM}}{\overline{FM}} \quad (21)$$

Równanie to umożliwia obliczenie wielkości swobodnej powierzchni, przy wystąpieniu której okręt utraci całkowitą stateczność początkową.

Ponieważ w praktyce [[1,2,3]]:

$$\frac{\overline{GM}}{\overline{FM}} = \frac{1}{5} \div \frac{2}{5} \quad (22)$$

zatem krytyczna wielkość swobodnej powierzchni cieczy wystąpi gdy:

$$i_b = \left(\frac{1}{5} \div \frac{2}{5} \right) * J_B \quad (23)$$

W przypadku, gdy swobodna powierzchnia cieczy sięga od burty do burty, wpływ jej na wysokość metacentryczną jest tak znaczny, że już przy stosunkowo niedużej jej długości następuje całkowita utrata stateczności początkowej. Krytyczna długość swobodnej powierzchni zależna jest również od stosunku $\overline{GM} / \overline{FM}$ i dla podanych powyżej wartości tego stosunku wynosi [12]:

$$l = (0,12 \div 0,23) * L \quad (24)$$

gdzie:

L – długość okrętu [m].

Przyjęcie na okręt ładunku płynnego, połączone z wystąpieniem swobodnej powierzchni, wpływa na zmianę położenia środka masy okrętu i tym samym na wysokość metacentryczną \overline{GM} . Z tego też względu używanie np. większej ilości wody do gaszenia pożarów na górnych pokładach powoduje przesunięcie środka masy okrętu w górę a w połączeniu z wystąpieniem swobodnych powierzchni może spowodować utratę stateczności i przewrócenie okrętu.

W obliczeniach wysokości metacentrycznej uwzględniono wpływ momentu bezwładności pochodzącego od powierzchni swobodnej zalanego przedziału. Przyjęto, że powierzchnie pomieszczenia zalawanego wodą ma kształt prostokąta. Momenty bezwładności stałych elementów konstrukcyjnych znajdujących się w pomieszczeniu uwzględniono w obliczeniach momentu bezwładności całej bryły.

Wpływ swobodnej powierzchni cieczy na krzywą Reeda uwzględniono poprzez tzw. poprawkę oznaczoną symbolem $X[1,2,3]$.

$$X = [y_{G1}(\varphi) * \cos \varphi + z_{G1}(\varphi) * \sin \varphi] \quad (25)$$

gdzie:

$y_{G1}(\varphi)$ i $z_{G1}(\varphi)$ – składowe przesunięcia środka masy okrętu przy przechyle do kąta φ [m],

$$y_{G1}(\varphi) = \frac{\sum_{i=1}^n m_i * [y_g(\varphi)]_i}{D} \quad (26)$$

$$z_{G1}(\varphi) = \frac{\sum_{i=1}^n m_i * [z_g(\varphi)]_i}{D} \quad (27)$$

D – wyporność okrętu wraz z ładunkiem płynnym [t],

m_i – masa ładunków płynnych w poszczególnych zbiornikach [t],

$[y_g(\varphi)]_i$ i $[z_g(\varphi)]_i$ – składowe przesunięcia środków masy cieczy w zatopionych przedziałach przy przechyle do kąta φ [m] [12]. Parametry te zostały obliczone przy wykorzystaniu opracowanego programu komputerowego. Program ten przystosowany jest do obliczeń parametrów statecznościowych dla konstrukcji pływającej w kształcie pontonu prostopadłościennego.

Po określeniu poprawki od swobodnej powierzchni cieczy nowa GM wynosi:

$$GM = G_1 M_1 - X \quad (28)$$

Na podstawie wzoru 28 dokonano obliczeń i analizy wysokości metacentrycznej okrętu po zatopieniu przedziału okrętowego.

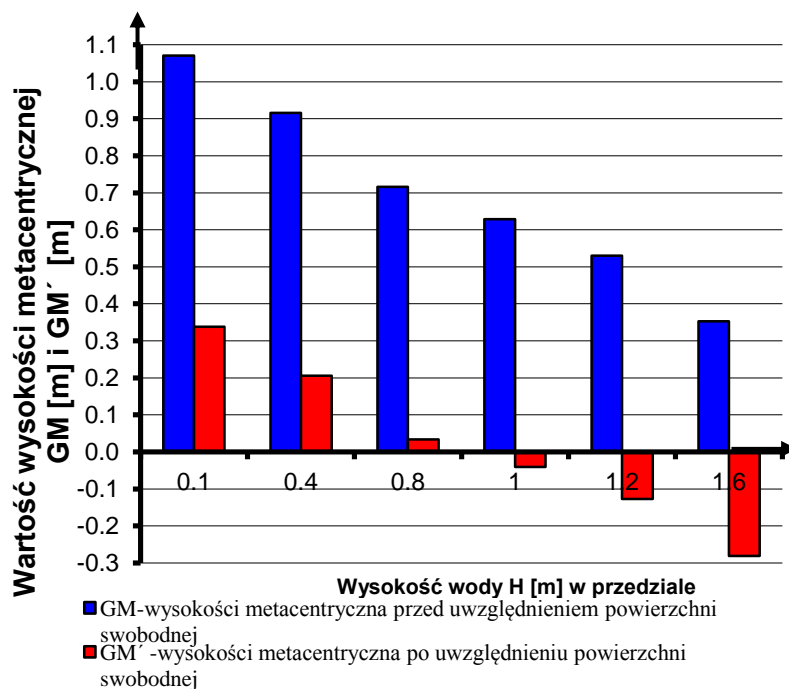
4. WYNIKI OBLICZEŃ STATECZNOŚCI OKRĘTU Z ZALANYM PRZEDZIAŁEM

Obliczenia przeprowadzono dla przedziału znajdującego się na wysokości 8,1m od płaszczyzny podstawowej. Przedział ten o wymiarach: szerokość 8,67 m i długość 36,78 m posiada pole powierzchni, po uwzględnieniu jego wyposażenia, równe 188,5 m². Przedział ten zalewano do założonych wcześniej wysokości wody H .

Wyniki obliczeń wysokości metacentrycznej przed (GM) i po uwzględnieniu powierzchni swobodnej (GM') dla rozpatrywanych wysokości wody w przedziale przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki obliczeń wysokości metacentrycznej zalanego przedziału [7,8,9]

H [m]	0,1	0,4	0,8	1,2	1,6
GM [m]	1,071	0,916	0,716	0,629	0,530
GM' [m]	0,339	0,206	0,034	-0,041	-0,127



Rys. 4. Zależność wysokości metacentrycznej GM i GM' od wysokości wody w przedziale H [7,8,9]

Na rysunku 4. przedstawiono zależność wysokości metacentrycznej GM i GM' od wysokości wody w przedziale H .

Z analizy otrzymanych wyników obliczeń, że wraz ze zwiększaniem poziomu wody H w przedziale zmniejsza się wartość wysokości metacentrycznej GM' .

PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzenia analizy stateczności po zatopieniu wysoko położonych przedziałów otrzymano następujące wnioski:

- Zatopienie wysoko położonych przedziałów powoduje:
 - zmniejszenie wartości wysokości metacentrycznej GM ,
 - wzrost wartości kąta stałego przechyłu φ_s .

Zatopienie przedziału do wysokości wody $H=1,0\text{m}$ powoduje utratę stateczności początkowej. Przy mniejszych wysokościach wody w przedziałach okręt zachowuje stateczność początkową dodatnią.

BIBLIOGRAFIA

- Kabaciński J.: Stateczność i niezatapialność statku, Gdańsk 1995.
- Derett D. R.: *Ship stability for Masters and Mates*, BH. Oxford, UK, 2003.
- Dudziak J.: *Teoria okrętu*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 2006.
- Jakus B., Korczewski Z., Mironiuk W., Szyszka J., Wróbel R.: *Obrona przeciwawaryjna okrętu, cz.1*, Gdynia 2001.
- Mironiuk W.: *Preliminary research on stability of warship models*, COPPE Brazil, Rio de Janeiro, 2006.
- Mironiuk, W., Pawłędzio, A., Wróbel, R. *Trenażer do walki z wodą*. Przegląd Morski nr 5 Gdynia 2004.
- Mironiuk W., Pawłędzio A., Wróbel R.: *Analiza stateczności statycznej pontonu prostopadłościennego o wymiarach $L \times B \times H$* . Zeszyty naukowe AMW. Gdynia 2004.
- Mironiuk W., Pawłędzio A., Zacharewicz M.: *Badania modelowe stateczności i niezatapialności okrętów*. AMW Gdynia 2006.

- Mironiuk W., Pawłędzio A.: *Modelling studies of the roll and the pitch training ship*. Maritime Transport & Shipping, London, UK, 2013.

THE EFFECT DECK'S FLOODED COMPARTMENT ON THE STABILITY SAFETY OF TRAINING SHIP

Abstract

The paper presents the computational stability issues with high flooded ship compartments on the boat deck. Defined metacentric height calculation algorithm taking into account with the free surface effect after flooding high located ship compartments. Based on the results of the calculations presented in tabular and graphical form suitable conclusions were done.

Autorzy:

dr inż. **Waldemar Mironiuk** – Akademia Marynarki Wojennej Gdynia

dr inż. **Zbigniew Łosiewicz** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny Szczecin