

Wojciech Wawrzyński
Akademia Morska w Gdyni, Katedra Eksploatacji Statku

WPLYW STANDARDOWEJ POPRAWKI UWZGLĘDNIAJĄCEJ EFEKT SWOBODNEJ POWIERZCHNI CIECZY ΔGM NA OCENĘ STATECZNOŚCI STATKU USZKODZONEGO METODĄ PRZYJĘTEJ MASY

Streszczenie: Artykuł przedstawia analizę powszechnie stosowanej metody uwzględniania wpływu przelewania się cieczy w zbiornikach/ładowniach zapełnionych częściowo, na stateczność statku, w formie poprawki ΔGM . Opisane są ograniczenia metody. Zaprezentowano porównanie wartości rzeczywistych momentów przechylających od przelania się cieczy, z wartościami uwzględnionymi przez ΔGM . Przedstawione zostały sytuacje, gdy stosowanie poprawki ΔGM może prowadzić do błędnej oceny sytuacji statecznościowej statku po zatopieniu wnętrza kadłuba.

Słowa kluczowe: stateczność statku, swobodne powierzchnie cieczy, stateczność awaryjna

1. WSTĘP

Prawidłowo wykonana ocena stateczności statku, jest jednym z podstawowych warunków gwarantujących jego bezpieczną eksploatację w stanie nieuszkodzonym oraz warunkiem koniecznym podejmowania właściwych decyzji w sytuacjach awaryjnych, np. zatopienia wnętrza. Jednym z ważniejszych elementów oceny stateczności statku, jest uwzględnienie przemieszczania się, podczas przechyłu statku (np. przechył od wiatru, kołysanie na fali), cieczy w zbiornikach/ładowniach zapełnionych częściowo. Zjawisko to określane jest jako efekt swobodnych powierzchni cieczy. Powszechnie przyjętą metodą uwzględniania przelewania się cieczy jest pozorne podniesienie środka masy statku o wartość ΔGM nazywaną poprawką od swobodnych powierzchni cieczy.

Poprawka ΔGM jest jednak dokładna tylko w obliczeniach dotyczących małych kątów przechyłu. Przy dużych kątach daje zawyżone wartości, ale ponieważ powoduje to powstanie dodatkowego zapasu stateczności statku mówi się, że obliczenia stoją po stronie bezpiecznej i podejście takie jest akceptowane przez przepisy wszystkich instytucji

klasyfikacyjnych nadzorujących budowę i eksploatację statków. W przypadku statku w stanie nieuszkodzonym jedyną negatywną konsekwencją zastosowania poprawki ΔGM zawyżającej wpływ swobodnych powierzchni cieczy może być ograniczenie masy przewożonego ładunku.

Sytuacja zmienia się zasadniczo podczas analizy stateczności statku w stanie awaryjnym, przy zatopianiu wnętrza kadłuba. Jeżeli w wyniku zatopienia wnętrza dochodzi do utraty stateczności statku, to zasadniczą przyczyną tego jest właśnie efekt przelewania się wody w przedziałach zatopionych częściowo. Dlatego ważne jest, aby obliczenia stateczności awaryjnej wykonywane były w miarę możliwości dokładnie. Błędnie wykonana analiza stateczności statku w sytuacji awaryjnej może prowadzić do jego utraty.

2. EFEKT SWOBODNYCH POWIERZCHNI CIECZY

Ciecz w zbiornikach/ładowniach zapełnionych częściowo (ze swobodną powierzchnią cieczy), w trakcie przechylania statku ulega przemieszczeniu (przelaniu) w stronę burty, na którą następuje przechył, dając dodatkowy moment przechylający powiększający przechył. Pomijając dynamikę ruchu cieczy w zbiorniku, wartość tego momentu, przy danym kącie przechyłu φ , określana jest według zależności:

$$M_f(\varphi) = i_B \cdot \rho \cdot \text{tg} \varphi \quad (1)$$

gdzie: i_B –poprzeczny moment bezwładności powierzchni cieczy w zbiorniku przed jej przelaniem [m^4],
 ρ – gęstość cieczy w zbiorniku [t/m^3].

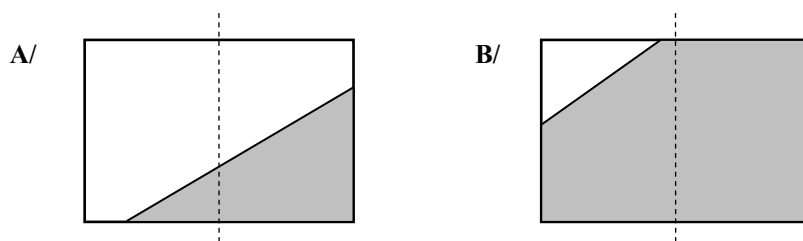
W standardowej procedurze oceny stateczności statku przyjmuje się, że moment M_f wywołany przelaniem cieczy pomniejsza aktualny moment prostujący. W obliczeniach efekt ten uzyskiwany jest poprzez pozorne podniesienie środka masy statku o wielkość ΔGM , nazywaną poprawką od swobodnych powierzchni cieczy [1, 2, 7]. Stosując poprawkę ΔGM przyjmuje się, że $\text{tg} \varphi \approx \sin \varphi$, co jest poprawne tylko dla małych kątów φ . Ponadto wyznaczanie wartości momentu M_f według zależności (1) zakłada, że:

- burty zbiornika są prostopadle względem PP na całej jego wysokości,
- przelewanie cieczy w pomieszczeniu nie ma ograniczeń górnych (pokład nad zbiornikiem) ani dolnych (dno zbiornika),
- wartość M_f jest niezależna od masy cieczy w zbiorniku.

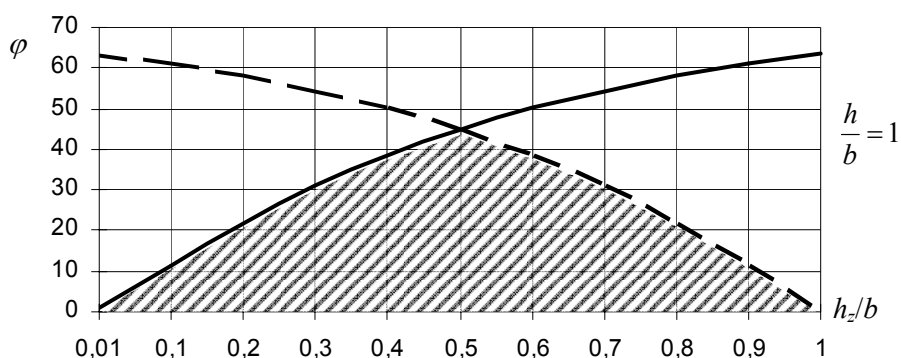
W efekcie, metoda uwzględniania wpływu swobodnych powierzchni cieczy, poprzez poprawkę ΔGM , jest poprawna tylko przy małych kątach przechyłu i w wąskim zakresie zapełnienia zbiornika/ładowni. Poza ograniczonym zbiorem argumentów, dla których zależność (1) daje prawidłowe rezultaty, obliczone wartości M_f są zawyżone.

Na rys.2÷4 umieszczono wykresy prezentujące zakresy kątów przechyłu, przy których standardowo liczona poprawka od swobodnych powierzchni cieczy ΔGM uwzględnia rzeczywiste statyczne momenty przechylające wywołane przelaniem się cieczy. Linia

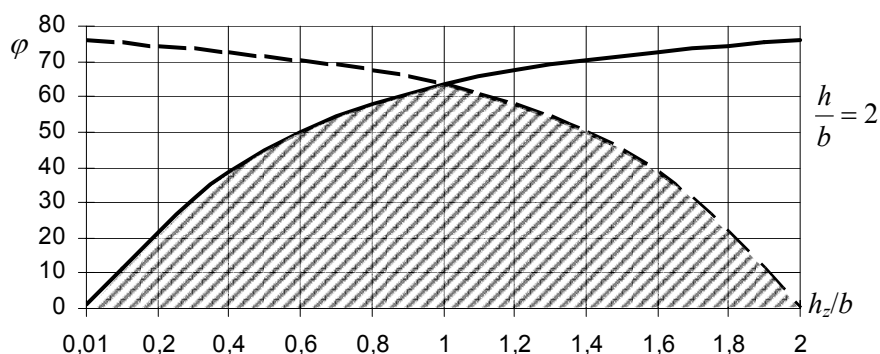
ciągła uwzględnia kąty przechyłu, przy których przelewanie ciecży jest ograniczone przez dno zbiornika (rys.1/A), natomiast linia przerywana prezentuje kąty, przy których przelewanie ciecży ograniczane jest przez pokład nad zbiornikiem (rys.1/B). Wartości kątów wyznaczone zostały w funkcji stosunku wysokości zapełnienia zbiornika h_z do jego szerokości b . Obliczenia wykonano dla zbiornika o kształcie prostopadłościanu przy stosunku wysokości do szerokości zbiornika h/b : 1, 2 i 3. Z wykresów tych wyraźnie wynika, że obszar prawidłowej prezentacji wpływu swobodnych powierzchni ciecży na stateczność statku poprawką ΔGM , jest najmniejszy dla zbiorników niskich np. zbiorników dna podwójnego.



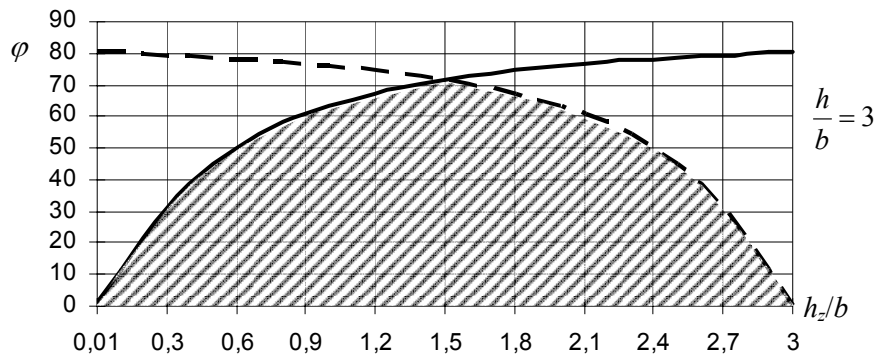
Rys.1. Ograniczenie przelewania się ciecży przez dno zbiornika (A) oraz przez pokład nad zbiornikiem (B).
Źródło: opracowanie własne.



Rys.2. Obszar dokładnego uwzględniania wpływu swobodnych powierzchni ciecży poprawką ΔGM dla zbiornika prostopadłościanowego o wysokości równej jego szerokości w funkcji kąta przechyłu oraz stosunku wysokości zapełnienia do szerokości zbiornika.
Źródło: opracowanie własne.



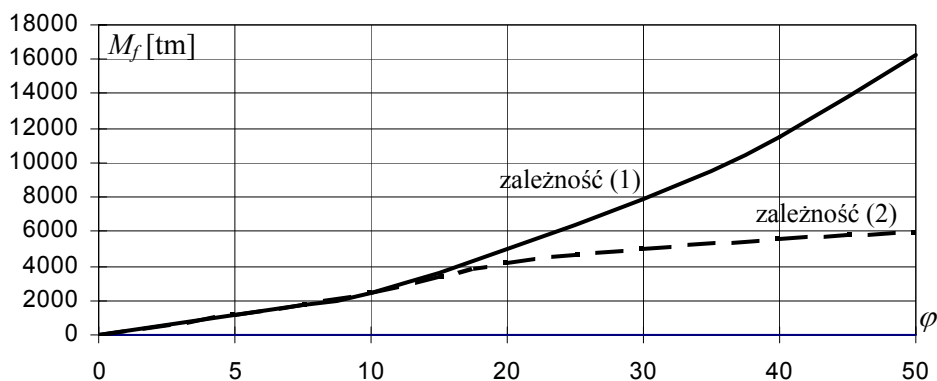
Rys.3. Obszar dokładnego uwzględniania wpływu swobodnych powierzchni ciecży poprawką ΔGM dla zbiornika prostopadłościanowego o wysokości dwukrotnie większej od szerokości, w funkcji kąta przechyłu oraz stosunku wysokości zapełnienia do szerokości zbiornika.
Źródło: opracowanie własne.



Rys.4. Obszar dokładnego uwzględniania wpływu swobodnych powierzchni cieczy poprawką ΔGM dla zbiornika prostopadłościennego o wysokości trzykrotnie większej od szerokości, w funkcji kąta przechyłu oraz stosunku wysokości zapelnienia do szerokości zbiornika.
Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 5 przedstawiono różnice wartości momentu przechylającego wywołanego przelaniem się cieczy obliczone zależnością (1) w stosunku do rzeczywistych wartości tego momentu. Obliczenia wykonano dla przedziału prostopadłościennego o długości $l=20$ m, szerokości $b=20$ m i wysokości bez ograniczeń, przyjmując wysokość zatopienia $h_z=2$ m. Rzeczywiste momenty przechylające wywołane przelaniem się cieczy po przekroczeniu kąta granicznego dla poprawki ΔGM $11,3^\circ$ (rys.2 $h_z/b=0.1$) wyznaczono zależnością wprowadzoną dla układu jak na rys.1/A:

$$M_f(\varphi) = l \cdot b \cdot h_z \cdot \rho \left(\frac{b}{2} - \frac{\sqrt{\frac{2b \cdot h_z}{3}} \cdot \operatorname{tg} \varphi}{3} \right) \quad (2)$$



Rys.5. Porównanie wartości rzeczywistego momentu przechylającego (linia przerywana) wywołanego przelaniem się cieczy (wysokość zatopienia 2 m) w przedziale prostopadłościennym o długości $l=20$ m, szerokości $b=20$ m i wysokości bez ograniczeń z momentem policzonym zależnością (1).
Źródło: opracowanie własne.

Stosowanie, przy eksploatacyjnej ocenie stateczności statku, poprawki ΔGM poprzez zawyżanie wartości momentu M_f powiększa zapas bezpieczeństwa. Wartość tego dodatkowego zapasu stateczności jest jednak różna w zależności od kształtu zbiornika, stopnia jego zapelnienia oraz kąta przechyłu. Zwiększanie zapasu stateczności uznawane jest za prawidłowe działanie, ale w niektórych sytuacjach użycie poprawki ΔGM , może prowadzić do całkowicie błędnej oceny sytuacji statecznościowej statku. Szczególną uwagę należy zwrócić na ocenę stateczności statku w stanach awaryjnych, przy zatapianiu wnętrza kadłuba.

3. OCENA STATECZNOŚCI STATKU W PRZYPADKU ZATAPIENIA WNĘTRZA KADŁUBA

Awaria połączona z zatapianiem wnętrza kadłuba jest zdarzeniem losowym, najczęściej przebiegającym gwałtownie - wnętrze kadłuba zostaje zatopione do poziomu wody zaburtowej w stosunkowo krótkim okresie czasu. Bez specjalistycznego programu komputerowego, w większości przypadków wykonanie obliczeń stateczności statku w końcowym jak i pośrednich stanach zatopienia, przed zakończeniem zatapiania wnętrza, nie jest możliwe. Są jednak sytuacje, gdy zatapianie wnętrza przebiega stosunkowo wolno (niewielkie uszkodzenie poszycia) lub jest przesunięte w czasie (np. gaszenie pożaru w ładowni poprzez jej częściowe zatopienie). Wcześniejsze wyznaczenie parametrów, jakie uzyska statek w tych przypadkach jest możliwe.

W zależności od parametrów jednostki w stanie awaryjnym podejmowane są bardzo ważne decyzje, w skrajnym przypadku dotyczące opuszczenia statku. Dlatego ważne jest, aby w sytuacji takiej parametry statecznościowe określone zostały w możliwie dokładny sposób. Do wyznaczania parametrów statku z zatopionym wnętrzem stosowane są dwie metody: stałej wyporności oraz przyjętej masy.

Metodę stałej wyporności, nazywaną również metodą utraconej wyporności, stosuje się, jeśli ilość wody, która wlała się do kadłuba zmienia się w funkcji czasu. Sytuacja taka ma miejsce, gdy uszkodzenie kadłuba jest duże oraz gdy jego dolna granica znajduje się poniżej a górna powyżej wodnicy pływania. W trakcie ruchów statku na fali woda się wlewa i wylewa z wnętrza kadłuba – ustalenie dokładnej masy wody w kadłubie nie jest możliwe. W uproszczeniu, metoda ta zakłada, że statek w wyniku awarii utracił fragment podwodzia (zatapiany przedział), w konsekwencji czego zmiane ulega kształt zanurzonej części kadłuba. Ponieważ doszło do utraty fragmentu podwodzia (wyporności) statek zanurza się do wodnicy awaryjnej. Efekt swobodnych powierzchni cieczy w zatapianym przedziale uwzględniany jest jako utrata fragmentu wodnicy pływania. Wyznaczenie parametrów statku w sytuacji awaryjnej metodą stałej wyporności, w sytuacji, gdy na statku nie ma specjalistycznego programu komputerowego nie jest możliwe, wymaga bowiem obliczenia danych hydrostatycznych oraz pantokaren dla kadłuba o zmienionym kształcie. Dokładny opis metody można znaleźć w [1].

Metodę przyjętej masy stosuje się, gdy można dokładnie określić masę wody w zatapianym przedziale - woda traktowana jest jak dodatkowa masa przyjęta na statek. Momenty przechylające wywołane przelewaniem się wody, uwzględniane są poprzez

standardową poprawkę od swobodnych powierzchni cieczy ΔGM .

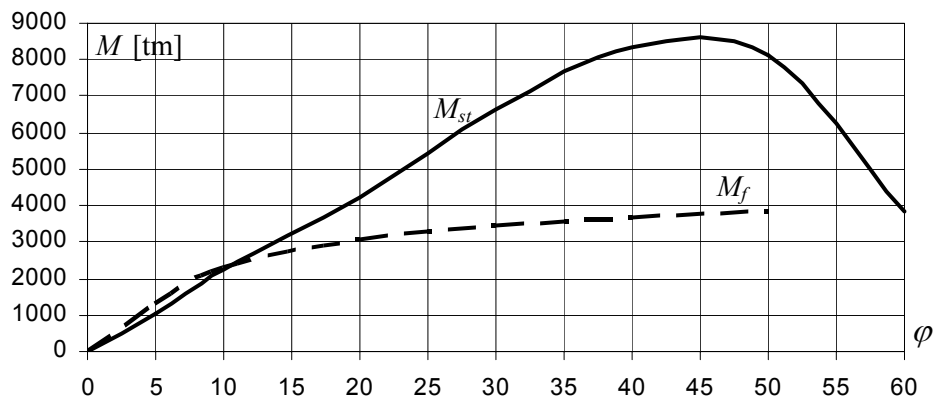
Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń stateczności statku B354 po zatopieniu pustej ładowni nr 3 do wysokości 1, 2 oraz 3 metrów (np. w wyniku awarii instalacji balastowej). Parametry statku przed awarią: wyporność $D=20\,600$ t, rzędna środka masy $z_G=9,00$ m, masowy moment od swobodnej powierzchni cieczy w zbiornikach $\Delta mh=0$ tm, rzędna środka masy $z_G=9,00$ m. Dopuszczalna rzędna środka masy statku $z_{Gdop}=9,07$ m, jest większa niż $z_{Gp}=z_G$ ($\Delta GM=0$), a więc statek spełnia kryteria stateczności statku w stanie nieuszkodzonym. Ponieważ w analizowanym przypadku, można dokładnie określić masę wody w zatopionym przedziale, parametry statku uszkodzonego wyznaczono metodą przyjętej masy.

- parametry i stateczność statku po zatopieniu ładowni nr 3 do wysokości 1 m (do ładowni wleje się 506 ton wody):

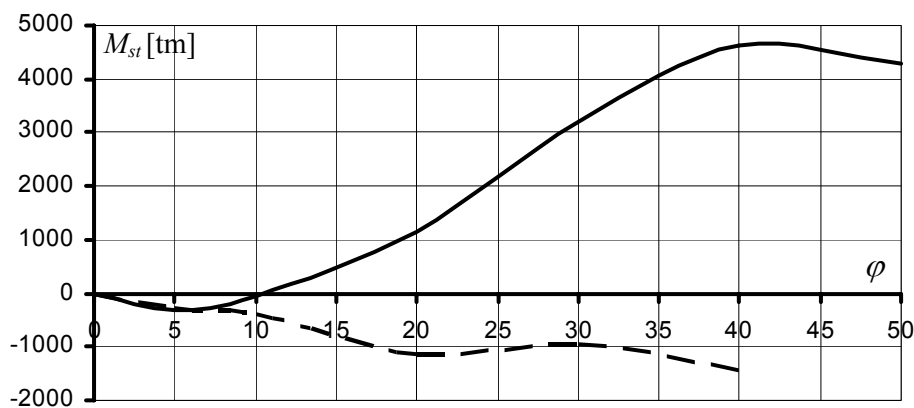
wyporność	D_A	=	21 106 t
rzędna środka masy	z_{GA}	=	8,83 m
masowy moment od swobodnych powierzchni cieczy	Δmh_A	=	15 196 tm
poprawka od swobodnych powierzchni cieczy	ΔGM_A	=	0,72 m
poprawiona rzędna środka masy	z_{GAp}	=	9,55 m
zanurzenie	T_A	=	9,23 m
rzędna metacentrum poprzecznego	ZM_A	=	9,37 m
początkowa poprzeczna poprawiona wysokość metacentryczna	GM_{Ap}	=	$-0,18$ m

φ	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
ramiona prostujące l_{st}	-0,012	-0,02	-0,05	-0,04	-0,07	-0,17	-0,44

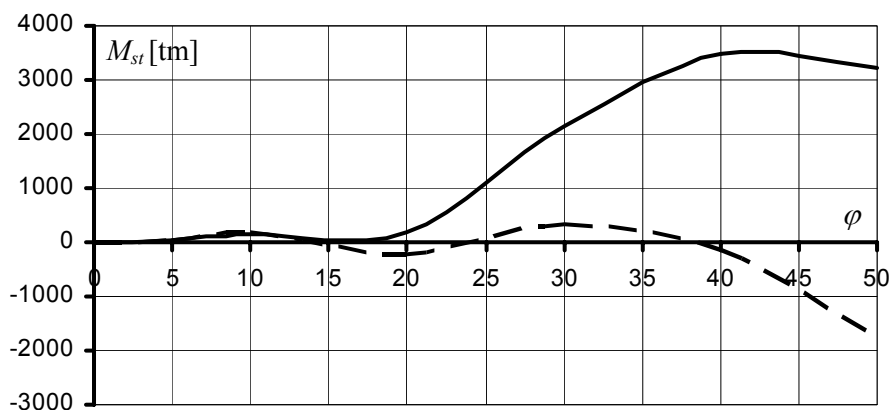
Z obliczeń wynika, że po zatopieniu ładowni nr 3 do wysokości 1 m, statek utraci stateczność. Wskazuje na to zarówno ujemna stateczność początkowa ($GM_{Ap}<0$) jak i ujemne wartości ramion prostujących przy większych kątach przechyłu. Zastanawiające jest jednak, czy 500 ton wody w ładowni, może doprowadzić do przewrócenia statku o wyporności 21000 ton, spełniającego wymagania stateczności w stanie przed awarią. Dlatego ponownie dokonano oceny stateczności, przy czym moment prostujący statek w stanie awaryjnym, wyznaczono jako moment prostujący dla statku bez swobodnych powierzchni cieczy pomniejszony o rzeczywisty moment wywołany przelaniem się cieczy. Na rys.6 przedstawiono wykresy: momentu prostującego M_{st} statku w stanie awaryjnym, bez uwzględnienia poprawki od swobodnych powierzchni cieczy oraz rzeczywistego momentu przechylającego M_f wywołanego przelaniem się wody w ładowni nr 3 przy zatopieniu jej do wysokości 1 m. Natomiast rysunek 7 przedstawia wypadkowy moment prostujący statek po uwzględnieniu M_f – różnica wykresów na rysunku 6.



Rys.6. Moment prostujący M_{st} statku w stanie awaryjnym bez uwzględnienia swobodnej powierzchni wody w ładowni i rzeczywisty moment przechylający M_f wywołany przelaniem się wody w ładowni nr 3, przy zatopieniu jej do wysokości 1 m. Źródło: opracowanie własne.



Rys.7. Moment prostujący statek po zatopieniu ładowni 3 ($h_z=1\text{m}$), przy uwzględnieniu poprawki ΔGM (linia przerywana) oraz rzeczywistego momentu przechylającego M_f wywołanego przelaniem się wody (linia ciągła). Źródło: opracowanie własne.



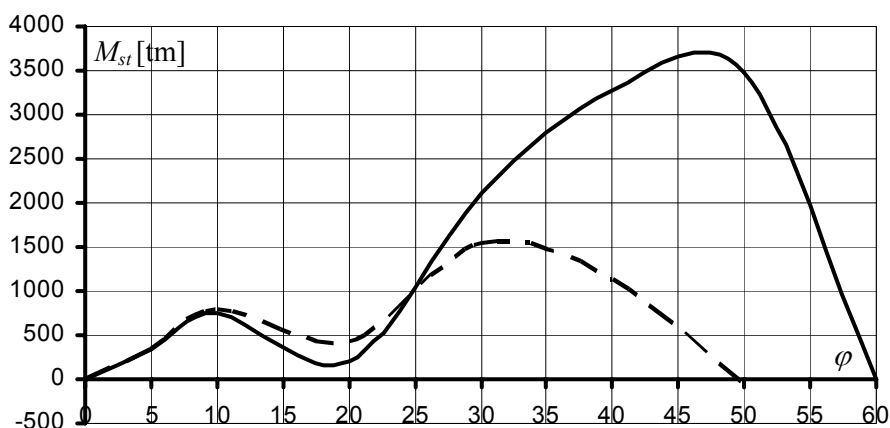
Rys.8. Moment prostujący statek po zatopieniu ładowni 3 ($h_z=2\text{ m}$), przy uwzględnieniu standardowej poprawki ΔGM (linia przerywana) oraz rzeczywistego momentu przechylającego M_f wywołanego przelaniem się wody (linia ciągła). Źródło: opracowanie własne.

- parametry i stateczność statku po zatopieniu ładowni nr 3 do wysokości 3 m (masa wody 1518 t):

$$\begin{aligned}
 D_A &= 22\,118 \text{ t} & T_A &= 9,64 \text{ m} \\
 z_{GA} &= 8,55 \text{ m} & ZM_A &= 9,46 \text{ m} \\
 \Delta m h_A &= 14\,600 \text{ tm}, & \Delta GM_A &= 0,66 \text{ m} \\
 z_{GAp} &= 9,21 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$GM_{Ap} = 0,22 \text{ m}$$

Również, przy zatopieniu ładowni do wysokości 3 m, po zastosowaniu standardowej poprawki od swobodnych powierzchni cieczy ΔGM , stateczność jest zdecydowanie gorsza niż przy uwzględnieniu rzeczywistych momentów od przelania się wody (rys.9), chociaż tym razem różnice między wykresami są mniejsze. Większa zgodność wykresów związana jest z wyższą wartością h_z i wynikającym z tego większym zakresem kątów poprawności poprawki ΔGM (rys.2÷4).



Rys.9. Moment prostujący statek po zatopieniu ładowni 3 ($h_z=3$ m), po uwzględnieniu standardowej poprawki ΔGM (linia przerywana) oraz rzeczywistego momentu przechylającego M_f wywołanego przelaniem się wody (linia ciągła).

Źródło: opracowanie własne.

4. PODSUMOWANIE

Z przedstawionych obliczeń wyraźnie wynika, że rzeczywista stateczność statku, niezależnie od wysokości zatopienia ładowni, jest znacząco lepsza niż stateczność wyznaczona przy zastosowaniu standardowej poprawki od swobodnych powierzchni cieczy ΔGM . Rozbieżność obliczonych parametrów stateczności statku jest szczególnie widoczna przy niskich poziomach zatopienia przedziału. W sytuacji awaryjnej statku, błędna ocena jego stateczności może prowadzić do podejmowania niewłaściwych decyzji. Przykładowo, gdyby na statku w analizowanym powyżej stanie, doszło do pożaru w ładowni nr 3 i jedyną możliwością jego ugaszenia byłoby częściowe zatopienie ładowni, to

po wykonaniu obliczeń z zastosowaniem standardowej poprawki ΔGM uzyskano by informacje, że już przy niskich poziomach wody w ładowni statek utraci stateczność. Informacja taka byłaby raczej jednoznaczna z rezygnacją z próby ugaszenia pożaru poprzez częściowe zatopienie ładowni.

Prostym rozwiązaniem przedstawionego problemu jest wprowadzenie do dokumentacji statkowych, do skalowania zbiorników oraz ładowni, informacji o wartościach momentów objętości M_v powstałych w wyniku przelania się cieczy, wyznaczonych dla różnych kątów przechyłu w funkcji wysokości wypełnienia przedziału. Moment przechylający, przy danym kącie przechyłu, wywołany przelaniem się cieczy równy jest iloczynowi momentu objętości i gęstości cieczy:

$$M_f(\varphi) = M_v(\varphi, h) \cdot \rho \quad (3)$$

Standardowa poprawka ΔGM wykorzystywana byłaby tylko do oceny stateczności początkowej statku, przy wyznaczaniu początkowej poprzecznej poprawionej wysokości metacentrycznej GM_p . Dla dużych kątów przechyłu efekt przelewania się cieczy byłby uwzględniany w obliczeniach krzywej stateczności statycznej jak na rys.7, 8 i 9. Rozwiązanie takie, w uproszczonej formie, jest już czasem stosowane na statkach, ale zamieszczane w dokumentacjach statkowych poprawki odnoszą się tylko do zbiorników paliwowych oraz balastowych i podawane są dla połowicznego (teoretycznie „najbardziej niekorzystnego”) poziomu ich wypełnienia.

Przedstawiona w artykule analiza wpływu, na stateczność statku, przelewania się cieczy w wypełnionych częściowo zbiornikach oraz ładowniach, odnosi się tylko do układów statycznych i nie uwzględnia dynamiki ruchu cieczy oraz zjawisk z nim związanych. Dodatkowe, wywołane ruchem cieczy, dynamiczne momenty przechylające mogą osiągać znaczące wartości [6]. Można byłoby więc założyć, że stosowanie poprawki ΔGM powodującej zawyżanie momentów przechylających wywołanych przelewaniem się cieczy jest częściowo uzasadnione. Tym niemniej w sytuacjach awaryjnych powinna być dostępna metoda umożliwiająca wyznaczenie rzeczywistych parametrów statku. Analizę zjawisk dynamiki ruchu cieczy w zbiornikach i propozycję ich uwzględnienia znaleźć można w szeregu publikacji, między innymi [3,4,5,6].

BIBLIOGRAFIA

1. DUDZIAK J., *Teoria okrętu*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1988
2. *Intact Stability Code*, IMO, London 2002
3. JANKOWSKI J., WARMOWSKA M., Development of computer program describing the flow in partly filled tank, *Technical Report No.27/97*, PRS, Gdańsk 1997
4. KIM Y., A numerical study on sloshing flows coupled with ship motion – the anti-rolling tank problem, *Journal of Ship Research*, 46, 52-62, 2002
5. KRATA P., Linear characteristics of the sloshing phenomenon for the purpose of on-board ship's stability assessment, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 47, 307-320, 2009
6. KRATA P., Dynamic Component of Ship's Heeling Moment due to Sloshing vs. IMO IS-Code Recommendations, Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, pp. 775-780, Taylor & Francis Group, London 2009
7. Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich PRS, Polski Rejestr Statków, Gdańsk 1990

THE STANDARD FREE SURFACE Δ GM CORRECTION INFLUENCE ON ESTIMATION OF THE SHIPS STABILITY IN DAMAGE CONDITIONS

Abstract: The paper presents an analysis of a generally applied method of including the influence of fluid transfer, during the heel, in the tanks/holds that are partially filled on the ships stability in the form of the Δ GM correction. The limitations of the Δ GM method are described as well as a comparison of the real heeling moments caused by the fluid transfer with the values created using the Δ GM correction is presented. The paper introduces situations in which the usage of Δ GM method can lead to a misapprehension of the estimation of the damaged ships stability after the flooding of the inside of the hull.

Keywords: ship intact stability, free surfaces correction, ship damage stability