

## ZMIANY SIŁ TNĄCYCH I MOMENTÓW GNĄCYCH KADŁUBA STATKU NA FALI

*Opracowanie zawiera propozycję zależności, wyznaczających zmiany sił tnących oraz momentów gnących kadłuba statku wywołanych obecnością fali. Zależności wyprowadzone zostały dla fali o długości równej długości kadłuba przy aproksymacji wodnicy za pomocą elipsy. Przedstawiono również przykładowe wyniki obliczeń uzyskiwanych za pomocą proponowanych zależności oraz ich porównanie z innymi, wybranymi podejściami wyznaczania zmian sił tnących i momentów gnących kadłuba statku wywołanych falą.*

**Słowa kluczowe:** wytrzymałość kadłuba, statek na fali, kontrola wytrzymałości kadłuba.

### WSTĘP

Zgodnie z wymaganiami Międzynarodowego Stowarzyszenia Klasyfikatorów Morskich (IACS) [5] na wielu typach statków o określonej wielkości, w trakcie ich eksploatacji, oprócz kontroli stateczności wymagana jest również kontrola wytrzymałości ogólnej kadłuba. Najczęściej sprowadza się ona do wykonania obliczeń wartości sił tnących, momentów gnących oraz momentów skręcających, opisujących poziomy naprężeń normalnych i stycznych w poszczególnych przekrojach kadłuba i porównania ich z wartościami dopuszczalnymi. Eksploatacyjne obliczenia wytrzymałości ogólnej kadłuba wykonywane są dla statku na wodzie spokojnej (wodnica jest płaszczyzną), jednak stan morza, przy którym wysokość fali byłaby równa lub bliska zeru, występuje bardzo rzadko. Wyznaczane wartości sił tnących i momentów gnących nie ukazują zatem rzeczywistych obciążeń kadłuba w trakcie jego eksploatacji. W celu uwzględnienia zmian obciążeń kadłuba, wywołanych obecnością fali, do kontroli wytrzymałości stosuje się inne wartości dopuszczalne sił tnących i momentów gnących dla warunków portowych oraz warunków morskich. Wartości dopuszczalne dla warunków morskich są pomniejszone względem wartości dopuszczalnych dla warunków portowych o wartość zmian wywołanych falą.

W dalszej części opracowania zaproponowano metodę wyznaczania wartości zmian sił tnących i momentów gnących wywołanych falą, porównując ją z metodą stosowaną w przepisach IACS oraz metodą proponowaną przez Loukakisa-Chryssostomidisa.

Pomijając zjawiska związane z ruchem statku na sfalowanym akwencie, wartości zmian obciążeń kadłuba wywołanych falą uzależnione są głównie od przyjętego w obliczeniach kształtu fali i jej położenia względem statku.

## 1. PROFIL FALI

Wartości obciążeń kadłuba wywołanych obecnością fali, zarówno wolnozmiennych, jak i dynamicznych, zależą w dużym stopniu od przyjętego w obliczeniach profilu fali. Obliczenia prezentowane w literaturze przedmiotu, wykonywane są dla statku na fali regularnej (aproksymującej powierzchniowe fale swobodne) oraz statku na fali nieregularnej (aproksymującej efekt nałożenia się szeregu powierzchniowych fal wymuszonych i swobodnych). Na akwencie nieograniczonym falowanie wymuszone wywołane jest działaniem wiatru czy ruchem statku, natomiast falowanie swobodne występuje po upływie pewnego czasu od momentu ustania działania wiatru, w postaci fali martwej [6]. Na fali regularnej, przy rozważaniu układów quasi-statycznych, występują maksymalne zmiany (w stosunku do wody spokojnej) wartości wolnozmiennych sił tnących i momentów gnących działających na belkę kadłuba, natomiast na fali nieregularnej dominującą rolę odgrywają obciążenia dynamiczne.

W celu uproszczenia rozważań przyjęto, że kadłub statku jest sztywną belką nieulegającą odkształceniom w efekcie działających na nią momentów gnących oraz że kierunek propagacji fali obliczeniowej pokrywa się z płaszczyzną symetrii statku – analogiczne założenie przyjęto w [1, 2, 4, 9]. Drugie z wymienionych założeń powoduje, że w obliczeniach wytrzymałości kadłuba statku na fali uzyskuje się większe wartości zmian sił tnących i momentów gnących, ale pominięte zostają poziome siły tnące i momenty gnące oraz momenty skręcające, przy czym na podstawie wyników badań modelowych ustalono prostą zależność pomiędzy wywołanym falą momentem gnącym w płaszczyźnie poziomej  $Mg_x$  i płaszczyźnie pionowej  $Mg$  [8]:

$$Mg_x = a \cdot Mg,$$

gdzie  $a$  współczynnik zależy od długości statku, równy przykładowo:

0,650	dla	$L = 150$ m,
0,698	dla	$L = 250$ m,
0,741	dla	$L = 350$ m.

Wartość współczynnika  $a$  wskazuje, że momenty gnące wywołane w płaszczyźnie poziomej są znacząco mniejsze niż w płaszczyźnie pionowej i dlatego pomijane są w większości analiz. Momenty skręcające, wywołane falowaniem, na statkach nieposiadających dużych otworów w pokładzie wytrzymałościowym nie wywołują naprężeń zagrażających ich konstrukcji – bezpośrednie zagrożenie stanowią jedynie dla statków, takich jak kontenerowce komorowe [8]. Tym niemniej naprężenia wywołane zarówno poziomymi momentami gnącymi, jak i momentami

skręcającymi stanowić mogą znaczną część ogólnego stanu naprężeń w poszczególnych przekrojach kadłuba.

Przyjmuje się, że najlepsze odwzorowanie profilu regularnej fali płaskiej uzyskuje się przy zastosowaniu równań trochoidy, ale ze względów obliczeniowych, a dokładnie w celu ich uproszczenia, równanie trochoidy zastępuje się zazwyczaj równaniem sinusoidy. Uproszczenie to jest tym bardziej właściwe, im większy jest stosunek długości fali do jej wysokości. Równanie regularnej, sinusoidalnej fali płaskiej dla wody głębokiej [6, 7, 11] określone względem statku przedstawia zależność dla rzędnej sfalowanej powierzchni:

$$\zeta(x, y, t) = a \cdot \cos(k \cdot x \cdot \cos\theta + k \cdot y \cdot \sin\theta - \omega_e \cdot t), \quad (1)$$

gdzie:

$\theta$  – kąt pomiędzy osią  $x$  statku a kierunkiem rozchodzenia się fali,

$k$  – liczba falowa:  $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$ ,

$\omega_e$  – częstość spotkaniowa:  $\omega_e = \omega - v \cdot k \cdot \cos\theta$ ,

$\omega$  – częstość fali:  $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ ,  $\omega^2 = g \cdot k$ ,

$v$  – prędkość statku wzdłuż osi  $x$ ,

$T$  – okres fali,

$\lambda$  – długość fali,

$a$  – amplituda fali.

Dla akwenu głębokiego, tzn. akwenu, którego głębokość przekracza  $0,5\lambda$ , należy uwzględnić zmiany ciśnienia wynikające z orbitalnego ruchu cząsteczek wody w fali, nazywane często efektem Smitha. Zmiany ciśnienia  $\Delta p$  dla cieczy idealnej w funkcji głębokości  $h$  (pionowej odległości od powierzchni wody) przedstawia równanie:

$$\Delta p(h) = \rho \cdot g \cdot e^{k \cdot h} \cdot \zeta(x, t). \quad (2)$$

Uwzględnienie w zależności (1) efektu opisanego wzorem (2), przyjęcie założenia, że obecność statku nie zaburza ani kształtu fali ani rozkładu ciśnienia (hipoteza Frouda-Kryłowa) oraz wprowadzenie zanurzenia zastępczego w danym przekroju  $\bar{T} \cong 0,5 T$  (zmiany  $\Delta p(h)$  przebiegają praktycznie liniowo), daje w efekcie zredukowany (obliczeniowy) profil fali regularnej:

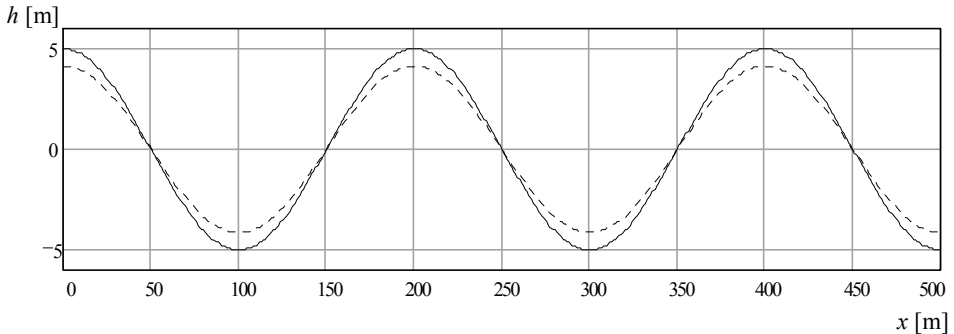
$$\zeta(x, t) = a \cdot e^{-k \cdot \bar{T}} \cdot \cos(k \cdot x \cdot \cos\theta + k \cdot y \cdot \sin\theta - \omega_e \cdot t) \quad (3)$$

Z kolei przyjęcie w zależności (3) podanego wcześniej uproszczenia, że kierunek propagacji fali obliczeniowej pokrywa się z osią  $x$  statku, pozwala sprowadzić ją do postaci:

$$\zeta(x, t) = a \cdot e^{-k \cdot \bar{T}} \cdot \cos(k \cdot x - \omega_e \cdot t), \quad (4)$$

gdzie częstość spotkaniowa:  $\omega_e = \omega - v \cdot k$ .

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy profil regularnej sinusoidalnej fali płaskiej o długości  $\lambda = 200$  m i amplitudzie 5 m, bez uwzględnienia efektu Smitha (linia ciągła) oraz z uwzględnieniem (linia przerywana) zależności (4).



**Rys. 1.** Profil regularnej sinusoidalnej fali płaskiej o długości  $\lambda = 200$  m i amplitudzie 5 m przed (linia ciągła) oraz po (linia przerywana) uwzględnieniu efektu Smitha

**Fig. 1.** A graph of a sinusoidal wave of  $\lambda = 200$  wavelength and 5 m amplitude before (solid line) and after (dotted line) including the Smith effect

Obraz powierzchni morza objętej falowaniem nieregularnym przedstawiany jest zazwyczaj jako wynik nałożenia się nieskończonej liczby elementarnych, sinusoidalnych fal progresywnych o różnych częstościach, amplitudach oraz kierunkach rozchodzenia. Poszczególne fale składowe nazywane są falami harmonicznymi, a sam proces falowania uznaje się za stacjonarny w czasie oraz jednorodny w przestrzeni [3]. Do celów obliczeniowych, przy wyznaczaniu profilu fali nieregularnej, przyjmuje się jednak ograniczoną ilość fal elementarnych, a profil pojedynczej fali zapisany przy użyciu liczb zespolonych ma postać:

$$\zeta(x, y, t) = a \cdot e^{i[k(x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega_e t]}, \quad (5)$$

gdzie  $\theta$  kąt, jaki tworzy kierunek rozchodzenia się danej fali harmonicznej z osią  $x$  przyjętego układu.

Realizacja, w stałym punkcie akwenu, procesu zmian wysokości fali, którą napotyka statek pływący z prędkością  $v$ , może być wykonana za pomocą zależności (6) prezentowanej w pracy [1]. W zależności tej, podobnie jak w (4), przyjęto, że kierunek propagacji wynikowej fali nieregularnej pokrywa się z osią  $x$  statku.

$$\zeta(t) = \sum_{j=1}^R \zeta_j(t) = \sum_{j=1}^R a_j \cdot e^{-i(\omega_{ej}t + \varepsilon_j)}, \quad (6)$$

gdzie:

$R$  – liczba składowych fal harmonicznymi,

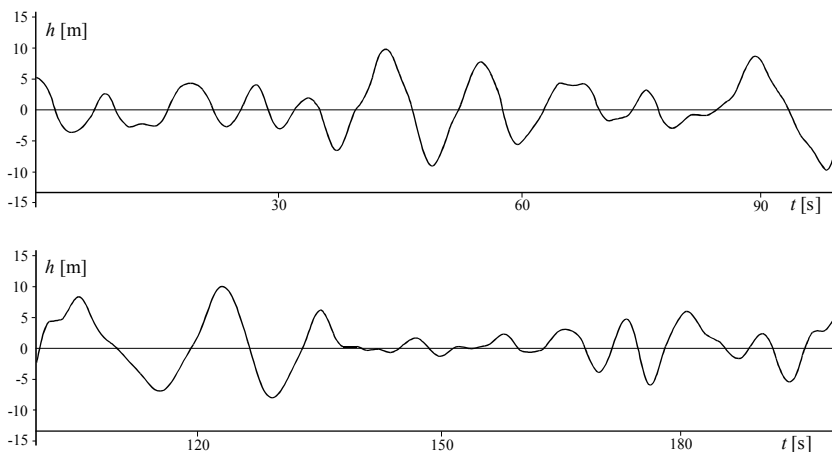
$\omega_{ej}$  – częstość spotkaniowa  $j$ -tej fali harmonicznej:  $\omega_{ej} = \omega_j - v \cdot \omega_j^2 \cdot \cos \theta / g$ ,

$\varepsilon_j$  – kąt przesunięcia fazowego  $j$ -tej fali harmonicznej,

$\theta_j$  – kąt, jaki tworzy  $j$ -ta fala harmoniczna z osią  $x$  statku.

Amplitudy poszczególnych składowych fal harmoniczych, charakteryzujących się określoną częstotliwością  $\omega_j$ , wyznacza się na podstawie funkcji gęstości widmowej energii falowania. Parametrami wejściowymi mogą być: prędkość wiatru, znacząca wysokość fali  $\zeta_{w\ 1/3}$  czy okres charakterystyczny fali  $T_1$ , natomiast wartości  $\varepsilon_j$  oraz  $\theta_j$  wyznaczone są losowo, co oznacza, że biorąc pod uwagę pojedynczy wykres gęstości widmowej energii falowania można uzyskać nieskończoną liczbę profili fali nieregularnej. Jeżeli obliczenia wytrzymałościowe kadłuba przeprowadzane są dla konkretnego akwenu, najlepiej posłużyć się funkcjami gęstości widma energii falowania, uzyskanymi z pomiarów wykonanych na określonym akwenu, natomiast w przypadku obliczeń ogólnych wykorzystuje się wykresy funkcji gęstości energii falowania zalecane przez Międzynarodową Konferencję Basenów Holowniczych (ITTC) lub Międzynarodowy Kongres Wytrzymałości Statków (ISSC).

Na rysunku 2 przedstawiono prezentowaną w [2] realizację płaskiej fali nieregularnej dla akwenu objętego tajfunem, uzyskaną według zależności (6), po złożeniu 350 składowych fal harmoniczych, określonych na podstawie funkcji rozkładu gęstości energii falowania podanej przez ISSC dla znaczącej wysokości fali  $\zeta_{w\ 1/3} = 16\text{ m}$  i okresu charakterystycznego  $T_1 = 12\text{ s}$ .



**Rys. 2.** Realizacja płaskiej fali nieregularnej wyznaczona na podstawie funkcji rozkładu gęstości energii falowania podanej przez ISSC dla fali  $\zeta_{w\ 1/3} = 16\text{ m}$  i  $T_1 = 12\text{ s}$

**Fig. 2.** Realization of the random sea determined by an ISSC spectrum with  $\zeta_{w\ 1/3} = 16\text{ m}$  and  $T_1 = 12\text{ s}$

## 2. PROPOZYCJA ZALEŻNOŚCI WYZNACZAJĄCYCH ZMIANY SIŁ TNĄCYCH I MOMENTÓW GNĄCYCH WYWOŁANYCH FALĄ

Przeprowadzone obliczenia oraz badania modelowe wykazują, że przy rozważaniu układów quasi-statycznych największe zmiany wolnozmiennych momentów gnących występują, niezależnie od prędkości statku, przy płynaniu na fali regular-

nej, przeciwnej lub nadążającej, o długości  $\lambda$  nieznacznie przewyższającej długość statku [3]. W związku z tym w obliczeniach wytrzymałości kadłuba na fali przyjmuje się, że jej długość  $\lambda$  równa jest długości statku, natomiast obliczeniową wysokość fali  $h_1$  ustala się w zależności od jej długości  $\lambda$ , np. według zależności:

- fala standardowa  $h_1 = \frac{1}{20} \lambda$  ( $\lambda$  w metrach);
- ABS  $h_1 = 0,6 \cdot \lambda^{0,6}$  ( $\lambda$  w stopach);
- Lloyd's Register of Shipping  $h_1 = 1,1 \cdot \sqrt{\lambda}$  ( $\lambda$  w stopach).

W obliczeniach wykonanych w prezentowanym opracowaniu przyjęto wysokość fali określoną według Lloyd's Register of Shipping.

Dane do analizy obciążeń kadłuba statku na fali regularnej uzyskano poprzez określenie funkcji wyznaczających zmiany sił tnących i momentów gnących wywołane zmianą kształtu wodnicy, zakładając, że statek i fala są chwilowo nieruchome. Zależność początkową, opisującą zmiany rozkładu siły wyporu na długości kadłuba, przedstawia wzór:

$$\Delta W(x) = \rho \cdot g \cdot B(x) \cdot \Delta T(x),$$

gdzie:

- $B(x)$  – zależność opisująca szerokość kadłuba w funkcji jego długości,
- $\Delta T(x)$  – zmiany zanurzenia statku w przekroju  $x$  wywołane obecnością fali.

Zmiany szerokości kadłuba na jego długości aproksymowano za pomocą elipsy, bez uwzględnienia położenia geometrycznego środka pola powierzchni wodnicy pływania  $x_S$  oraz za pomocą szerokości średniej  $B_m = A_{WT}/L$ .

Zmiany zanurzenia w przekroju o odciętej  $x$  wywołane obecnością fali zgodne są z kształtem profilu fali opisanym funkcją (4). Obliczenia powinno się przeprowadzić dla szeregu pozycji statku względem fali (przesuwając falę wzdłuż kadłuba), ale ponieważ najgorszą sytuacją ze względu na występujące zmiany obciążeń jest usytuowanie statku na grzbiecie oraz w dolinie fali [8], to w dalszej części analizowane są tylko te dwa przypadki:

- $\Delta T(x) = a \cdot e^{-k \cdot \bar{T}} \cdot \cos(k \cdot x)$  zmiany zanurzenia na długości kadłuba statku na grzbiecie fali;
- $\Delta T(x) = a \cdot e^{-k \cdot \bar{T}} \cdot \cos(k \cdot x - \pi)$  zmiany zanurzenia na długości kadłuba statku w dolinie fali.

Profil fali opływającej kadłub musi być tak dobrany, aby obliczone: wyporność i środek wyporności odpowiadały wartościom określonym dla statku na wodzie spokojnej. Obliczeniowo uzyskuje się to przez przesunięcie profilu fali wzdłuż statku [8] oraz zmianę jego zanurzenia aż do spełnienia obu warunków. Ponieważ jednak w ramach obliczeń wyznaczane były tylko zmiany obciążeń, za  $B(x)$  przyjęto funkcje (elipsy/szerokości średniej), dające identyczne zmiany szerokości kadłuba w przekrojach równoodległych względem przekroju owręża ( $x_S = 0$ ), oraz rozważano tylko przypadki położenia kadłuba na grzbiecie i w dolinie fali, jedyny problem stanowiło uzyskanie zgodności wartości sił wyporu w przypadku aprok-

symacji szerokości statku funkcją elipsy. Zgodność tę zapewniono, zwiększając zanurzenie statku w dolinie oraz zmniejszając je na grzbiecie fali. W efekcie otrzymano cztery funkcje zmiany siły wyporu na jednostkę długości kadłuba:

- dla statku na grzbiecie fali przy aproksymacji wodnicy elipsą:

$$\Delta W(x) = \rho \cdot g \cdot \frac{4 \cdot A_{WL}}{\pi \cdot L} \cdot \sqrt{1 - \frac{4 \cdot x^2}{L^2}} \cdot a \cdot e^{-k \cdot \bar{T}} \cdot [\cos(k \cdot x) - 0,18119];$$

- dla statku w dolinie fali przy aproksymacji wodnicy elipsą:

$$\Delta W(x) = \rho \cdot g \cdot \frac{4 \cdot A_{WL}}{\pi \cdot L} \cdot \sqrt{1 - \frac{4 \cdot x^2}{L^2}} \cdot a \cdot e^{-k \cdot \bar{T}} \cdot [\cos(k \cdot x - \pi) + 0,18119];$$

- dla statku na grzbiecie fali przy aproksymacji wodnicy szerokością średnią:

$$\Delta W(x) = \rho \cdot g \cdot \frac{A_{WL}}{L} \cdot a \cdot e^{-k \cdot \bar{T}} \cdot \cos(k \cdot x);$$

- dla statku w dolinie fali przy aproksymacji wodnicy szerokością średnią:

$$\Delta W(x) = \rho \cdot g \cdot \frac{A_{WL}}{L} \cdot a \cdot e^{-k \cdot \bar{T}} \cdot \cos(k \cdot x - \pi).$$

Problemem powyższych funkcji jest założenie, że w zakresie odkształcenia wodnicy względem wody spokojnej burty statku są prostopadłe względem płaszczyzny wodnicy, co jest bliskie rzeczywistości tylko w okolicy śródokręcia, natomiast w przypadku dziobu i rufy niektórych statków może stanowić już problem.

Dysponując funkcją wyznaczającą zmiany siły wyporu na długości kadłuba, przy jednoczesnym braku zmiany rozkładu sił ciężaru, wartości wywołanych obecnością fali zmian sił tnących oraz momentów gnących wyznaczono według zależności:

$$\Delta ST(x) = - \int_{-L/2}^x \Delta W(x) dx, \quad (11)$$

$$\Delta Mg(x) = \int_{-L/2}^x \Delta ST(x) dx = \int_{-L/2}^x \int_{-L/2}^x \Delta W(x) dx. \quad (12)$$

Aby uzyskać potwierdzenie, że wyprowadzone zależności dają poprawne wyniki, wykonano w pierwszej kolejności obliczenia dla statku przedstawionego w publikacji [9], w której m.in. zaprezentowano i wykorzystano opracowaną przez Lukakisa i Chrysostomidisa metodę krótkoterminowego prognozowania średniokwadratowej wartości (rms) maksymalnego momentu gnącego od fali. Metoda uwzględnia m.in. czas przejścia morzem oraz ruchy statku na fali, uzależnione od jego wymiarów, prędkości i znaczącej wysokości fali. Zwiększenie prędkości od 0 do 16 węzłów powoduje wzrost wywołanego falą momentu gnącego na owrężu o około 12%. Zmiany wartości momentu gnącego na śródokręciu, prezentowane w publikacji [9] oraz uzyskane według proponowanych zależności (dla aproksyma-

cji szerokości kadłuba elipsą), wykazały dużą zgodność dla fal o wysokości przekraczającej 5–6 m (rys. 5). Dla fal małych rozbieżności były duże, ale niedokładności wystąpiły raczej w metodzie wykorzystanej w publikacji [9], gdyż wyznaczone przez nią zmiany momentu gnącego na fali o wysokości znaczącej poniżej 2 m, dla statku o długości 215 m, były równe 0. Tym niemniej metoda ta jest godna uwagi, gdyż w obliczeniach obciążeń ogólnych kadłuba istotne są zawsze maksymalne wartości momentów gnących, jakie mogą pojawić się w trakcie eksploatacji statku.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono zmiany sił tnących i momentów gnących kadłuba zbiornikowca o długości  $L = 283$  m, wywołane obecnością fali o długości równej długości statku i wysokości ustalonej według Lloyd's Register of Shipping. Obliczenia wykonano według zależności podanych powyżej, wykorzystując w tym celu program MathCad. Na rysunku 4 dodatkowo naniesione linie przerywane wyznaczają wartość momentu gnącego od fali, jaki jest uwzględniony przez projektanta statku przy wyznaczaniu minimalnej wartości wskaźnika poprzecznego przekroju kadłuba w środkowej części statku (dla  $-0,1L \leq x \leq 0,15L$ ) [5]:

$$W = \frac{M_S + M_W}{\sigma} \cdot 10^3 \text{ [cm}^3\text{]}, \quad (13)$$

gdzie:

- $M_S$  – obliczeniowy moment gnący kadłub na wodzie spokojnej,
- $M_W$  – pionowy falowy moment gnący kadłub,
- $\sigma$  – dopuszczalne naprężenie normalne.

Wartość  $M_S$  wynika ze sposobu rozmieszczenia ciężarów na statku, przewidzianego jako typowe stany załadowania, natomiast  $M_W$  według IACS [5] określa się z zależności:

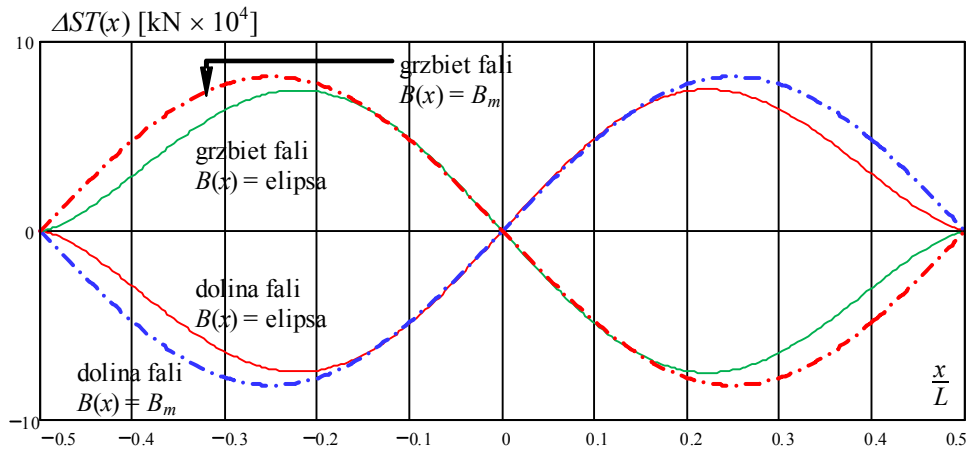
$$\begin{aligned} M_W &= -0,11 \cdot C_W \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_B + 0,7) \quad \text{[kNm]} && \text{dla ugięcia kadłuba,} \\ M_W &= 0,19 \cdot C_W \cdot L^2 \cdot B \cdot C_B \quad \text{[kNm]} && \text{dla wygięcia kadłuba,} \end{aligned}$$

gdzie  $C_W$  współczynnik falowy:

$$C_W = 10,75 - \left[ \frac{300 - L}{100} \right]^{1,5} \quad \text{dla statków o długości } 90 \text{ m} \leq L \leq 300 \text{ m.}$$

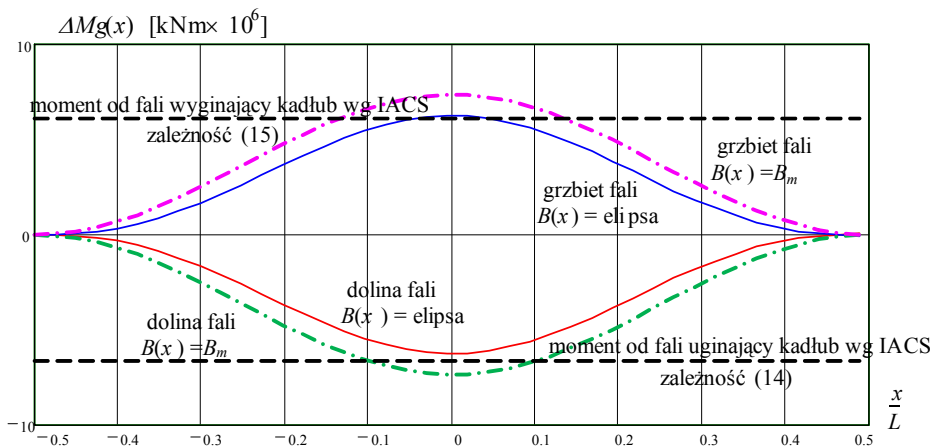
Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że  $M_W$  określony w proponowany sposób uwzględnia w obliczeniach wytrzymałości kadłuba falę regularną o długości równej długości statku i wysokości, w przybliżeniu nie większej niż określona według Lloyd's Register of Shipping:  $h_1 = 1,1 \cdot \sqrt{\lambda}$ . PRS, posługujący się identycznymi zależnościami przy wyznaczaniu wskaźnika poprzecznego przekroju w środkowej części statku, zaznacza, że prawdopodobieństwo przekroczenia wartości obciążeń od fali określonych zależnościami (14) i (15) jest nie większe niż  $10^{-8}$  [10].





**Rys. 3.** Zmiany sił tnących na długości kadłuba zbiornikowca ( $L = 283$  m) wywołane falą o długości równej długości statku i wysokości  $h_1 = 10,22$  m

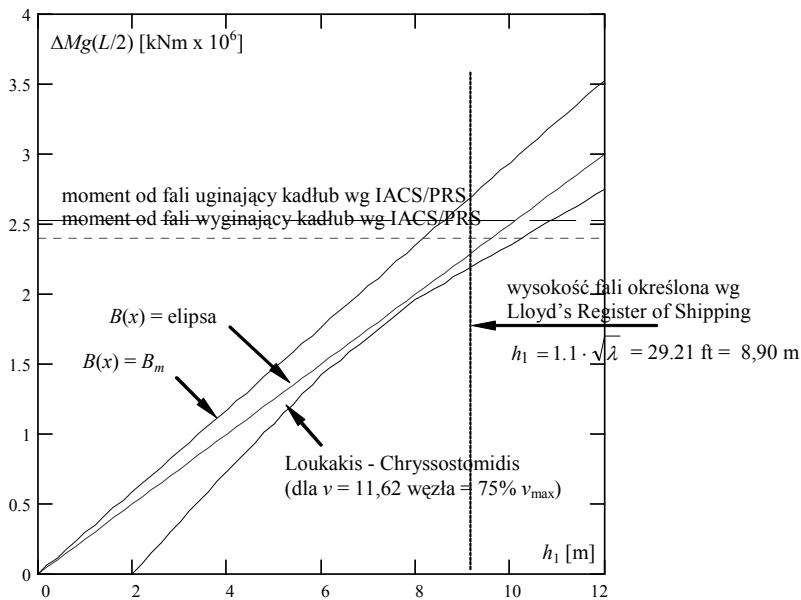
**Fig. 3.** Change of shear forces exerted on the hull length caused by occurrence of a wave with wavelength equal to the hull length and height  $h_1 = 10.22$  m, for the 283 m tanker



**Rys. 4.** Zmiany momentów gnących na długości kadłuba zbiornikowca ( $L = 283$  m) wywołane falą o długości równej długości statku i wysokości  $h_1 = 10,22$  m

**Fig. 4.** Change of bending moments exerted on the hull length caused by occurrence of a wave with wavelength equal to the hull length and height  $h_1 = 10.22$  m, for the 283 m tanker

Na rysunku 5 pokazano zmiany momentu gnącego na owręzu masowca o długości 215 m, wywołane falą regularną o długości równej długości statku, w zależności od jej wysokości. Wartości  $\Delta Mg$  określone zostały metodą proponowaną w niniejszej pracy oraz metodą Loukakisa-Chryssostomidisa wykorzystaną w [9]. Dla porównania naniesiono również moment falowy określony zgodnie z przepisami IACS [5].



**Rys. 5.** Zmiany momentu gnącego w płaszczyźnie owręza masowca o długości  $L = 215$  m, wywołane falą o długości równej długości statku, w zależności od wysokości fali  $h_1$

**Fig. 5.** Change of bending moments at the midship section of the 215 m bulker, caused by a wave with wavelength equal to the hull length depending on the wave height  $h_1$

## PODSUMOWANIE

Analiza wyników obliczeń oraz sporządzonych na ich podstawie wykresów (rys. 3–5), jak i przytoczonych publikacji, pozwala na stwierdzenie, że proponowana metoda wyznaczania zmian obciążeń kadłuba statku, wywołanych obecnością fali regularnej, daje dla przekroju owręza rezultaty zbliżone do metody Loukakisa-Chryssostomidisa oraz IACS. Przewagą proponowanej metody jest to, że pozwala wyznaczyć zmiany wartości sił tnących oraz momentów gnących na długości całego kadłuba, a nie tylko dla przekroju owręza. Przy aproksymacji wodnicy prostokątem o szerokości średniej  $B_m$  uzyskuje się większe wartości zmian momentu gnącego niż przy zastosowaniu elipsy i zarazem mocniej odbiegające od metody Loukakisa-Chryssostomidisa, ale rozwiązanie całek (11) i (12) nie sprawia większego kłopotu, podczas gdy po podstawieniu zależności (7) i (8) nie udało się znaleźć rozwiązania całek (obliczenia wykonane zostały za pomocą programu MathCad przy użyciu metod numerycznych). Dodatkową zaletą metody jest to, że można wykonać obliczenia zmian wartości sił tnących i momentów gnących wywołanych falą niezależnie od stanu załadowania statku, tylko na podstawie jego ogólnych danych, zanurzenia oraz parametrów fali.

Proponowana metoda posiada jednak ograniczenia. Pierwszym są układy dla fal, których profile wynikające z wysokości fali wystają ponad pokład lub poniżej

dna kadłuba. Drugie ograniczenie stanowią statki o znaczącej zmienności szerokości wodnicy, w funkcji zanurzenia, w dziobowej i rufowej części kadłuba.

## LITERATURA

1. Aksu S., Bishop R.E.D., Price W.G., Temarel P., *On the behaviour of a product carrier in ballast travelling in a seaway*, Trans RINA 1991, p. 145–159.
2. Bishop R.E.D., Price W.G., Temarel P., *A theory on the loss of the m/v DERBYSHIRE*, Trans. RINA 1991, p. 389–453.
3. Dudziak J., *Okręt na fali*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1980.
4. Hansen P.F., *On Combination of Slamming- and Wave-Induced Responses*, Journal of Ship Research, Vol. 38, No. 2, June 1994, p. 104–114.
5. IACS Unified Requirements, *S11 Longitudinal strength standard*, IACS Req. 1993, IACS Requirements concerning Strength of ships, IACS Req. 2010.
6. Krężelewski M., *Hydromechanika ogólna i okrętowa*, część II, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1982.
7. Neumann G., Pierson W.J., *Principles of physical oceanography*, Prentice-Hall Inc. New Jersey 1966.
8. Orszulok W., *Wytrzymałość kadłuba statku w eksploatacji*, Wydawnictwo Morskie, Gdynia 1983
9. Paik J.K., Thayamballi A.K., Yang S.H., *Residual Strength Assessment of Ships after Collision and Grounding*, Marine Technology, Vol. 35, No. 1, January 1998, p. 38–54.
10. *Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich PRS*, część IV, *Stateczność i niezatapialność*, PRS, Gdańsk 2010, część II, *Kadłub*, PRS, Gdańsk 2011.
11. Więckowski J., *Mechanika konstrukcji okrętowych*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1985.

## CHANGES OF THE HULL SHEAR FORCES AND BENDING MOMENTS OF A SHIP IN WAVES

### Summary

*The study contains a proposal of formulas defining the changes of the hull shear forces and bending moments exerted on the ship by the presence of waves. Dependencies are derived for the wave length equal to the length of the hull at the waterline approximation calculated using an ellipse. The study also includes examples of results obtained from calculations performed using suggested dependency and their comparison with other selected approaches to determining changes of the hull shear forces and bending moments caused by the wave.*

**Keywords:** *ship hull strength, ship in waves, ship hull strength control.*