

Nr 102/2017, 80–95
ISSN 1644-1818
e-ISSN 2451-2486

WPLYW WIATRU, PRĄDU I FALOWANIA NA BEZPIECZEŃSTWO CUMOWANIA ZBIORNIKOWCA W TERMINALU

WIND'S WAVES' AND CURRENT'S INFLUENCE ON SAFETY OF TANKER'S MOORING IN OIL TERMINAL

Jarosław Soliwoda, Przemysław Wilczyński

Akademia Morska w Gdyni, al. Jana Pawła II 3, 81-345 Gdynia, Wydział Nawigacyjny,
Katedra Eksploatacji Statku, e-mail: jsoliwoda@wp.pl; p.wilczynski@wn.am.gdynia.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wpływ oddziaływania wiatru i prądu na zacumowany zbiornikowiec oraz reakcje lin cumowniczych na ruch statku, wywołany falowaniem wewnątrz portu. Podczas operacji ładunkowych zmienia się powierzchnia oddziaływania wiatru na statek, podwodna powierzchnia kadłuba statku wystawiona na działanie prądu, a także wartość wysokości metacentrycznej, które mają znaczący wpływ na wytrzymałość lin i urządzeń cumowniczych statku.

Słowa kluczowe: urządzenia cumownicze, liny cumownicze, parametry wytrzymałościowe lin cumowniczych.

Abstract: Paper present influence of the wind and current on mooring tanker and the reaction of mooring lines on the ship movement in port caused by waves. During cargo operations dynamically change windage area, submerged part of tankers and also metacentric height, which have great impact on the strength in mooring lines and ship's equipment.

Keywords: mooring equipment, mooring lines, ropes strength parameters.

1. WSTĘP

Zagadnienie bezpiecznego cumowania i postoju zbiornikowców stanowi wyzwanie dla wielu operatorów terminali olejowych na całym świecie. Zmieniające się warunki pogodowe wpływają na powstawanie zagrożenia dla terminali spowodowanego obecnością statków, które nie są do końca przygotowane na ww. warunki.

Mimo zaawansowanej techniki pomiarowej zdolnej do wyznaczenia naprężenia liny na każdym z haków cumowniczych oraz możliwości monitorowania danych z kilku urządzeń pomiarowych wciąż dochodzi do wypadków w termina-

lach, spowodowanych zerwaniem lin cumowniczych. Zerwanie lin cumowniczych statku może być przyczyną niekontrolowanego odcumowania zbiornikowca od nabrzeża.

Tego typu sytuacje powinny być przedmiotem analizy związanej z wyznaczeniem granicznych wartości sił zewnętrznych działających na zjawisko odpychania statku od nabrzeża [China Classification Society 2010].

Warto nadmienić, że wciąż głównymi czynnikami powodującymi wcześniej wymienione wypadki są zmienne warunki pogodowe i właściwy dobór wielkości statku do nabrzeża w terminalu.

Organizacje międzynarodowe, takie jak ICS (*International Chamber of Shipping*), OCIMF (*Oil Companies International Marine Forum*), SIGTTO (*Society of International Gas Tanker and Terminal Operators Limited*) oraz PIANC (*Permanent International Association of Navigation Congresses*), kładą nacisk na bezpieczny postój i eksploatację zbiornikowców w terminalach portowych, czego wynikiem są liczne publikacje dotyczące eksploatacji i przygotowania osprzętu cumowniczego zbiornikowców, opatrzone zawsze obszernym komentarzem.

Osprzęt cumowniczy zbiornikowców wraz z używanymi linami cumowniczymi stanowi przedmiot wielu inspekcji i testów, które każdy zbiornikowiec przechodzi kilkakrotnie w ciągu roku.

Jednak w wielu przypadkach, jak pokazuje praktyka, stosowanie zaleceń z publikacji OCIMF i PIANC okazało się niewystarczające. Co jest przyczyną lub co powoduje, że liny cumownicze są zrywane, a w konsekwencji statek nie ma możliwości utrzymania się przy nabrzeżu [IACS 2007]?

Istota problemu tkwi w statycznym i dynamicznym działaniu trzech elementów: wiatru, prądu oraz generowanego przez wiatr falowania. Zasadniczym czynnikiem, decydującym o bezpiecznym postoju oraz operacjach ładunkowych tankowca w terminalu olejowym, jest prawidłowa praca cum przytrzymujących statek. Zastosowany układ cumowania statku musi wytrzymać obciążenia pochodzące od czynników zewnętrznych, takich jak falowanie morza, działanie wiatru i prądu wodnego. W standardowych technikach obliczeniowych wytrzymałości cumowania statku przyjmuje się oddziaływania statyczne, a oddziaływania dynamiczne są zabezpieczane przez współczynnik bezpieczeństwa. Oddziaływanie dynamiczne czynników zewnętrznych wywołuje zmienne wartości sił oscylujących w czasie. Powoduje to powstanie nieregularnych ruchów statku, takich jak kołysanie i nurzanie, które może stanowić zagrożenie dla systemu cumowania.

2. SIŁY ZEWNĘTRZNE ODDZIAŁUJĄCE NA STATEK

Siły zewnętrzne oddziałujące na zacumowany przy nabrzeżu zbiornikowiec ze względu na sposób ich działania podzielić można na:

- statyczne, związane ze stałym oddziaływaniem wiatru i prądu;
- dynamiczne, związane z podmuchami wiatru i falowaniem.

Wartości wspomnianych sił zewnętrznych będą zmieniać się w funkcji zmian zanurzenia zbiornikowców, prowadzących operacje ładunkowe. Na zbiornikowiec bowiem w stanie załadowanym znaczny wpływ ma kierunek i prędkość prądu, w stanie balastowym zaś większy wpływ na wynurzony statek wywiera kierunek i prędkość wiatru [OCIMF 2008; Clark 2009; PIANC 2016].

Wśród zaobserwowanych zjawisk wymienić można:

- równoległe odejścia zbiornikowców od nabrzeża wskutek działania odpychającego wiatru;
- przemieszczenie zbiornikowców wzdłuż nabrzeża spowodowane działaniem silnego prądu i dopychającym wiatrem;
- odejście i skośne przemieszczenie się statku wskutek powstającego momentu obracającego od wiatru, powodującego zerwanie się części lin i obrót statku wywołany nierównomiernym rozłożeniem siły wiatru na wynurzoną część statku.

2.1. Wiatr

Zbiornikowiec w stanie balastowym zacumowany w terminalu jest przede wszystkim narażony na działanie wiatru. Powierzchnia nawiewu czołowego, jak i boczno statku w stanie balastowym jest kilkakrotnie większa niż w stanie załadowanym. Zbiornikowiec w stanie balastowym charakteryzuje również stosunkowo duża wartość wysokości metacentrycznej, a także niewielkie wartości poprawek na swobodne powierzchnie cieczy w zbiornikach. Parametry te pozwalają mu na zachowanie dobrej stateczności początkowej i szybką reakcję zbiornikowca na działanie wiatru.

Kierunek wiatru zbliżony do prostopadłego względem statku oraz odpychający statek do nabrzeża powoduje odejście równoległe zbiornikowca od nabrzeża po zerwaniu lub poluzowaniu lin cumowniczych. Dodatkowo wielkość nadbudówki, usytuowanej w części rufowej statku, wpływa na powstanie momentu obracającego, przez co statek po odejściu od nabrzeża obraca się, niszcząc część nabrzeża w części dziobowej.

Wiatr działający na statek z kierunków od dziobu czy rufy generuje dużo mniejsze siły niż ten wiejący z burty ze względu na mniejszą powierzchnię nawiewu zbiornikowca na kierunku wzdłużnym. Jednak jego większe odchylenie od tego kierunku powoduje powstawanie znacznego momentu obracającego statek, w wyniku czego tylko część lin cumowniczych jest obciążana do wartości maksymalnych.

Zależność siły zewnętrznej powodowanej statycznym działaniem wiatru w zależności od powierzchni nawiewu i prędkości wiatru określa publikacja MEG (*Mooring Equipment Guidelines*) [OCIMF 2008].

Do obliczeń sił zewnętrznych związanych z oddziaływaniem wiatru używa się prędkości wiatru działającego na statek V_w ze wzoru poniżej. Do kalkulacji

prędkość wiatru jest określana z poniższej zależności (1) w odległości 10 m od statku na podanej wysokości [IACS 2007; OCIMF 2008]:

$$V_w = v_v \left(\frac{10}{h} \right) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (1)$$

gdzie:

- V_w – prędkość wiatru w odległości 10 m od statku [m/s],
- v_v – zmierzona prędkość wiatru na podanej wysokości h [m/s],
- h – podana wysokość względem wodnicy pływania [m].

Powstające siły i momenty, z jakimi wiatr oddziałuje na zacumowany zbiornikowiec, określono wykorzystując poniższe wzory.

Siła oddziaływania wiatru na kierunku wzdłużnym [OCIMF 2008].

$$F_{xw} = 0,5 C_{xw} \rho_w V_w^2 A_T \quad [\text{kN}] \quad (2)$$

gdzie:

- C_{xw} – współczynnik nawiewu dla wzdłużnej siły oddziaływania wiatru,
- ρ_w – gęstość powietrza [t/m^3],
- V_w – wyznaczona prędkość wiatru [m/s],
- A_T – poprzeczna powierzchnia statku wystawiona na działanie wiatru [m^2].

Siła oddziaływania wiatru na kierunku poprzecznym [OCIMF 2008].

$$F_{yw} = 0,5 C_{yw} \rho_w V_w^2 A_L \quad [\text{kN}] \quad (3)$$

gdzie:

- C_{yw} – współczynnik nawiewu dla poprzecznej siły oddziaływania wiatru,
- ρ_w – gęstość powietrza [t/m^3],
- V_w – wyznaczona prędkość wiatru [m/s],
- A_L – wzdłużna powierzchnia statku wystawiona na działanie wiatru [m^2].

Moment obracający statek wywołany działaniem wiatru [OCIMF 2008].

$$M_{xyw} = 0,5 C_{xyw} \rho_w V_w^2 A_L L_{BP} \quad [\text{kNm}] \quad (4)$$

gdzie:

- C_{xyw} – współczynnik nawiewu dla momentu oddziaływania wiatru,
- ρ_w – gęstość powietrza [t/m^3],
- V_w – wyznaczona prędkość wiatru [m/s],
- A_L – wzdłużna powierzchnia statku wystawiona na działanie wiatru [m^2],
- L_{BP} – długość statku między pionami.

2.2. Prąd

Prądy powstające w wyniku oddziaływania wiatru lub spowodowane pływem wywierają znaczny wpływ na załadowany zbiornikowiec, którego większa część kadłuba jest zanurzona.

Wartość prędkości prądu uwzględnianą w dalszych obliczeniach określa poniższa zależność [OCIMF 2008].

$$V_c = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v_c) ds} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (5)$$

gdzie:

- V_c – średnia wartość prędkości prądu [m/s],
- T – zanurzenie statku [m],
- v_c – prędkość prądu w funkcji głębokości [m/s],
- s – głębokość wody mierzona od powierzchni wody [m].

Powstające siły i momenty, z jakimi prąd oddziałuje na zbiornikowiec, określono na podstawie poniższych wzorów.

Siła oddziaływania prądu na kierunku wzdłużnym [OCIMF 2008].

$$F_{xc} = 0,5 C_{xc} \rho_c V_c^2 L_{BP} T \quad [\text{kN}] \quad (6)$$

gdzie:

- C_{xc} – współczynnik dla wzdłużnej siły oddziaływania prądu,
- ρ_c – gęstość wody [t/m³],
- V_c – wyznaczona prędkość prądu [m/s],
- L_{BP} – długość statku między pionami [m],
- T – zanurzenie statku [m],

Siła oddziaływania prądu na kierunku poprzecznym [OCIMF 2008].

$$F_{yc} = 0,5 C_{yc} \rho_c V_c^2 L_{BP} T \quad [\text{kN}] \quad (7)$$

gdzie:

- C_{yc} – współczynnik dla poprzecznej siły oddziaływania wiatru,
- ρ_c – gęstość wody [t/m³],
- V_c – wyznaczona prędkość prądu [m/s],
- L_{BP} – długość statku między pionami [m],
- T – zanurzenie statku [m],

Moment obracający statek wywołany działaniem prądu [OCIMF 2008].

$$M_{xyc} = 0,5 C_{xyc} \rho_c V_c^2 L_{BP}^2 T \quad [\text{kNm}] \quad (8)$$

gdzie:

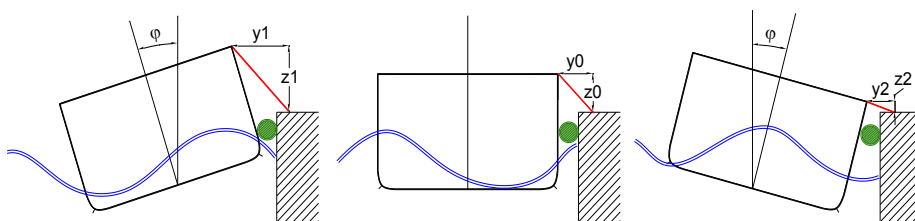
- C_{xyc} – współczynnik dla momentu oddziaływania wiatru,
- ρ_c – gęstość wody [t/m³],

V_c – wyznaczona prędkość prądu [m/s],
 L_{BP} – długość statku między pionami [m],
 T – zanurzenie statku [m].

2.3. Falowanie

Działanie falowania ma charakter dynamiczny, powoduje kołysanie boczne i nurzanie dynamiczne statku. Dynamiczna siła oddziaływania falowania na zacumowany zbiornikowiec zależy od parametrów fali, kierunku, wysokości i okresu rozchodzenia się fali.

Falowanie wywołuje zmiany położenia statku względem nabrzeża, przy czym statek załadowany jest mniej wrażliwy na działanie tegoż falowania. W miarę postępującego wyładunku statek wynurza się, co powoduje, że fala znacznie łatwiej unosi go do góry. Zmiana położenia statku względem nabrzeża w pionie prowadzi do zmian w naprężeniu lin cumowniczych, dodatkowo grzbiet fali po przejściu kadłuba statku powoduje jego przechył, a po odbiciu się od nabrzeża odpycha kadłub od nabrzeża. Wszystkie ruchy statku na fali wywołują zmianę wartości składowych (poziomych i pionowych) sił w linach cumowniczych (rys. 1).



Rys. 1. Kołysanie statku spowodowane falowaniem

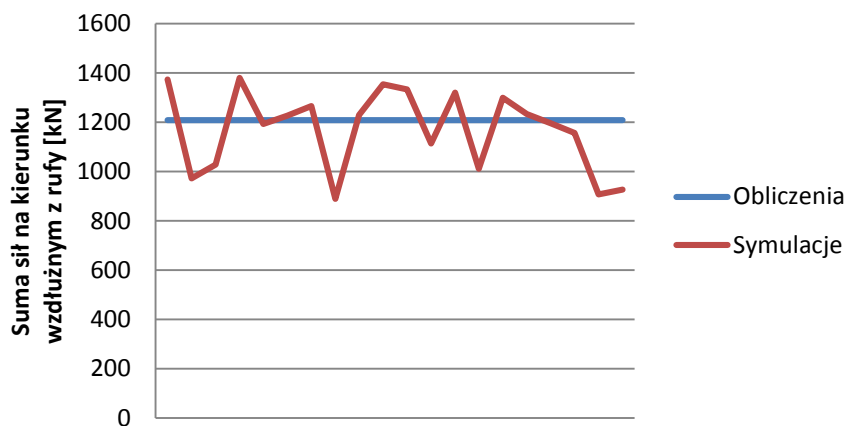
Fig. 1. Ship's rolling caused by waves

3. WYTRZYMAŁOŚĆ UKŁADU CUMOWNICZEGO

Dla wybranych dwóch kierunków i prędkości wiatru i prądu przeprowadzono także serię badań symulacyjnych dla zbiornikowca o tych samych parametrach.

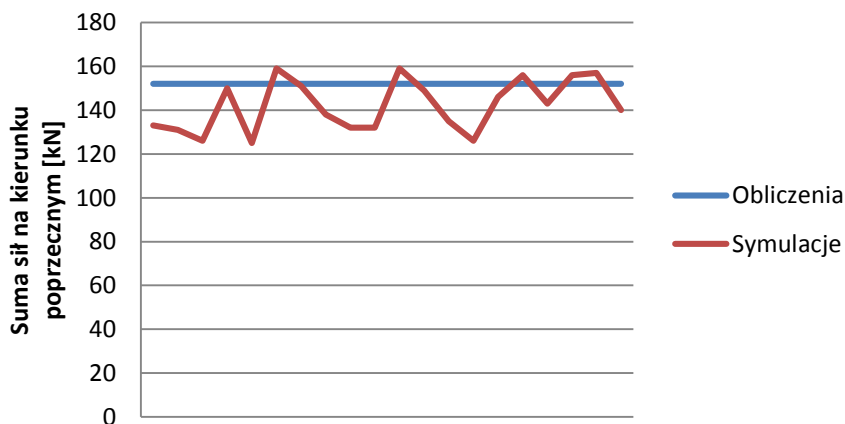
Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że oddziaływanie wiatru o tej samej prędkości niż ta w obliczeniach, ale z uwzględnieniem dynamiki jego oddziaływania na zbiornikowiec, daje wartości sił działających na zbiornikowiec znacznie większe.

W trakcie prowadzonych symulacji przy mniejszych wartościach prędkości wiatru część z lin cumowniczych ulegała zerwaniu lub poluzowaniu. Poniżej zamieszczono porównanie zależności sił działających na zbiornikowiec, uzyskane z kalkulacji i z badań symulacyjnych (rys. 2 i 3).



Rys. 2. Suma sił na kierunku wzdłużnym z rufy – zbiornikowiec w stanie załadowanym

Fig. 2. Total longitudinal forces from aft – tanker in loaded condition



Rys. 3. Suma sił na kierunku poprzecznym – zbiornikowiec w stanie załadowanym

Fig. 3. Total transverse forces – tanker in loaded condition

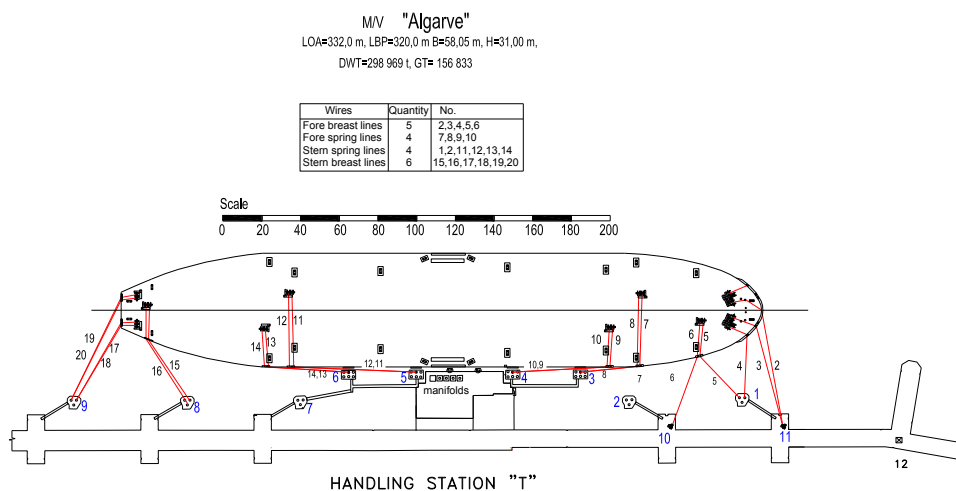
Wytrzymałość osprzętu cumowniczego zbiornikowca jest ściśle związana z jego wypornością, szerokością i wielkością powierzchni nawiewu. Wyznacza się ją na podstawie parametru *Equipment Number EN* z IMO MSC/Circ.1175.

Jako rekomendację w tym zakresie należy także wskazać MEG oraz inne publikacje OCIMF lub SIGTTO. Windy cumownicze, przewłoki i polery dostosowane są do parametrów wytrzymałościowych lin cumowniczych [IMO 2005; IACS 2007].

Najważniejszym parametrem lin cumowniczych jest ich MBL (*Minimum Breaking Load*). Siły przenoszone w linach cumowniczych oznacza się jako MSL

(*Maximum Securing Load*), a ich wytrzymałość do obliczeń przyjęto, zgodnie z zaleceniami MEG jako 60% wartości MBL dla liny nowej [IMO 2005; IACS 2007; OCIMF 2008; PIANC 2016].

Dla wartości 0,6 MBL lin cumowniczych wykonuje się test hamulca (*Brake Test*) dla wszystkich wind cumowniczych, będących na wyposażeniu statku. Wykonanie prawidłowo testu dla podanych wyżej wartości MBL lin cumowniczych i stosowanie takich ustawień podczas cumowania w terminalach powinno zapobiec przede wszystkim zrywaniu lin, gdyż wcześniej zacisk hamulca windy zostanie zwolniony, a lina odwinie się z bębna. Taka sytuacja zawsze pozwala na ponowne wybranie liny przez operatora, natomiast ustawienie hamulca powyżej wartości MBL cumy powoduje jej zerwanie i utratę kontroli nad zacumowaniem statku.



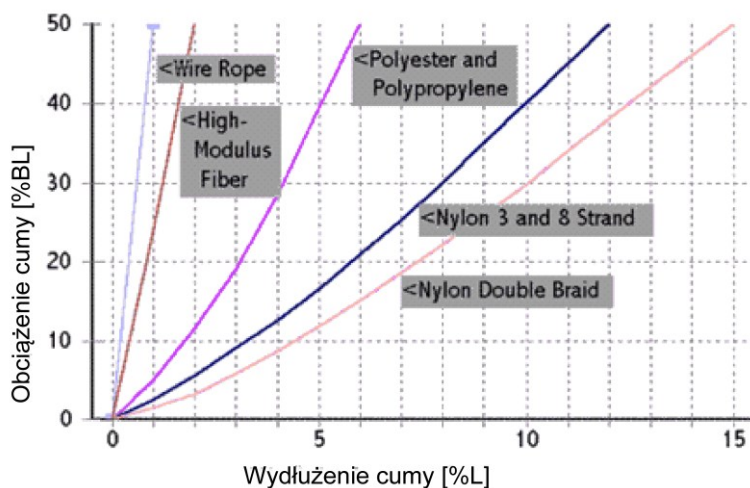
Rys. 4. Układ cumowniczy statku VLCC m/v „Algarve”
 [Królikowski, Soliwoda i Kucharski 2005]

Fig. 4. VLCC m/v „Algarve” tanker's mooring arrangement
 [Królikowski, Soliwoda and Kucharski 2005]

Podczas cumowania w terminalach naftowych nie dopuszcza się stosowania przez zbiornikowce lin cumowniczych o różnych parametrach wytrzymałościowych i znacznej elastyczności, gdyż może to powodować nierównomierne rozmieszczenie naprężeń w linach podczas przeciwdziałania siłom zewnętrznym.

Obecnie w użyciu jest wiele rodzajów lin cumowniczych, a ich parametry różnią się znacznie od siebie. Zastosowanie lin stalowych poprawia znacznie żywotność i wytrzymałość lin cumowniczych, jednak liny stalowe charakteryzuje niski moduł sprężystości, dlatego używane są zawsze z 11-metrowymi odcinkami lin miękkich [OCIMF 2008].

Rysunek 5 prezentuje zależność pomiędzy wydłużeniem liny a przyłożoną siłą. Stosowanie lin wykonanych z tworzyw sztucznych lub tylko odcinków poprawia sprężystość lin cumowniczych, a dodatkowo pozwala na odizolowanie od siebie statku i terminalu, zapobiegając w ten sposób przepływowi ładunków elektrostatycznych.



Rys. 5. Zależność rozciągliwości cumy i sił w niej występujących [Banfield, Ratcliffe i Flory 2014]

Fig. 5. Mooring line's elongation [Banfield, Ratcliffe i Flory 2014]

Współczynnik sprężystości cumy (k) określający, jakiej siły (F) należy użyć, aby rozciągnąć cumę na daną odległość (Δl), można ustalić z wyrażenia:

$$k = \frac{F}{\Delta l} \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right] \quad (9)$$

Współczynnik sprężystości można obliczyć również na podstawie zależności siły występującej w cumie jako % MBL i jej rozciągnięcia % l .

$$k = \frac{\text{MBL}}{l} \times \frac{\% \text{MBL}}{\% \Delta l} \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right] \quad (10)$$

gdzie:

- MBL – minimalna siła zrywająca, granica wytrzymałości (zerwania) cumy [kN],
- l – długość cumy [m].

Współczynnik sprężystości k jest zmienny i zależy od stanu naprężenia cumy. Bazując na współczynniku k , można określić wartości sił występujących w cumie oraz odnieść je do wartości dopuszczalnych MSL. Wartość siły, jaką może przenieść lina cumownicza, określa zależność:

$$F = k \times \Delta l \text{ [kN]} \quad (11)$$

gdzie:

- F – obciążenie w cumie [kN],
- Δl – przyrost długości cumy [m].

Oddziaływanie zbiornikowca na liny cumownicze ze względu na zjawiska fizyczne można podzielić na:

- oddziaływanie statyczne – wywołane wynurzeniem się statku podczas operacji ładunkowo-balastowych, podniesieniem poziomu powierzchni wody względem nabrzeża oraz stałym przechyłem statku związanym z niesymetrycznym rozłożeniem ładunku;
- oddziaływanie dynamiczne – wywołane ruchami kołyszącymi i nurzaniem dynamicznym statku.

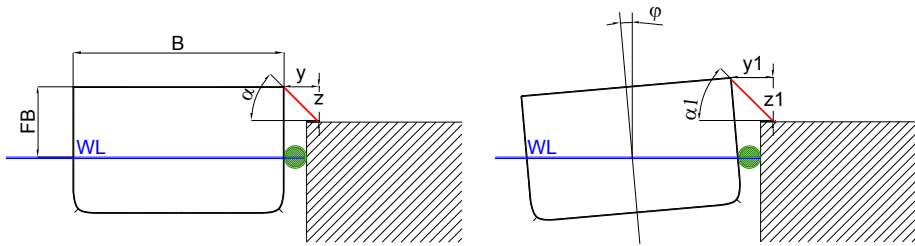
Założono, że jednym z zasadniczych parametrów, decydujących o wielkości obciążenia występującego w cumach, jest jego wysokość metacentryczna – GM . Obracanie statku, wywołane działaniem fali, będzie generowało naprężenia w cumach proporcjonalne do GM . Im większa wartość wysokości metacentrycznej, tym większe naprężenia w cumach. Wywołuje to działanie momentu prostującego, który ustawia statek równolegle pokładem do poziomu wody (fali). Znaczna wartość momentu prostującego powoduje powstawanie gwałtownych kołysań statku. Amplituda kołysań będzie więc zależała od nachylenia stoku fal (np. fala przybojowa w Porcie Północnym do 15° nachylenia) i rezonansu kołysań bocznych statku.

Oddziaływania statyczne powstają podczas długotrwałych zmian ustawienia statku względem nabrzeża i poziomu wody. Wynurzenie statku wywołane jest zazwyczaj wyładunkiem lub jego przedwczesnym balastowaniem podczas przyjmowania ładunku. Wartość wynurzenia statku, zmiana zanurzenia jest określona przez różnicę wolnych burt statku w czasie operacji ładunkowych (rys. 6). Wynurzenie statku powoduje zmianę położenia punktu zamocowania liny cumowniczej w pionie o wartość z , natomiast odległość poprzeczna tego punktu (y) nie ulegnie zmianie:

$$z_1 = z + \Delta z, \quad y_1 = y \quad (12)$$

gdzie:

- z – początkowe podniesienie punktu zaczepienia cumy na statku względem polera na nabrzeżu [m],
- y – poprzeczne położenie punktu zaczepienia cumy na statku względem polera na nabrzeżu [m],
- Δz – wynurzenie statku [m].



Rys. 6. Zmiany składowych (pionowej i poziomej) cumy
Fig. 6. Mooring line's parameters (vertical and horizontal distances)

Nowy kąt nachylenia (α_1) pionowego cumy można określić z wyrażenia:

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{z_1}{y_1}\right) [^\circ] \quad (13)$$

Wskutek podniesienia statku następuje wydłużenie cumy o wartość Δl przy założeniu, że statek nie wykonuje obrotu wywołanego oddziaływaniem cumy (rys. 7):

$$\Delta l = l_1 - l = \sqrt{z_1^2 - y^2} - \sqrt{z^2 - y^2} \text{ [m]} \quad (14)$$

Wywołane naprężenie w cumie spowoduje powstanie momentu obracającego statek. Początkowy moment przechylający (M_H) od działania cumy można określić z wyrażenia:

$$M_H = F \left(\frac{B}{2} + y\right) \times \sin(\alpha) \text{ [t} \cdot \text{m]} \quad (15)$$

Momentowi przechylającemu statek przeciwdziała moment prostujący M_R statku:

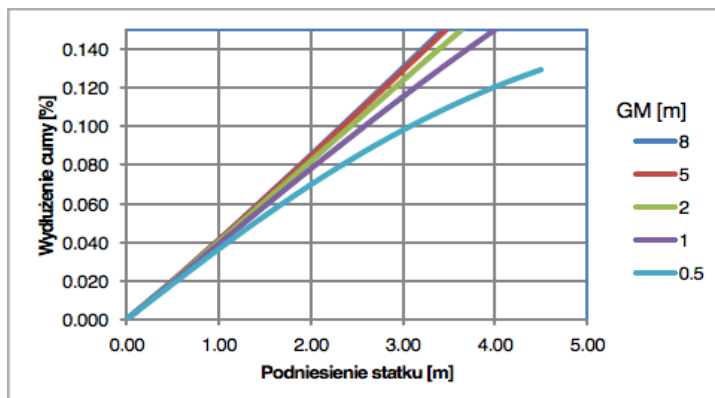
$$M_R(\varphi) = DGZ(\varphi) \cong \Delta GM \sin(\varphi) \quad (16)$$

Przy założeniu niewielkich kątów przechyłu statku ($<10^\circ$) kąt przechyłu statku można określić z wyrażenia:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{M_H}{\Delta GM}\right) \quad (17)$$

W przedstawionych poniżej przykładach obliczeniowych przyjęto następujące parametry statku: wyporność $D = 60\,000$ t, wolna burta $FB = 4,70$ m, szerokość statku $B = 30,50$ m. Dla uproszczenia modelu założono, że cumy są wykonane z jednego rodzaju materiału oraz mają jednakowe kąty ustawienia.

Początkowe położenie punktu zamocowania cumy na statku względem nabrzeża przyjęto: $z = 2,50$ m, a $y = 2,00$ m.



Rys. 7. Wydłużenie cumy podczas oddziaływania statycznego

Fig. 7. Elongation of the mooring lines during static force

Im większa wysokość metacentryczna statku, tym większe siły naprężenia występujące w linach cumowniczych podczas unoszenia burty statku do góry. Jednocześnie wraz ze wzrostem wartości wysokości metacentrycznej GM maleją przechyły statku, wywoływane przez liny cumownicze.

Zmiana wysokości punktu zamocowania cumy ze względu na przechył statku jest określana z wyrażenia:

$$\Delta z = \sqrt{FB^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2 \cdot \sin\left(\varphi + \arctg\left(\frac{2FB}{B}\right)\right)} - FB \text{ [m]} \quad (18)$$

Zmianę odległości poprzecznej zamocowania cumy ze względu na przechył statku obliczyć można z wyrażenia:

$$\Delta y = \sqrt{FB^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2 \cdot \cos\left(\varphi + \arctg\left(\frac{2FB}{B}\right)\right)} - \frac{B}{2} \text{ [m]} \quad (19)$$

Po uwzględnieniu przesunięcia poziomego (Δy) i pionowego (Δz) punktu mocowania liny cumowniczej ustala się nowy kąt nachylenia cumy:

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{z + \Delta z}{y + \Delta y}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (20)$$

Moment przechylający od cumy po uwzględnieniu przesunięcia poziomego i pionowego punktu jej mocowania określić można z zależności:

$$M_H = F \left(\frac{B}{2} + y + \Delta y\right) \sin \alpha_1 \text{ [kNm]} \quad (21)$$

Z równania momentów prostującego i przechylającego otrzymuje się siłę, wywołaną w linie cumowniczej na skutek przechylenia statku o wartość kąta φ :

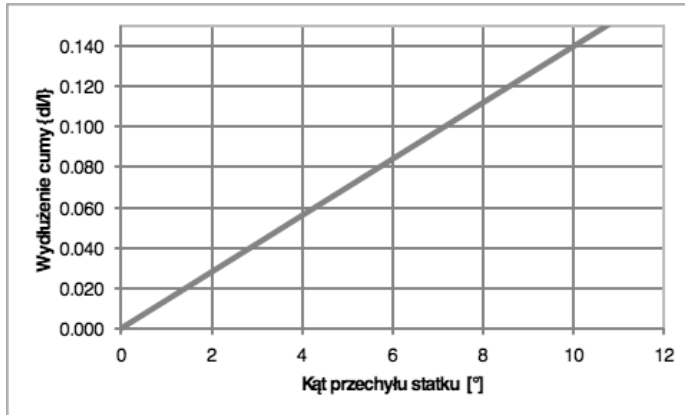
$$M_H(\varphi, \alpha_1) = M_R(\varphi) = \Delta \cdot GZ(\varphi) \cong \Delta \cdot GM \cdot \sin \varphi \text{ [tm]} \quad (22)$$

$$F = \frac{\Delta \cdot G M \sin \varphi}{\left(\frac{B}{2} + y + \Delta y\right) \sin \alpha_1} \quad [\text{kN}] \quad (23)$$

W przypadku, gdy statek jest przechylony na skutek nierównomiernego rozłożenia ładunku, siły w linach cumowniczych wzrastają z powodu oddalenia punktu ich mocowania na statku od punktu mocowania cumy na nabrzeżu (rys. 8).

Siła naprężenia cumy (F) na skutek rozciągnięcia jest równa:

$$F = k \cdot \Delta l = k \cdot \sqrt{\Delta z^2 + \Delta y^2} \quad [\text{kN}] \quad (24)$$



Rys. 8. Zależność wydłużenia od statycznego kąta przechyłu statku (φ) dla cumy 20 m

Fig. 8. Dependence of mooring line's elongation from the tangential angle of the ship (φ) for line 20 m

W celu oceny bezpieczeństwa cumowania statku należy porównać uzyskane wartości sił do wartości dopuszczalnych lub porównać uzyskane wydłużenie Δl do maksymalnego dopuszczalnego rozciągnięcia dla danego rodzaju cumy Δl_{MAX} .

Zestawienie wartości dopuszczalnych określa też kąt największego przechyłu, który może osiągnąć statek bez zerwania cumy.

Dynamiczne oddziaływanie obciążeń na cumę wiąże się z możliwością pochłonięcia energii przez jej rozciągnięcie.

Dynamiczne ruchy statku stojącego przy nabrzeżu ze względu na obciążanie lin cumowniczych można podzielić na grupy związane z ruchami statku:

- kołysanie – definiowane przez kąt kołysania statku ϕ [°];
- nurzanie – definiowane przez wielkość nurzania – Δz [m].

Pracę potrzebną do rozciągnięcia cumy określa wyrażenie:

$$W_{ML} = \int_0^{\Delta l} k \cdot \Delta l \cdot d\Delta l \quad [\text{kNm}] \quad (25)$$

gdzie:

k – współczynnik sprężystości [kN/m],

Δl – rozciągnięcie cumy [m].

Praca potrzebna do zerwania cumy jest równa:

$$W_{ML} = \int_0^{\Delta L_{\max}} k \cdot \Delta l \cdot d\Delta l \quad (26)$$

Moment przechylający od cumy:

$$M_H = F \left(\frac{B}{2} + y + \Delta y \right) \cdot \sin \alpha_1 \text{ [kNm]} \quad (27)$$

$$F = f \left(\frac{l}{\Delta l} \right) BL = \left(\frac{\Delta BL}{BL} \right) BL \quad (28)$$

Praca momentu przechylającego od działania cumy:

$$W_{ML} = \int_0^\varphi M_H(\varphi) \cdot d\varphi = \int_0^\varphi k \cdot \Delta l \left(\frac{B}{2} + y + \Delta y \right) \cdot \sin \alpha_1 \cdot d\varphi \quad (29)$$

Praca potrzebna do zakołysania statku:

$$W_{VSL} = g \cdot D \cdot \int_0^\varphi GZ'(\varphi) \cdot d\varphi \text{ [kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad]} \quad (30)$$

gdzie:

D – wyporność statku [t],

$GZ'(\varphi)$ – ramię prostujące statku z uwzględnieniem obciążenia pionowego cumy [m].

$$GZ'(\varphi) = GZ(\varphi) - \frac{M_H(\varphi)}{\Delta} \quad (31)$$

Praca wymuszająca kołysania statku W odpowiada pracy swobodnie kołyszącego się statku do zadanego kąta (φ) zredukowanej o pracę rozciągającą cumę W_{ML} .

Praca powoduje zredukowanie kąta przechyłu statku i tym samym zmniejszenie rozciągania liny. Wartością krytyczną podczas kołysań statku będzie maksymalne dopuszczalne rozciągnięcie liny. Dla liny polipropylenowej uzyskuje się wartość graniczną ($BL/2$) równą 6%.

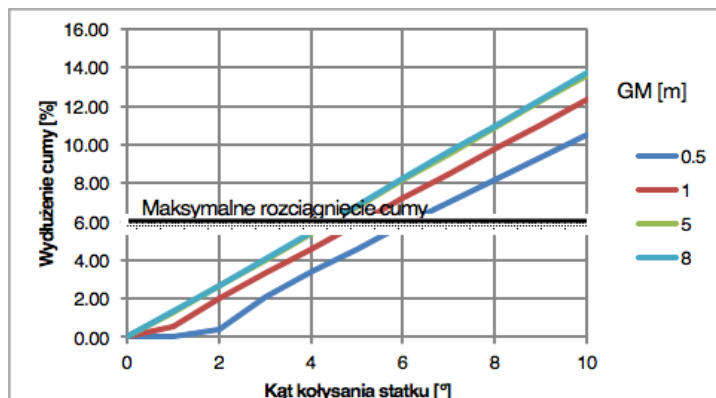
W przypadku cum o różnych parametrach praca momentu przechylającego od działania cum jest równa sumie prac dla każdej cumy obliczanej niezależnie.

Warunek wytrzymałości układu cumowniczego można określić jako równowagę pracy wykonywanej przez kołyszący się statek i pracy rozciągania poszczególnych cum.

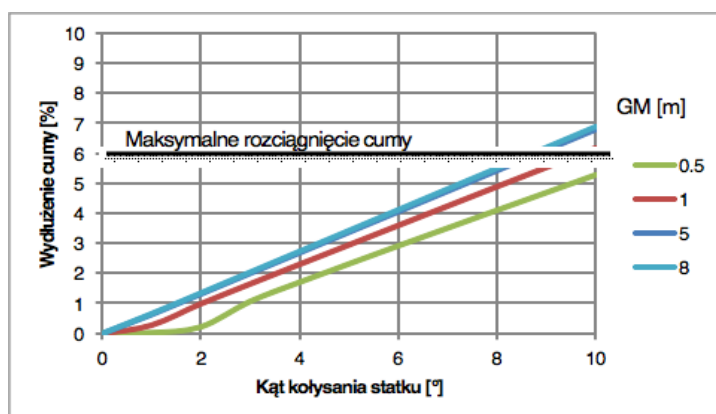
$$W_{vsl} = \sum_{i=1}^n W_{ML} \text{ [kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad]} \quad (32)$$

$$g \cdot \Delta \cdot \int_0^\varphi GZ'(\varphi) \cdot d\varphi = \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta l} k \cdot \Delta l \cdot d\Delta l \quad (33)$$

Jeśli złożyć kołysanie statku, wywołane ruchami na fali, oraz wynurzenie, to praca kołysania statku jest powiększana o pracę związaną z dynamicznym podniesieniem statku (rys. 9 i 10).



Rys. 9. Wydłużenie liny cumowniczej na skutek zakoleśnięcia statku, cumy 20 m
Fig. 9. Elongation of the mooring rope as a result of rolling of the ship, line 20 m



Rys. 10. Wydłużenie liny cumowniczej na skutek zakoleśnięcia statku, cumy 40 m
Fig. 10. Elongation of the mooring rope as a result of rolling of the ship, line 40 m

Z powyższych wykresów wynika, że dla lin cumowniczych o długości 20 m przy wysokości metacentrycznej $GM = 0,5$ m cumy będą w stanie wytrzymać kołysanie statku do 6° . Jeśli wartość wysokości metacentrycznej GM wzrośnie powyżej 8 m, to cumy o założonej wytrzymałości będą w stanie wytrzymać kołysanie statku do $4,2^\circ$. Zastosowanie lin cumowniczych o długości do 40 m pozwoli im przy wysokości metacentrycznej $GM = 0,50$ m na utrzymanie statku przy kołysaniu około 10° , natomiast przy $GM > 5$ m – do $8,5^\circ$.

Jak widać z powyższego przykładu, wysokość metacentryczna statku warunkuje wartości krytyczne kołysań.

4. WNIOSKI

Ruchy statku, wywołane falowaniem i działaniem wiatru, generują zwiększenie obciążeń w układzie cumowniczym. Ze względu na wielkość parametrów stateczności zbiornikowca w czasie operacji ładunkowych będzie on wykonywał gwałtowne ruchy oscylacyjne. Spowoduje to powstanie nieregularnych zmian naprężeń w poszczególnych cumach.

Układ cumowania można uznać za bezpieczny, gdy energia ruchu statku zostanie pochłonięta przez energię naprężenia cum. Parametrem pozwalającym ocenić wytrzymałość cum jest ich rozciągnięcie wyrażone w procentach. Przekroczenie wartości dopuszczalnego rozciągnięcia powoduje zerwanie cumy. Układ cumowniczy składa się z cum o różnej długości, więc wielkość rozciągnięcia jest różna dla każdej z cum. Cumy o najmniejszej długości będą podlegały największemu naprężaniu i tym samym będą najbardziej narażone na zerwanie.

Dodatkowym elementem determinującym kołysania poprzeczne statku przy nabrzeżu jest jego wysokość metacentryczna. Wielkości tego parametru powodują silną reakcję statku na oddziaływanie fali, wywołując jego duże kołysania. Nadmierne wartości wysokości metacentrycznej mogą być przyczyną powstawania dużych naprężeń w systemie cumowniczym oraz zrywania kolejnych cum. Konieczne jest więc wprowadzenie ograniczeń wielkości wysokości metacentrycznej GM podczas operacji ładunkowych lub konstruowanie układu cumowniczego zapewniającego odpowiednią długość cum [Banfield, Ratcliffe i Flory 2014].

LITERATURA

- Banfield, S.P., Ratcliffe, A., Flory, J.F., 2014, *Computer Mooring Load Analysis to Improve Port Operation and Safety*, Tension Technology International Ltd.
- China Classification Society, 2010, *Guidelines for Implementation of the Requirements for Construction and Equipment of Tankers of Oil Industry Organizations*.
- Clark, B., 2009, *Mooring and Anchoring Ships*, vol 1, *Principles and Practice*, Nautical Institute, London.
- IACS, 2007, International Association of Classification Societies, *Requirements Concerning Mooring, Anchoring and Towing*.
- IMO, 2002, Sub-Committee on Ship Design and Equipment, *Anchoring, Mooring and Towing Equipment Mooring Lines and Bitts and Safety of Personnel*, vol. 46/INF3.
- IMO, 2005, International Maritime Organization, *MSC/Circ.1175 Guidance on Shipboard Towing and Mooring Equipment*, London.
- Królikowski, A., Soliwoda, J., Kucharski, S., 2005, *Analiza możliwości bezpiecznego postoju VLCC m/v „Algarve” na stanowisku T Portu Północnego Gdańsk*, Gdynia.
- OCIMF, 2008, Oil Companies International Marine Forum, *Mooring Equipment Guidelines*, Bermuda.
- PIANC, 2016, *Recommendation for the Design and Assessment of Marine Oil and Petrochemical Terminals*, Permanent International Association of Navigation Congresses.