

MORSKIE HOLOWANIA StS Cz. 1

ELEMENTY PROJEKTU LINII HOLOWNICZEJ

Jednym z najistotniejszych problemów holowań morskich realizowanych przez statki nie służące tym celom, jest właściwy dobór długości i ciężaru linii holowniczej w zależności od przewidywanych warunków hydrometeorologicznych, stanu morza, wytrzymałości holu, głębokości akwenu i prędkości holowania. Problematyka w literaturze polskiej i światowej jest mało opisana, co jest zrozumiałe biorąc pod uwagę tajemnice zawodowe profesjonalnych przedsiębiorstw trudniących się morskimi holowaniami ratowniczymi¹. Należy również uwzględnić, że w odróżnieniu do holowań morskich realizowanych przy pomocy wyspecjalizowanych holowników, ta sama operacja wykonywana przez zwykły statek handlowy jest dużo bardziej skomplikowana ze względu na ograniczone możliwości zmiany parametrów linii holowniczej w trakcie holowania.

Przedstawione elementy projektu linii holowniczej oparte zostały na publikacjach obcych, głównie rosyjskich, oraz własnych uzupełnieniach, przemyśleniach i doświadczeniach autora.

Pojęcie linii holowniczej obejmuje cały hol, który może stanowić zarówno jednorodną linię jak i składać się z kombinacji odcinków liny stalowej, łańcucha kotwicznego, liny sprężynującej, lub przy użyciu dodatkowego ciężaru podwieszonego na holu np. kotwicy. Dla uproszczenia można przyjąć, że siła w holu jest jednakowa na całej jego długości, i przy stosunkowo niedużym ugięciu (zwisie) odpowiada jej składowej poziomej, a o możliwości jej przeniesienia decyduje najslabszy element linii holowniczej.

Podczas jednostajnego ruchu na spokojnym akwenu, na obciążenie holu składa się głównie hydrodynamiczna siła oporu wody holowanego obiektu, oraz siła oporu części linii holowniczej zanurzonej w wodzie. Wówczas obie siły zależne są od prędkości holowania.

W rzeczywistości wraz ze zmianą siły wiatru i falowania, ruch zespołu holowniczego staje się coraz bardziej niejednostajny we wszystkich płaszczyznach ruchu, a więc na obciążenie mają również dodatkowy wpływ: powierzchnia boczna podwodnej i nadwodnej części obiektu holowanego, jego sterowność, siła bezwładności masy statku holującego i holowanego.

1. Wstępne określenie długości i zwisu linii holowniczej

Dobór długości linii holowniczej, jest jednym z najważniejszych elementów projektu linii holowniczej w przypadku braku automatycznych wind holowniczych, w jakie są wyposażone specjalistyczne holowniki pełnomorskie.

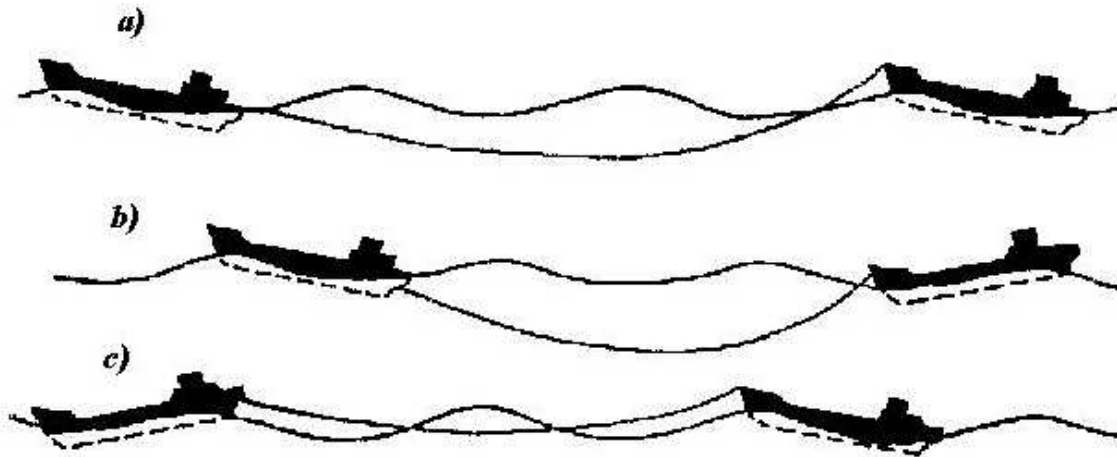
Właściwa długość linii holowniczej zdaniem praktyków powinna spełniać następujące warunki:

- nie może być zbyt mała, co stwarza możliwość hamującego wpływu strumienia zaśrubowego statku holującego na opory ruchu obiektu holowanego
- powinna zapewniać odpowiednią sterowność obiektu holowanego
- musi zapewniać odpowiedni zwis i sprężystą deformację dla amortyzowania szarpnięcia holu w wyniku uderzeń fal, kołysania statku holującego i obiektu holowanego, oraz ich myszgowanie. W praktyce przyjmuje się że długość holu większa od trzech długości holownika, eliminuje wpływ strumienia zaśrubowego, jednak zbyt długi hol utrudnia manewrowanie zespołem.

¹ Porada J.: Elementy projektu linii holowniczej. Część 1.Referat wygłoszony i opublikowany w Materiałach Konferencji: "VIII Warsztaty Manewrowe". Iława 23.10.1999r.

Zbyt krótki hol nie będzie mieć dostatecznego zwisu i amortyzujących właściwości ograniczających ryzyko zerwania, natomiast im dłuższy hol, tym holowanie będzie bardziej "miękkie", jednak na małych głębokościach może nastąpić jego przetarcie podczas wleczenia na dnie morskim, przy zbyt dużym zwisie. Ponadto wraz z długością wzrasta jego opór hydrodynamiczny, a więc trudniej będzie nim pracować tzn. podawać, przyjmować, luzować i wybierać, szczególnie gdy brak jest wind holowniczych.

W holowaniach pełnomorskich długość linii holowniczej uzależnia się przede wszystkim od przewidywanych warunków hydro-meteorologicznych i falowych w czasie holowania. Powszechnie uważa się że długość linii holowniczej powinna odpowiadać krotności długości fali, w przeciwnym przypadku statek holujący i holowany w różnym czasie wchodzi na fale, co wiąże się z silnym chwilowym obciążeniem linii holowniczej. Źle dobrana długość linii holowniczej wymaga jej korekty w trakcie holowania - skracania oraz częściej wydłużania. Przykład efektu różnych długości holu przedstawiono na rys 1.



Rys. 1 Właściwy dobór długości linii holowniczej w zależności od długości fal
a) długość właściwa; b), c) długość niewłaściwa - zbyt mała;

W praktyce rekomenduje się dla wstępnej oceny przyjmować następującą długość holu w zależności od wyporności statku holowanego ²:

Wyporność statku holowanego [t]	Długość holu stalowego podczas stanu morza [m]	
	do stanu morza 3 ⁰	do stanu morza 6 ⁰
450 - 1700	170 - 270	300 - 350
> 4500	≥ 300	≥ 650

Zalecenia te potwierdzone zostały praktyką podczas pełnomorskich holowań oceanicznych między innymi przez kpt.ż.w. Kazimierza Skóry, który dowodził masowcem ok. 12 000 DWT podczas holowania innego masowca PŻM ok. 13 500 DWT z uszkodzonym sterem³. Z opisu tego holowania wynika, że na ostateczną długość linii holowniczej ma wpływ korekta wynikająca nie tylko z krotności długości fal, lecz i kierunek wiatru względnego, oraz położenie nadbudówek, a więc "nawietrzność" i "zawietrzność" holowanego statku.

W przypadku wiatru względnego z trawersu, ustawienie się w przybliżeniu równoległe statków w ten sposób, aby statek holowany nie znajdował się w kilwaterze statku holującego, lecz po jego nawietrznej stronie w odległości ok. 150-200 m (tj. długości statku holowanego), umożliwiło znaczne ograniczenie myszgowania tego statku. W ten sposób holowany

² Bogdanow B. B., Pietrow M.K.: Morska buksirówka. Morskoj Transport. Moskwa 1955

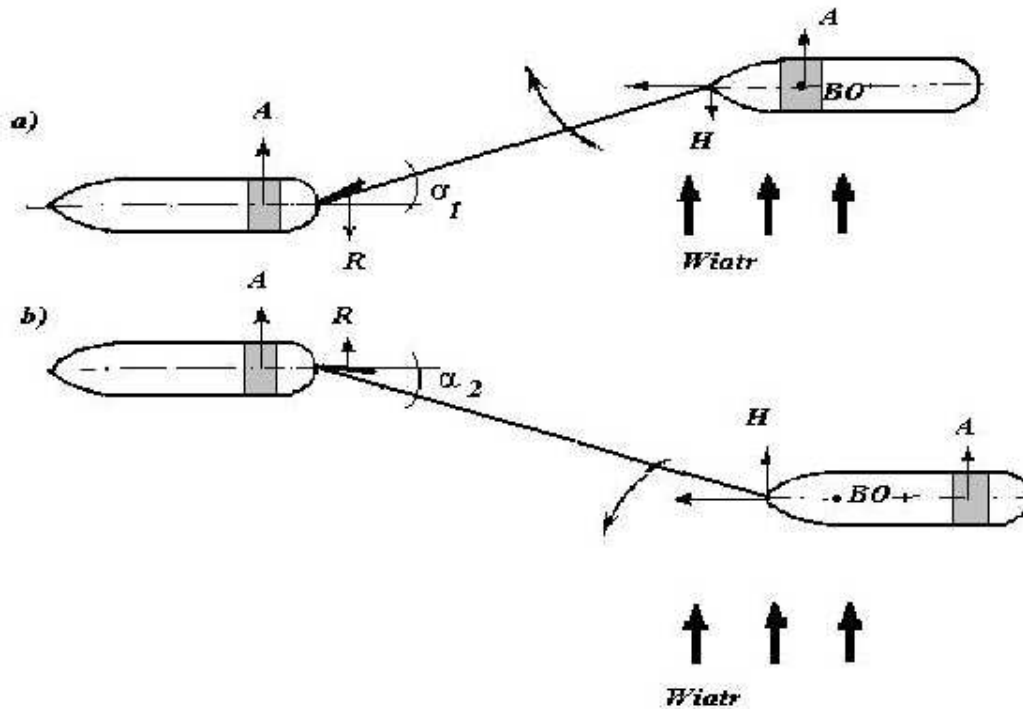
³ Skóra K.: Uwagi dotyczące holowania m/s "Huta Zgoda" przez m/s "Kopalnia Moszczenica". 22.12.1977r. Maszynopis. 8 str.

masowiec odchylony był o kąt ok. 45° - 50° od diametralnej statku holującego, co zapewniało równowagę momentów siły aerodynamicznego oddziaływania wiatru względem bieguna obrotu (BO), oraz momentu siły uciągu w holu. Można spodziewać się, że wspomniane odchylenie (α_1) może być mniejsze podczas aktywnego użycia steru na statku holowanym. W przypadku statku holowanego charakteryzującego się "zawietrznością"- z nadbudówką umiejscowioną bliżej bieguna obrotu (BO), odchylenie linii holowniczej może być mniejsze (α_2), natomiast w obydwu przypadkach ostateczna długość linii holowniczej będzie wynosić:

$$L_h = L_{hw} / \cos \alpha$$

gdzie: L_{hw} - wstępna długość linii holowniczej ze względu na długość fali [m] ;

α - przewidywany wstępnie kąt odchylenia linii holowniczej [$^{\circ}$] ;



Rys. 2 Zjawisko przesunięcia równoległego statku holowanego pod wpływem wymuszeń zewnętrznych (ster nie działa)

a) statek holowany "zawietrzny"; b) statek holowany "nawietrzny"

W rozważaniach tych pominięto szeroką problematykę sterowności statku holującego i holowanego, ponieważ zdaniem autora nie ma ona podstawowego wpływu na długość linii holowniczej. Zawsze jednak dopuszczenie do gwałtownego myszkowania statku holowanego poruszającego się w kilwaterze statku holującego, może doprowadzić do powstania nie kontrolowanych sił bezwładności (kątowej) podczas ruchu oscylacyjnego, co nawet na spokojnym oceanie może być głównym powodem zerwania holu.

Bardzo ograniczona zwrotność statku holującego, może być częściowo wyeliminowana przez zastosowanie lejc podanych z rufy. Wówczas podczas koniecznych zwrotów zespołu holowniczego, luzowane są lejce z burty przeciwnej do kierunku zwrotu.⁴

W dalszych kalkulacjach należy uwzględnić, że określona w powyższy sposób długość linii holowniczej i jej ciężar ma bezpośredni wpływ na projektowany zwis holu którego wielkość maksymalna uzależniona jest od głębokości akwenu, a minimalna od wysokości przewidywanej fali:

$$H_f < f < H$$

gdzie : f - zwis linii holowniczej [m]

⁴ Poinc W.: Ratownictwo morskie . Tom I . Ratowanie życia i mienia Wyd. Morskie . Gdynia 1966r. Str. 49

H_f - przewidywana wysokość fali [m]

H - głębokość akwenu [m]

Zależność pomiędzy zwisem i długością linii holowniczej może być w uproszczonej postaci wyrażona formułą:

$$f = 0.5 l^2 / a$$

gdzie : l - połowa długości linii holowniczej [m]

a - parametr linii holowniczej [m] $a = T_o / p$

T_o - obciążenie holu (siła w holu) [kN], [t]

p - ciężar 1 mb. linii w wodzie [N/mb]; [t/mb];

2. Obliczenie obciążenia holu i dopuszczalnej prędkości holowania.

W praktyce obliczeń holowniczych stosowane są często także metody przybliżone, oparte na empirycznych formułach zaproponowanych przez różnych autorów dla badanych przez siebie typów statków, np. historyczna już formuła Afanasjewa:

$$T_o = 0.00173 (1 + d) V_h^{2.333} D/L \sqrt{\frac{\sqrt{LB}}{D}}$$

gdzie: T_o - obciążenie holu [t]

d - poprawka na opór nie pracujących śrub równa :

dla swobodnie obracającej się, lub zastopowanej śruby $d = 0.10$

dla 2-ch śrub odłączonych od silnika $d = 0.15$

dla 2-ch śrub obracających się z silnikami $d = 0.30$

dla 2-ch śrub zastopowanych $d = 0.50$

V_h - prędkość holowania [węzły]

D - wypór holowanego statku przy zadanym zanurzeniu [t]

L - długość wodnicy holowanego statku [stopy]

B - szerokość holowanego statku [stopy]

Formuła ta umożliwi określenie z dostateczną dla praktyki dokładnością obciążenie holu podczas holowań statków o stosunkowo małym współczynniku pełnotliwości⁵.

Dla określenia siły w holu, bez uwzględniania oporu wiatru może być również wykorzystana formuła :

$$T_o = F_o V_h / \Delta c$$

gdzie: V_h - prędkość holowania statku [węzły]

F_o - przekrój podwodnej płaszczyzny owręża [m²]

Δc - współczynnik zmniejszenia oporu linii holowniczej wskutek jego nachlonu do płaszczyzny horyzontalnej:

Kąt pochylenia [°]	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Δc	0.03	0.076	0.173	0.309	0.492	0.686	0.854	0.963	1.0

Dla doków i platform o kształtach opływowych (barkopodobnych) zastosowanie ma formuła Papiela:

$$T_o = (0.2 \Omega - 4.5 F_o \sqrt{\frac{\sqrt{F_o}}{l}}) V_h^2$$

gdzie : Ω - powierzchnia zwilżona doku [m²];

⁵ Afanasjew B.I.: Prakticzeskije zakony dwizenija sudow. 1966.

F_o - przekrój zanurzonej części płaszczyzny owręza [m^2]

l - długość zaostrenia dziobowego [m]

V_h - prędkość holowania [węzły]

W praktyce w/w formułę dla platform i doków można stosować podczas prędkości holowania 4 - 6 węzłów, natomiast dla prędkości większych staje się niewiarygodna.

Dla tak określonych warunków zapotrzebowanie mocy holowników można określić z formuły:

$$N = T_o V_h / 30 \quad [KM]$$

W celu określenia naprężenia holu metodami dokładniejszymi wykorzystuje się formuły bazujące na obliczeniu pełnego oporu holowanego statku oraz jego śruby i linii holowniczej zanurzonej w wodzie, z uwzględnieniem falowania i przeciwnych wiatrów.

Na wstępie należy jednak dokonać oceny siły naporu śruby statku holującego koniecznej dla holowanie innego statku z zadaną prędkością w przewidywanych warunkach hydro-meteorologicznych. Stąd wynika potrzeba przyjęcia wstępnej prędkości holowania (V_I) do obliczeń oporowych. Można uznać, że maksymalna prędkość jaką może płynąć statek holujący, będzie odpowiadać nastawie CN - manewrowa tj. $V_o = 10-12$ węzłów.

Na tej podstawie wstępną prędkość holowania będzie następująca: $V_I = 0.5 V_o = 5 - 6$ w.

Zapotrzebowanie siły naporu śruby statku holującego wynika z równania:

$$N_s \geq R_1 + R_2$$

gdzie: R_1 - opór statku holującego $R_1 = R_{k1} / (1-t)$ [kN]

t - współczynnik ssania wg. Taylora $t = 0.7 \cdot w$; (dla statku 1- śrubowego)

w - współczynnik strumienia nadążającego; $w = 0,5 C_B - 0.05$; (dla statku 1- śrubowego)

R_2 - opór zewnętrzny obciążający hak statku holującego na który składają się :

$$R_2 = R_{k2} + R_h + R_s \quad [kN]$$

R_{k1} , R_{k2} - siły oporu hydrodynamicznego na kadłubach statków holującego i holowanego

R_h - siła oporu hydrodynamicznego linii holowniczej [kN]

R_s - siła oporu hydrodynamicznego zatrzymanej śruby [kN]

Opory obydwu kadłubów mogą być określone znanymi w teorii okrętu i w ratownictwie uproszczonymi metodami, lub na podstawie dokumentacji (charakterystyk oporowych) dlatego pominięte zostały w tych rozważaniach. Opory te mogą być zwiększone o siły aerodynamiczne wywołane oddziaływaniem przeciwnych wiatrów, oraz opory falowe spowodowane dodatkowymi ruchami oscylacyjnymi, głównie kołysaniami wzdłużnymi, co można uwzględnić stosując wzór Havelocka⁶:

$$R_f = 0.5 \rho \cdot B (0.5 H_f)^2 \sin^2 \varphi$$

gdzie: R_f - opór falowy [kN]

ρ - gęstość wody [t/m^3]

B - szerokość statku [m]

H_f - wysokość fali [m]

φ - połowa zaostrenia kąta wodnicy pływania ($\sim 23^\circ$)

- dla prędkości wiatru $< 6^0 B (12 m/s)$ $H_f = 0.068 V_w^{3/2}$ [m]

- dla prędkości wiatru $> 6^0 B (12 m/s)$ $H_f = 0.105 V_w^{3/4}$ [m]

Na opór holu, w przypadku niejednorodnej linii holowniczej składa się suma oporów cząstkowych poszczególnych jednorodnych odcinków linii:

$$R_h = 0.5 \rho \cdot C_l \cdot V_I^2 (L_1 + L_2 + L_3) \cdot k_f$$

gdzie : C_l - współczynnik oporu holu $C_l \sim 1.2$

⁶ Wzór opisany w Zbiorze zadań z teorii okrętu . PWN 1962 , str.87.

V_1 - wstępna prędkość holowania [m/s]

k_f - współczynnik wpływu zwisu linii (strzałki ugięcia); $k_f \approx 2.5 f / L_h$

$L_1 ; L_2 ; L_3$ - względne parametry poszczególnych jednorodnych odcinków linii holowniczej , np., liny stalowej (L_1), liny polipropylenowej (L_2), odcinka łańcucha kotwicznego (L_3);

Każdy odcinek charakteryzuje⁷ :

- długość(l_i) [m]; - średnica elementu (d_i) [m]; - współczynnik szorstkości (k_s)

$$L_i = l_i \cdot d_i \cdot k_s$$

gdzie: $k_s = 1.2$ dla liny stalowej ; $k_s = 1.5$ dla liny syntetycznej; $k_s = 2.5$ dla łańcucha kotwicznego (propozycja autora)

Na opór zatrzymanej śruby statku holowanego mają wpływ charakterystyki hydrodynamiczne i średnica śruby oraz pełnotliwość kadłuba, co wyraża wzór:

$$R_s = 0.4 \frac{S_o}{S} (D_s \cdot V_1)^2 \cdot (1 - w)^2$$

gdzie: R_s - opór zatrzymanej śruby [kN]

$\frac{S_o}{S}$ - współczynnik powierzchni śrubowej (~ 0.45)

D_s - średnica śruby [m]

w - współczynnik strumienia nadążającego; $w = 0.5 C_B - 0.05$ (w/g Taylora)

C_B - współczynnik pełnotliwości kadłuba statku holowanego

Przyjmując , że pozostający do dyspozycji uciąg śruby statku holującego nie jest uzależniony od stosunkowo małej szybkości holowania, można określić realną maksymalną prędkość holowania $V_{hmax} < V_o$:

$$V_{hmax} = V_o \sqrt{\frac{R_1(V_1)}{N_s}} = V_o \sqrt{\frac{R_1(V_1)}{R_1(V_1) + R_2(V_1)}}$$

gdzie: V_o - pełna prędkość statku holującego , przyjmowana zazwyczaj jako CN - manewrowa tj. ok. 12w (6.12 m/s)

$R_1(V_1)$; $R_2(V_1)$ - odpowiednie wartości oporów dla wstępnie przyjętej prędkości holowania $V_1 < V_o$

N_s - napór śruby statku holującego [kN]

Uciąg na haku statku holującego, który jest równoznaczny z normalnym obciążeniem holu w warunkach oceanicznych, może być obliczony na podstawie formuły:

$$T_o = N_s - R_1 \approx (V_o^2 - V_{hmax}^2) R_1 / V_1^2$$

Siła zrywająca najsłabszego elementu linii holowniczej powinna być większa od przewidywanego obciążenia holu:

$$T_z > T_o k$$

Zgodnie z przepisami klasyfikacyjnymi współczynnik bezpieczeństwa wytrzymałości holu przyjmowany jest: $k = 5$; dla $T_o \leq 100$ kN; $k = 3$; dla $T_o \leq 300$ kN; dla innych wielkości T_o współczynnik bezpieczeństwa, może być określony przy pomocy interpolacji liniowej.

Jeśli wytrzymałość holu jest mniejsza od przewidywanego obciążenia holu:

$$T_z < T_o k$$

wówczas należy zmniejszyć prędkość holowania dostosowując ją do maksymalnej dopuszczalnej siły uciagu na haku:

$$T_o dop = T_z / k$$

Ostatecznie bezpieczną prędkość holowania można określić z formuły:

⁷ Osmałowski A.: Holowniki morskie i portowe. Wydawnictwo Komunikacyjne . W-wa. 1953r. str.61

$$V_h = V_{h \max} \sqrt{\frac{T_{odop}}{T_o}}$$

Określona w ten sposób prędkość holowania (V_h), może różnić się istotnie od wielkości wstępnie przyjętej ($V_l < V_o$) do obliczeń oporowych, wówczas należy powtórzyć cykl obliczeń dla nowej skorygowanej wielkości (V_h)

2. Rodzaje linii holowniczej.

Użyte w tych rozważaniach pojęcie linii holowniczej obejmuje cały hol, który może stanowić zarówno jednorodną linię jak i składać się z kombinacji odcinków liny stalowej, łańcucha kotwicznego, liny sprężynującej oraz dodatkowego obciążenia holu np. kotwicą. Uwzględniając trudności w zapewnieniu odpowiedniej, dostatecznie długiej, wytrzymałej, sprężystej i ciężkiej linii holowniczej, w praktyce stosuje się kilka rodzajów takich linii.

- Linia jednorodna składa się (poza tzw. lejcamy) z jednorodnego odcinka liny stalowej, łańcucha kotwicznego lub liny syntetycznej.
- Linia holownicza składająca się z odcinka liny stalowej podanej z holownika i odcinka liny syntetycznej podanej z obiektu holowanego, lub odwrotnie, co zapewnia dobre wydłużenie linii przy stosunkowo nie wielkiej strzałce ugięcia np. na akwenach płytkowodnych.
- Linia kombinowana, składająca się z odcinka łańcucha kotwicznego (2-3 szakle) wydane go ze statku holowanego, połączone go z linią stalowa podaną ze statku holującego.
- Linia kombinowana, składająca się dwóch odcinków lin stalowych pomiędzy które włączony jest odcinek łańcucha kotwicznego. Do zalet takiej kombinacji należy dogodność zamocowania holu na statku holującym i obiekcie holowanym, dogodniejsza możliwość zmiany długości wydanej liny stalowej oraz odpowiednie obciążenie stosunkowo mało sprężystej liny stalowej i nie sprężystego łańcucha.
- Linia kombinowana j/w lub jednorodna, obciążona dodatkowo kotwicą. Taka konfiguracja umożliwi dalsze zwiększenie strzałki ugięcia linii co może być konieczne podczas holowania na akwenach z krótką wysoką falą.
- Linia kombinowana składająca się z dwóch odcinków liny stalowej pomiędzy które włączony jest odcinek liny z tworzywa sztucznego. Taka konfiguracja może być zastosowana przy stosunkowo małej sprężystości liny stalowej nie wystarczającej dla zapewnienia odpowiedniego wydłużenia linii podczas holowania w warunkach długiej martwej fali oceanicznej. Środkowy odcinek liny syntetycznej spełnia wówczas funkcję "sprężyny"

W przypadku włączenia w linie jednorodną lub niejednorodną automatycznej windy holowniczej, spełnione zostaną wspomniane wcześniej możliwości odpowiedniego wydłużenia linii holowniczej bez konieczności stosowania dodatkowych "sprężyn" i obciążeń kotwicą i odcinkami łańcucha.

3. Ocena dynamicznego obciążenia linii holowniczej

Dynamiczne obciążenie holu można złągodzić wykorzystując:

- **energię potencjalną sprężystego odkształcenia holu:**

$$E_l = T_o^2 \cdot L_h / 2 \cdot e \cdot F$$

gdzie: T_o - siła w linii holowniczej [t, N]

L_h - długość linii holowniczej [m]

e - moduł sprężystości elementów linii holowniczej [t/cm^2]

F - powierzchnia przekroju linii holowniczej [cm^2]

- energię potencjalną ciężaru holu, przez podniesienie środka ciężkości naprężającej się linii holowniczej.

Ciężar holu i położenie jego środka ciężkości charakteryzujące się strzałką ugięcia linii holowniczej, zależne są od jej długości dostosowanej do długości fali tak, aby obydwa statki znajdowały się jednocześnie na wierzchołku lub w dolinie oceanicznej fali.

Z wieloletniej praktyki holowań pełnomorskich wynika, że przy stanie morza $\geq 4^0B$ w linii holowniczej mogą powstać siły wielokrotnie przewyższające zarówno siłę uciągu holownika jak i dopuszczalną siłę w linii holowniczej. Zjawisko to związane jest z orbitalnym ruchem na fali obydwu statków i wzajemnym przemieszczaniem się ich względem siebie. Ten umowny ruch orbitalny środków ciężkości obu statków może być opisany równaniem parametrycznym Kryłowa⁸:

$$\begin{aligned}x &= a \cos (2\pi \cdot t / \tau) \\y &= b \sin (2\pi \cdot t / \tau)\end{aligned}$$

gdzie: a, b - wartości stałe dla danego statku i fali

τ - okres względny fali [sek]

$$\tau = \lambda / (V_f + V_s \cdot \cos \alpha_f)$$

λ - długość fali [m]

V_s - szybkość statku [m/s]; V_f - szybkość fali: $V_f \approx 1,25 \sqrt{\lambda}$ [m/s]

α_f - kąt kursowy fali [°]

W równaniach tych szczególnie istotną jest odcięta x która wyraża zmienną odległość pomiędzy statkiem holującym i holowanym, wynikającą z w/w ruchów orbitalnych na fali, natomiast wpływ pionowych kołysań na obciążenie holu (przy stosowanych w praktyce morskiej długościach linii holowniczych) może być pominięty. Wg Kryłowa siła pozioma w linii holowniczej podczas ruchu orbitalnego na fali może osiągnąć wartość wyrażoną uproszczoną formułą:

$$F_{x \max} \approx D/g \cdot \omega \approx D/g \cdot a \cdot 4\pi^2 / \tau^2 \approx D/6$$

gdzie : D - wypór statku holowanego [t]

ω - pozioma składowa przyspieszenia orbitalnego $\omega = x'' = -(4\pi^2 / \tau^2) \cdot a \cos(2\pi t / \tau)$

największe przyspieszenie wystąpi gdy: $\cos(2\pi t / \tau) = 1$ oraz $a = 0,5 H_f$ [m / s²]

Z tych względów już podczas holowań statków o wyporze $D > 1000$ t na sztywnym holu (tj. bez użycia automatycznej windy holowniczej) w warunkach falowania, powstaje problem zagwarantowania jego właściwej wytrzymałości i pewnego zamocowania.

W obliczeniach linii holowniczej zaleca się uwzględnić możliwość wzajemnego przemieszczenia statku holującego i holowanego co najmniej na odległość : $2a = H_f$ tj. wysokość fali. Takie zalecenie możliwe jest do spełnienia poprzez:

- sprężyste wydłużenia linii holowniczej
- wypłaszczenie "krzywej łańcuchowej" wg. której układa się zwis linii holowniczej
- zwiększenia długości linii holowniczej lub zastosowanie automatycznej windy holowniczej.

Z teorii linii łańcuchowej wynika , że jej strzałka ugięcia (zwis) jest wprost proporcjonalny do jej ciężaru, siły poziomej związanej ściśle z prędkością holowania oraz oporami i wytrzymałością najsłabszego elementu linii holowniczej. Dwa ostatnie zagadnienia są dostatecznie rozpoznane i opisane, pozostaje jednak problem sprawdzenia możliwości wzajemnego swobodnego ruchu statków względem siebie, co ma umożliwić wydłużenie linii holowniczej na odległość równą wysokości przewidywanej fali oceanicznej.

4. Sprawdzenie wydłużenia linii holowniczej.

⁸ Kryłow A.B.: Techničeskije soobraženja o bykcirowkie sudow. T.IX cz. 2 Wyd. Akademia Nauk ZSRR, 1949r.

Zgodnie z metodyką Kryłowa na konieczne wydłużenie linii holowniczej podczas żeglugi w warunkach falowania składa się wydłużenie sprężyste Δ_s i wydłużenia ciężarowe Δ_c , których suma powinna być :

$$\Delta_s + \Delta_c \geq 2a \geq H_f$$

W procesie projektowania i sprawdzania parametrów linii holowniczej ze względu na jej wydłużenie pod wpływem zmiennych obciążeń przyjmuje się następujące założenia:

- **dopuszczalne maksymalne obciążenie** T_1 linii holowniczej nie może przekraczać połowy wartości siły zrywającej najsłabszego elementu linii tj. $T_1 = 0,5 T_z$

- **normalne obciążenie** T_0 wynika z obliczonych wielkości uciążu na haku zależnych od przyjętej prędkości i oporów holowania na wodzie spokojnej.

Na wydłużenie sprężyste linii holowniczej pod wpływem zmiennych dopuszczalnych obciążeń, składa się suma wydłużeń każdego odcinka użytej linii np. stalowej czy syntetycznej wówczas :

$$\Delta_s = \Delta_1 + \dots \Delta_i, \quad \text{oraz} \quad \Delta_i = L_i [(T_1 - T_0) / d_i^2 \cdot e_i]$$

gdzie: L_i - długość odcinka użytej linii jednorodnej [m]

d_i - średnica użytej linii jednorodnej [mm]

e_i - sprężystość linii (stalowej $e = 3, 7 [t/mm^2]$; syntetycznej $e = 0,08 [t/mm^2]$)

wydłużenia sprężystego łańcuch nie uwzględnia się).

4.1 Obliczenie wydłużenia ciężarowego

W celu określenia wydłużenia ciężarowego wykorzystuje się znane w matematyce równania linii łańcuchowej w prostokątnym układzie współrzędnych na podstawie których można przedstawić podstawowe wzory umożliwiające określenie :

- długości odcinka łuku zwisającej linii : $l = a \cdot sh x/a [m]$

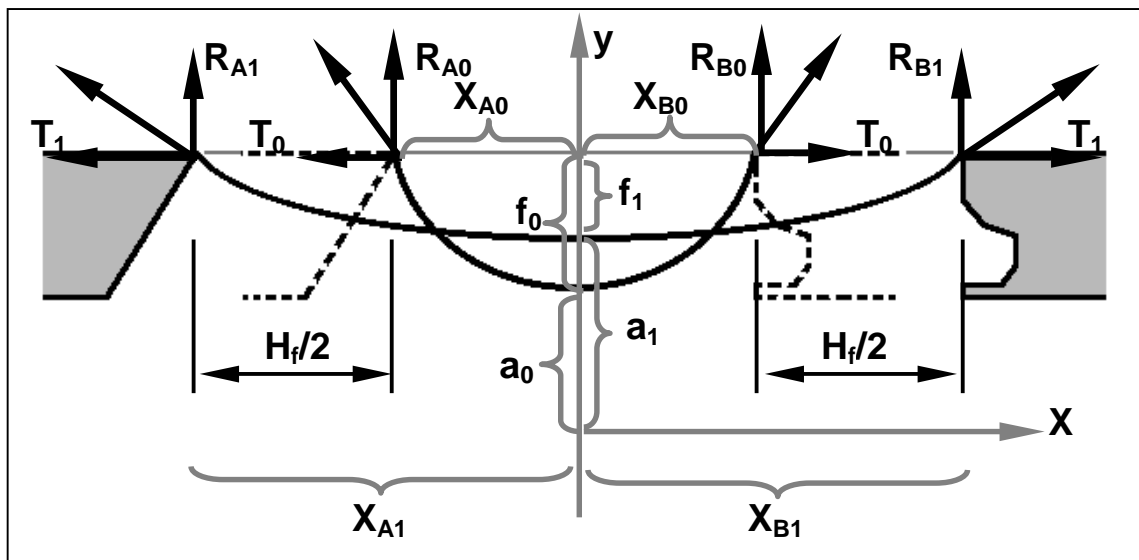
- wielkość zwisu linii holowniczej : $y = a \cdot ch x/a [m]$

- strzałki ugięcia linii holowniczej : $f = y - a [m]$

gdzie: x - pozioma odległość od osi współrzędnych do punktu zaczepienia linii holowniczej [m]

a - parametr linii holowniczej uwzględniający jej obciążenie zewnętrzne i ciężar jednostkowy: $a_0 = T_0/p$, $a_1 = T_1/p [m]$

p - ciężar jednostkowy 1 mb. elementu linii holowniczej (np. liny stalowej , syntetycznej czy łańcucha kotwicznego) [kG , N]



Rys. 3 Schemat oznaczeń zmiennych parametrów i obciążeń linii holowniczej

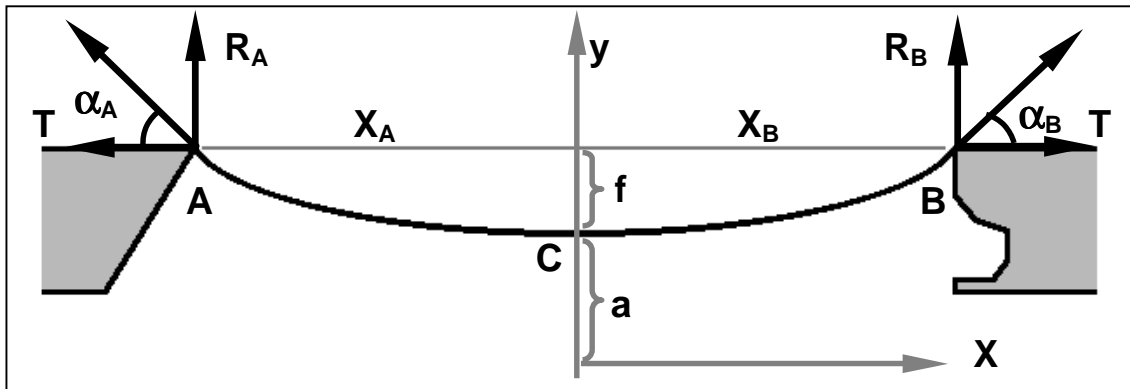
Ostatecznie wydłużenie ciężarowe stanowi różnica:

$$\Delta_c = 2 (x_I - x_0) = (x_{AI} - x_{A0}) + (x_{BI} - x_{B0})$$

gdzie: x_I, x_0 – odcinki od osi współrzędnych do punktów zamocowania linii przy zmiennym obciążeniu jej: $x_I = f(T_I)$ oraz $x_0 = f(T_0)$.

Zastosowany algorytm wstępnych obliczeń sprawdzających wydłużenie zaprojektowanej linii holowniczej związany jest ściśle z pojęciem symetryczności linii⁹.

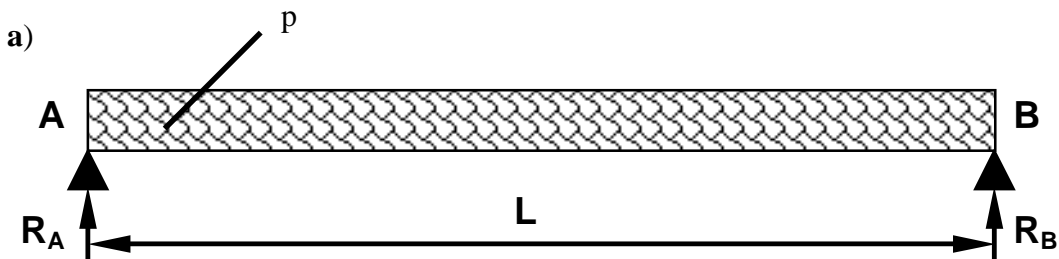
4.1.1 Symetryczna lina: charakteryzuje się równością odcinków poziomych, względem pionowej osi współrzędnych przechodzącej przez punkt maksymalnego zwisu, oraz równością kątów siły reakcji względem płaszczyzny poziomej w punktach zaczepienia (p. A i B). Taki efekt uzyskany jest dzięki symetrycznemu rozłożeniu masy odcinków linii holowniczej.



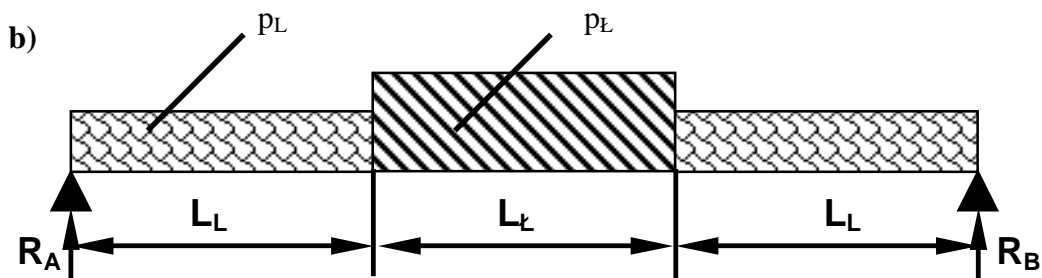
Rys. 4 Schemat parametrów i obciążeń linii symetrycznej

Do obliczeń reakcji w punktach zaczepienia holu można wykorzystać znane w statyce równanie momentów różnych rodzajów obciążeń (linii holowniczej):

1) Linia symetryczna jednorodna : Masa linii jednorodnej (np. stalowej, syntetycznej czy łańcucha) zależy od długości wydanego holu (L_h) i jego ciężaru jednostkowego w wodzie (p). Ciężar linii: $Q = L_h \cdot p$ [t, kN] . Reakcje R_A i R_B w punktach zaczepienia holu będą jednakowe tj $R = 0,5 Q$. (rys. a)



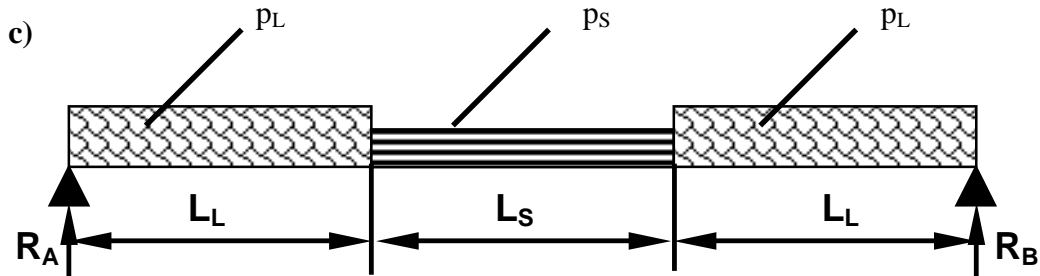
2) Linia symetryczna niejednorodna z odcinkiem łańcucha w środku.



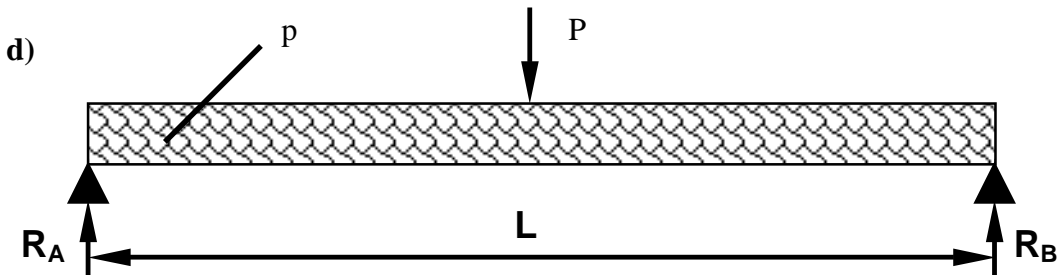
⁹ Szczecinina A.I. : Uprawienie cudnom i jego techniczeskaja eksploatacja. Moskwa „, Transport” 1975r.

Masa odcinków liny stalowej: $Q_l = L_l \cdot p_l$, masa łańcucha: $Q_t = L_t \cdot p_t$. Reakcja w punktach zaczepienia: $R_A = R_B = Q_t + 0.5 Q_l$ (rys.b)

3) Linia symetryczna niejednorodna z odcinkiem liny syntetycznej stanowiącym swoistą sprężynę w środku. Masa odcinków liny stalowej: $Q_l = L_l \cdot p_l$, masa liny syntetycznej: $Q_s = L_s \cdot p_s$. Reakcje w punktach zaczepienia: $R_A = R_B = Q_l + 0.5 Q_s$ (rys. c)



4) Linia symetryczna jednorodna z obciążeniem (np. kotwica) w środku. Masa liny jednorodnej $Q = p \cdot L_h$, oraz obciążenie zewnętrzne o masie P . Reakcje w punktach zaczepienia: $R_A = R_B = (Q + P) \cdot 0.5$ (rys. d)



Dla wszystkich w/w przypadków:

$$\operatorname{tg} \alpha_A = \operatorname{tg} \alpha_B = R_A / T = R_B / T = \operatorname{sh} x_A / a = \operatorname{sh} x_B / a$$

stąd dla znanej wartości x_A/a można wyznaczyć odległość poziomą punktów A i B przy obciążeniu normalnym (T_0) i maksymalnym dopuszczalnym (T_1) podstawiając odpowiednie parametry linii łańcuchowej c_0 oraz c_1 . Ostateczne wydłużenie ciężarowe stanowi różnica bezwzględnych wartości:

$$\Delta c = 2 [\Delta x_A + \Delta x_B]$$

gdzie: $\Delta x_A = x_{A1} - x_{A0}$; $\Delta x_B = x_{B1} - x_{B0}$; $a_0 = T_0 / p$; $a_1 = T_1 / p$

Strzałka ugięcia i związany z tym zwis liny może stanowić niezbędną informację w przypadku holowania na akwenu spłyconym, wówczas gdy powstaje niebezpieczeństwo tarcia holu po dnie akwenu (podczas obciążenia normalnego T_0) oraz wynurzania się holu z wody gdy strzałka ugięcia jest mniejsza od wysokości fali tj. $f \leq H_f$ (podczas obciążenia maksymalnego T_1)

Maksymalna strzałka ugięcia (zwis) linii holowniczej wystąpi podczas obciążenia normalnego (T_0) i parametrze $a_0 = T_0 / p$, wówczas:

$$f_0 = a_0 \cdot \operatorname{ch}(x_0 / a_0) - a_0$$

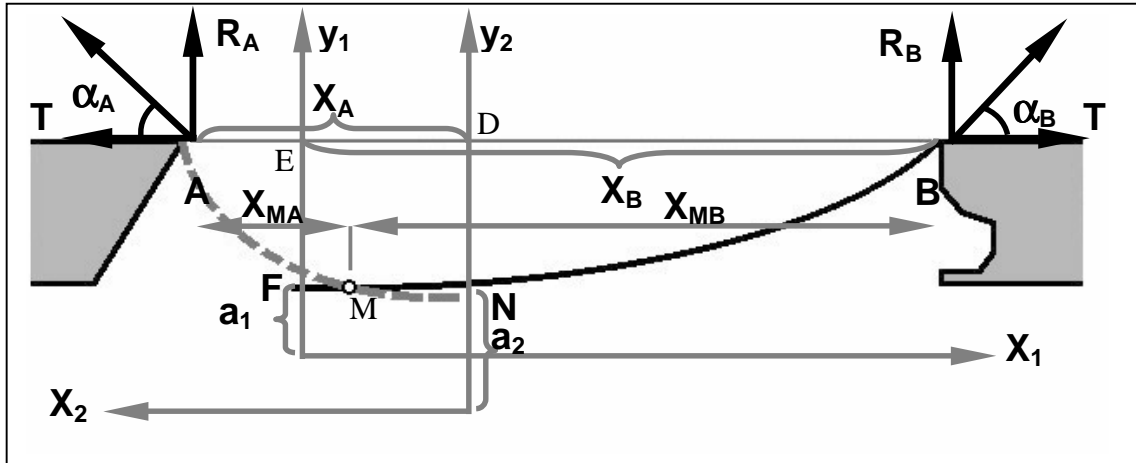
Minimalna strzałka ugięcia wystąpi podczas maksymalnego dopuszczalnego obciążenia (T_1) i parametrze $a_1 = T_1 / p$, wówczas:

$$f_1 = a_1 \cdot \operatorname{ch}(x_1 / a_1) - a_1$$

Przyjęte oznaczenia x_0 i x_1 są równoznaczne z długościami $x_A = x_B$ podanymi na rys.4, podczas działania obciążeń T_0 i T_1 , natomiast jednostkowe obciążenie p linii niejednorodnej można określić jako wartość średnią ciężarów jednostkowych użytych lin holowniczych np.:

$$p = (p_l \cdot L_l + p_t \cdot L_t + p_s \cdot L_s) / (L_l + L_t + L_s)$$

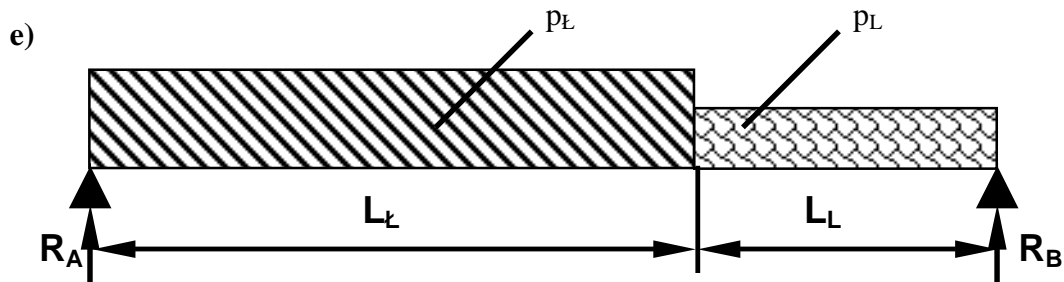
4.1.2 Linia asymetryczna charakteryzuje się nie jednakowymi odcinkami poziomego rozstawu pomiędzy osią pionową przechodzącą przez punkt największego zwisu a punktami zaczepienia (p. A i B). Taka sytuacja może zaistnieć podczas nie symetrycznego rozłożenia ciężarów i równej lub różnej długości kilku rodzajów lin składających się na cały hol. Do typowych można zaliczyć dwa podstawowe przypadki:



Rys. 5 Schemat oznaczeń i obciążeń niejednorodnej linii cumowniczej

1) Linia niesymetryczna niejednorodna, składająca się z odcinka łańcucha kotwicznego i liny stalowej. Reakcje w punktach zaczepienia holu będą wówczas różne (rys. e):

$$R_A = [Q_l \cdot (L_l + 0,5 L_t) + Q_l \cdot 0,5 L_l] / L_l + L_t; \quad R_B = Q_l + Q_l - R_A;$$



2) Linia niesymetryczna niejednorodna j/w obciążona dodatkowo np. kotwicą.

W obliczeniach reakcji w punktach zaczepienia uwzględnia się również dodatkowe obciążenie (P) (rys.f):

$$R_A = [Q_l \cdot (L_l + 0,5 L_t) + P \cdot L_l + Q_l \cdot 0,5 L_l] / L_l + L_t; \quad R_B = Q_l + Q_l + P - R_A;$$

Dalsze obliczenia dla każdej linii asymetrycznej dwuodcinkowej, będą przebiegały w podobny sposób:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{sh} (x_A / a_2) = R_A / T;$$

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \operatorname{sh} (x_B / a_1) = R_B / T;$$

- długość łuku:

$$L_{AMN} = a_2 \cdot \operatorname{sh} (x_A / a_2) = a_2 \operatorname{tg} \alpha_A;$$

$$L_{BMF} = a_1 \cdot \operatorname{sh} (x_B / a_1) = a_1 \operatorname{tg} \alpha_B;$$

- dla znanej:

$$\operatorname{sh} (x_A / a_2) \rightarrow x_A / a_2 = A_1 \text{ odcinek } x_A = a_2 \cdot A_1; \quad x_B = a_1 \cdot B_1;$$

- długość łuku :

$$L_{MN} = L_{AMN} - L_t;$$

$$L_{MF} = L_{BMF} - L_t;$$

$$L_{MN} / a_2 = \operatorname{tg} \alpha_M = \operatorname{sh} (x_{MA} / a_2) \text{ stąd dla } x_{MA} / a_2 = A_2$$

poszukiwany odcinek

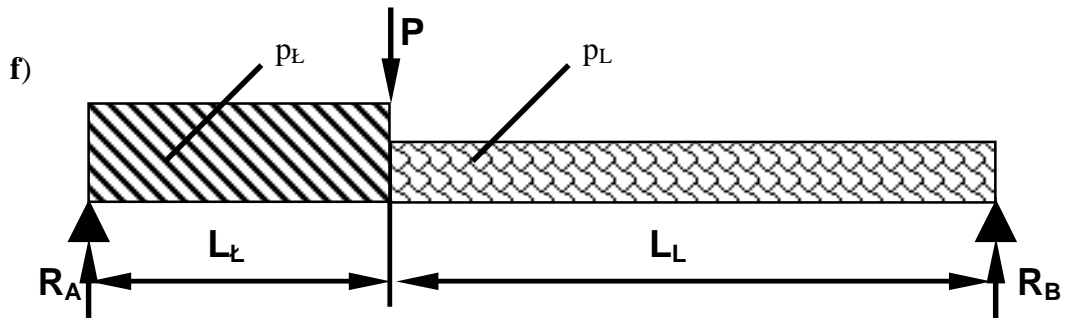
$$x_{MA} = a_2 \cdot A_2$$

W analogiczny sposób wyznaczony może być odcinek: $x_{MB} = a_1 \cdot B_2$.

Ostatecznie rozstaw statków dla określonego stanu obciążenia będzie sumą :

$$x_{AB} = x_{MA} - x_{MB},$$

natomiast wydłużenie ciężarowe sumą różnic rozstawów przy obciążeniu T_0 i T_1 .



Wielkość zwisu dla określonego obciążenia charakteryzuje rzędna:

$$y_M = a_2 \cdot ch(x_{MA}/a_2) \text{ lub } y_M = a_1 \cdot ch(x_{MB}/a_1)$$

która może być określona na podstawie znanych wcześniej reakcji w punktach mocowania holu (A i B).

Zaproponowany sposób może stanowić skuteczne uzupełnieniem znanych formuł praktycznych, ponieważ pozwala na sprawdzenie w dużym przybliżeniu właściwą ze względów bezpieczeństwa długość i konfigurację linii holowniczej przez każdego nawigatora stojącego przed taką niecodzienną koniecznością. W szczególności zaproponowana uproszczona metodyka umożliwi określenie:

- maksymalną wysokość fali dla zaprojektowanej linii holowniczej przy której będzie możliwe bezpieczne holowanie przez statek handlowy (nie holownik)
- określenie maksymalnego i minimalnego zwisy linii holowniczej dla warunków oceanicznych i płytkowodnych.

Przykład obliczeń: Określić wysokość fali przy której holowanie będzie jeszcze bezpieczne oraz zwis maksymalny i minimalny dla następujących parametrów linii holowniczej:

- zaprojektowano asymetryczną i niejednorodną linię holowniczą składającą się z 4 szakli łańcucha kotwicznego (108 m) - kaliber 57 mm, podanego ze statku holowanego oraz 400 m liny stalowej o średnicy $d = 57$ mm podanej ze statku holującego. Określono że opory ruchu statku holowanego przy prędkości holowania na wodzie spokojnej $V_h = 8$ węzłów wynoszą 15 ton.

Rozwiązanie:

1. Na podstawie znanego ciężaru jednostkowego łańcucha i liny stalowej należy obliczyć ciężar wydanego łańcucha i liny w wodzie:

- łańcuch: ciężar 1mb w powietrzu wynosi 70 kg, w wodzie $p_t = 70 \cdot 0.87 = 61$ kg/mb

$$Q_t = p_t \cdot L_t = 61 \cdot 108 = 6588 \text{ kg}$$

- liny stalowej: ciężar 1 mb w powietrzu wynosi 9.4 kg; w wodzie $p_l = 9.4 \cdot 0.87 = 8.2$ kg/mb

$$Q_l = p_l \cdot L_l = 8.2 \cdot 400 = 3280 \text{ kg}$$

(współczynnik 0.87 wynika z zależności: $[1 - (\gamma_w / \gamma_s)] = 0.87$, gdzie γ - ciężary właściwe wody i stali)

2. Określenie parametrów linii łańcuchowej dla każdego z odcinków oraz zmiennych obciążeń holu (T_0 i T_1) z uwzględnieniem faktu że wytrzymałość na zerwanie liny stalowej jest mniejsza od łańcuch ($T_t = 180$ t; $T_l = 113$ t), do dalszych obliczeń przyjęto $T = 113$ t.

- parametry dla łańcucha i obciążenia $T_0 = 15000$ kg (na wodzie spokojnej)

$$T_1 = 0.5 T = 57000 \text{ kg będą następujące: } a_{20} = T_0 / p_t = 15000 / 61 = 250 \text{ m}$$

$$a_{21} = T_1 / p_t = 57000 / 61 = 934 \text{ m}$$

- parametry dla liny stalowej :

$$a_{10} = T_0 / p_l = 15000 / 8.2 = 1829 \text{ m}$$

$$a_{11} = T_1 / p_l = 57000 / 8.2 = 6951 \text{ m;}$$

3. Obliczenie wydłużenia sprężystego tylko dla liny stalowej (wydłużenia łańcucha nie uwzględnia się):

$$\Delta_s = L_s (T_1 - T_0) / (\varepsilon \cdot d^2) = 400 (57 - 15) / (57^2 \cdot 3.7) = 1.4 \text{ m}$$

4. Obliczenie reakcji w punktach A i B (wyjścia z kluzy) zgodnie ze schematem obciążeń (e)

$$R_A = [Q_t (L_c - L_t / 2) + Q_l \cdot L_l / 2] / L_c = 7.18 \text{ t}$$

gdzie: $L_c = L_t + L_l = 400 + 108 = 508 \text{ m}$

$$R_B = Q_t + Q_l - R_A = 2.69 \text{ t}$$

5. Obliczenie wydłużenia ciężarowego

- dla obciążenia $T_0 = 15 \text{ t}$ oraz T_1

$$\text{tg } \alpha_{Ao} = \text{sh} (x_{Ao} / a_{2o}) = R_A / T_0 = 7.18 / 15 = 0.4786, \quad \text{stąd: } x_{Ao} / a_{2o} = 0.462;$$

$$x_{Ao} = 0.462 \cdot 250 = 115.5 \text{ m}$$

$$\text{tg } \alpha_{Al} = \text{sh} (x_{Al} / a_{2l}) = R_A / T_1 = 7.18 / 57 = 0.1259 \quad \text{stąd: } x_{Al} / a_{2l} = 0.1256$$

$$x_{Al} = 0.1256 \cdot 934 = 117.3 \text{ m}$$

$$\text{tg } \alpha_{Bo} = \text{sh} (x_{Bo} / a_{1o}) = R_B / T_0 = 2.69 / 15 = 0.1793 \quad \text{stąd: } x_{Bo} / a_{1o} = 0.1784$$

$$x_{Bo} = 0.1784 \cdot 1830 = 326.5 \text{ m}$$

$$\text{tg } \alpha_{Bl} = \text{sh} (x_{Bl} / a_{1l}) = R_B / T_1 = 2.69 / 57 = 0.04719 \quad \text{stąd: } x_{Bl} / a_{1l} = 0.04719$$

$$x_{Bl} = 0.04719 \cdot 6951 = 328$$

Z powyższych obliczeń wynika że teoretyczna długość odcinka zwisającego łańcucha na odcinku AN nieznacznie różni się od wydanej długości (średnie $x_A = 116.4 \text{ m}$) dlatego można potraktować wydłużenie ciężarowe tego odcinka jako różnicę:

$$\Delta_l = x_{Al} - x_{Ao} = 117.3 - 115.5 = 1.8 \text{ m}$$

Można zauważyć że teoretyczna długość odcinka liny stalowej BF (do punktu przegięcia) jest krótsza od długości wydanej (średnia $x_B = 327.25 \text{ m}$), stąd wynika konieczność uwzględnienia odpowiedniej poprawki na wydłużenie ciężarowe tego odcinka określonej z następującej proporcji:

$$\Delta_l = (L_l / 327.25) \cdot (x_{Bl} - x_{Bo}) = (400 / 327.25) \cdot (328 - 326.5) = 1.83 \text{ m}$$

6. Ostatecznie całkowite wydłużenie zaprojektowanej linii holowniczej będzie stanowiło sumę wydłużenia sprężystego (Δ_s) i ciężarowego obu odcinków ($\Delta_C = \Delta_l + \Delta_l$):

$$\Delta_C = 1.4 + 1.8 + 1.83 = 5.03 \text{ m}$$

taka również może być maksymalna wysokość fali podczas holowania.

7. Obliczenie maksymalnej i minimalnej strzałki ugięcia linii holowniczej ma duże znaczenie praktyczne: - maksymalna strzałka musi być : $f_{max} \leq H$ (gdzie H - głębokości akwenu)

- minimalna strzałka powinna być: $f_{min} \geq H_f$ (wysokości fali)

$$f_{max} = a_{1o} \cdot \text{ch} (x_{Bo} / a_{1o}) - a_{1o} = 1830 \text{ ch} (326.5 / 1830) - 1830 = 29.2 \text{ m}$$

$$f_{min} = a_{1l} \cdot \text{ch} (x_{Bl} / a_{1l}) - a_{1l} = 6951 \text{ ch} (328 / 6951) - 6951 = 7 \text{ m}$$

Jędrzej Porada 11.1999r

