

Jerzy Kabaciński  
Stowarzyszenie Ekspertów Morskich  
Szczecin

### **Wpływ odkształcenia kadłuba statku na dokładność pomiaru cieczy w zbiornikach statkowych**

Wpływ odkształcenia kadłuba statku na jego wyporność jest powszechnie znany i w obliczeniach masy ładunku na podstawie jego zanurzenia, powszechnie uwzględniany. W praktyce eksperckiej (draft surveyorskiej) spotyka się czasem statki, które posiadają znaczne odkształcenie kadłuba i wówczas zachodzi pytanie czy takie odkształcenia nie rzutuje również na dokładność pomiarów cieczy w zbiornikach. Kodeks ONZ ECE/Energy 1992 podaje przykład opisany w Seaways (marzec 1987) gdzie statek 70 000 dwt., na skutek naprężeń termicznych zmienił swoje odkształcenie w ciągu 10 godzin z +5 cm na -27,5 cm. Przy pomiarze cieczy w zbiornikach koniecznym jest uwzględnienie aktualnego przegłębienia statku, a odkształcenie kadłuba zmienia w pewnym stopniu przegłębienie w obrębie mierzonego zbiornika. Celem tego opracowania jest określenie w jakim stopniu zmienia się przegłębienie miejscowe (dla danego zbiornika) od wielkości strzałki ugięcia kadłuba i innych parametrów zbiornika i statku.

#### **Równanie krzywej odkształcenia kadłuba statku**

Powody odkształcenia kadłuba statku:

- odkształcenie stałe pochodzące z okresu budowy lub złej eksploatacji statku;
  - odkształcenie spowodowane nierównomiernym, wzdłużnym rozłożeniem mas;
  - odkształcenie wywołane różnicą temperatur powietrza i wody (nasłonecznienie pokładu).
- Dokładna krzywa odkształcenia kadłuba statku nie jest znana, jednak z wystarczającą dla celów praktycznych dokładnością przyjmuje się, że jest to parabola [1, 2].

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

Aby wyznaczyć równanie paraboli odkształcenia konieczna jest znajomość jej współczynników  $a$ ,  $b$  i  $c$ . Na podstawie odczytanych trzech zanurzeń i trzech odciętych (wzdłużne położenie znaków zanurzenia od pionu rufowego) powstanie układ trzech równań, który umożliwi rozwiązanie tego problemu:

$$T_r = a \cdot x_r^2 + b \cdot x_r + c$$

$$T_M = a \cdot x_M^2 + b \cdot x_M + c$$

$$T_d = a \cdot x_d^2 + b \cdot x_d + c$$

- gdzie:  $T_r$  – zanurzenie odczytane na znakach rufowych (średnie z obu burt);  
 $T_d$  – zanurzenie odczytane na znakach dziobowych (średnie z obu burt);  
 $T_M$  – zanurzenie odczytane na śródkręciu (średnie z obu burt);  
 $x_r$  – odległość rufowych znaków zanurzenia od pionu rufowego;  
 $x_M$  – odległość znaków śródkręcia od pionu rufowego;  
 $x_d$  – odległość dziobowych znaków zanurzenia od pionu rufowego.

Rozwiązanie tego układu możliwe jest przy zastosowaniu wzorów Cramera jednak jest dość czochłonne. Jeżeli odczytane zanurzenia na dziobie i rufie odnoszą się do pionów, a zanurzenie środkowe do owręża to można znacznie uprościć obliczenia wprowadzając odcięte względne gdzie:  $L_{pp} = 1$ ;  $x_r = 0$ ;  $x_M = 0,5$ ;  $x_d = 1$  [5]. Wówczas:

$$T_r = a \cdot 0^2 + b \cdot 0 + c = c$$

$$T_M = a \cdot 0,5^2 + b \cdot 0,5 + c$$

$$T_d = a \cdot 1^2 + b \cdot 1 + c$$

Po rozwiązaniu tego układu otrzymano:

$$a = 2 \cdot T_r - 4 \cdot T_M + 2 \cdot T_d$$

$$b = 4 \cdot T_M - 3 \cdot T_r - T_d$$

$$c = T_r$$

### Określenie przegłębienia miejscowego dla danego zbiornika

Przegłębienie dla danego zbiornika o stałym przekroju poprzecznym określić można w dwojaki sposób:

1. Na podstawie równania paraboli wyznaczyć rzędne na początku zbiornika ( $x_{z1}$ ) i na końcu zbiornika ( $x_{z2}$ )

$$T_{zd} = a \cdot x_{zd}^2 + b \cdot x_{zd} + T_r$$

$$T_{zr} = a \cdot x_{zr}^2 + b \cdot x_{zr} + T_r$$

$$t_{mz} = \frac{(T_{zd} - T_{zr}) \cdot L_{pp}}{l_z}$$

gdzie:  $T_{zd}$  – zanurzenie w dziobowej części zbiornika;

$T_{zr}$  – zanurzenie w rufowej części zbiornika;

$t_{mz}$  – przegłębienie w obrębie zbiornika (dalej zwane przegłębieniem miejscowym)

2. Z równania paraboli obliczyć pochodną dla rzędnej odpowiadającej środku powierzchni zbiornika przy danym wypełnieniu. Pochodna ta jest równa tangensowi kąta przegłębienia  $tg \psi$ ;

$$tg \psi = y' = (a \cdot x_{Fz}^2 + b \cdot x_{Fz} + T_r)'$$

$$t_{mz} = tg \psi \cdot L_{pp}$$

Jeżeli rozważania ograniczymy tylko do zmiany przegłębienia miejscowego spowodowanego odkształceniem kadłuba i przyjmiemy długość względną  $L_{pp} = 1$  to obliczenia znacznie się uproszczą. Przyjęto, że statek nie ma żadnego przegłębienia czyli  $T_d = T_r$ . Ponieważ interesuje nas tylko krzywa odkształcenia więc przyjęto dodatkowo, że  $T_d = T_r = 0$  a zanurzenie na owręzu równe jest strzałce ugięcia  $f$ .

$$f = \frac{(T_d + T_r)}{2} - T_M$$

przy tych założeniach współczynniki równania przyjmą postać:

$$a = -4 \cdot f$$

$$b = 4 \cdot f$$

$$c = 0$$

pochodna do krzywej w punkcie względnego środka zbiornika ( $x'_{Fz}$ ):

$$y' = (-4 \cdot f \cdot x_{Fz}^2 + 4 \cdot b \cdot f \cdot x'_{Fz}) = -8 \cdot f \cdot x'_{Fz} + 4 \cdot f$$

Ponieważ  $\operatorname{tg} \psi = y'$  a przegłębienie =  $\operatorname{tg} \psi \cdot L_{pp}$  ( $L_{pp} = 1$ ) więc  $y'$  jest równocześnie przegłębieniem miejscowym dla względnej odległości środka zbiornika od pionu rufowego. Jeżeli to wyrażenie pomnoży się i podzieli przez  $L_{pp}$  to otrzyma się wzór na zmianę przegłębienia miejscowego dla odciętej rzeczywistej.

$$\Delta t_{mz} = -8f \cdot x'_{Fz} + 4f = -8f \cdot \left( x'_{Fz} - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{L_{pp}}{L_{pp}} = -8f \cdot \frac{x_{Fz} - \frac{L_{pp}}{2}}{L_{pp}}$$

$$\Delta t_{mz} = -8f \cdot \frac{x_{Fz} - \frac{L_{pp}}{2}}{L_{pp}}$$

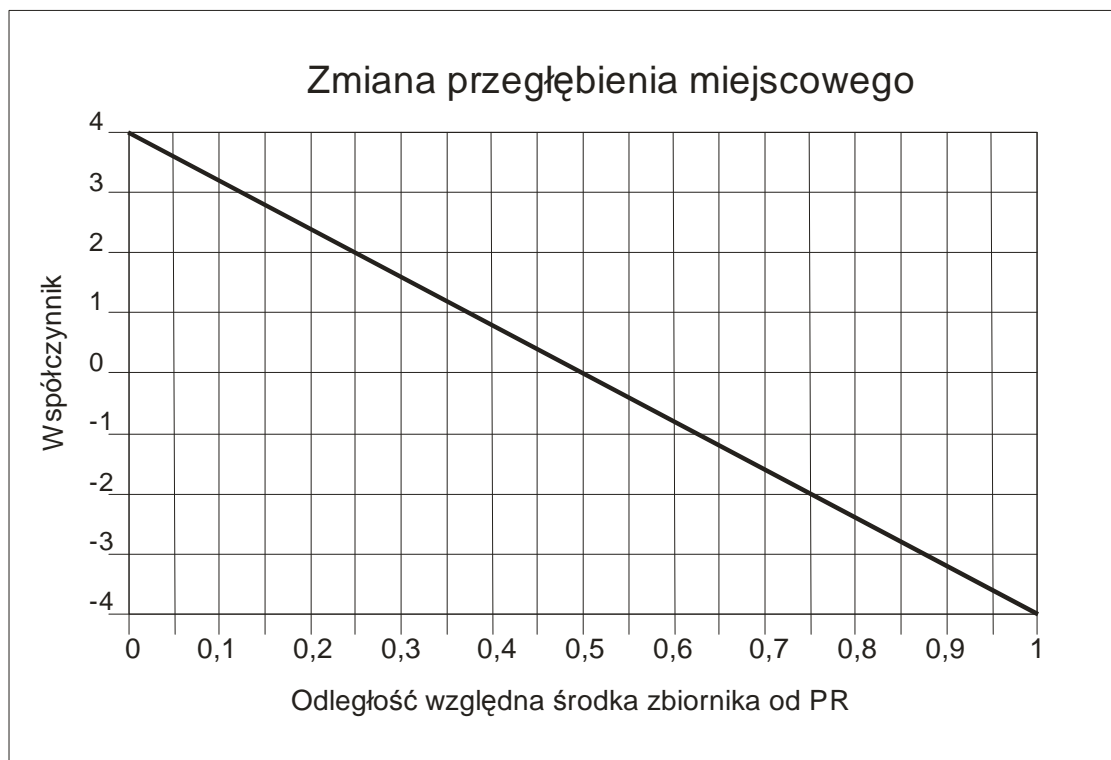
gdzie:  $\Delta t_{mz}$  – zmiana przegłębienie miejscowe dla środka danego zbiornika;

$x_{Fz}$  – rzędna rzeczywista środka zbiornika od pionu rufowego;

$x_{Fz,5}$  – rzędna rzeczywista środka zbiornika od owręza

Do tych obliczeń można wykorzystać wykres „Zmiany przegłębienia miejscowego” wchodząc względnym położeniem środka zbiornika od pionu rufowego i odczytując współczynnik. Zmianę przegłębienia miejscowego określi wielkość:

$$\Delta t_{mz} = f \cdot \text{wsp.}$$



Rys. 1. Współczynnik do określenia zmiany przegłębienia miejscowego

Odształcenie kadłuba powoduje również odkształcenie dna zbiornika zwłaszcza dennego i przez to pewną zmianę objętości cieczy. Znając długość statku, długość zbiornika i wielkość odkształcenia kadłuba można określić strzałkę ugięcia dna w obrębie zbiornika.

Łatwo sprawdzić, że strzałka ugięcia maleje z kwadratem długości względnej zbiornika i tak jeżeli długość statku wynosi 100 m a długość zbiornika 20 m to strzałka ugięcia w obrębie zbiornika będzie:  $(20/100)^2 = 1/25$  odkształcenia kadłuba.

Zmiana objętości cieczy będzie równa 2/3 strzałki ugięcia w obrębie zbiornika pomnożona przez długość zbiornika [3].

Strzałka ugięcia dna w obrębie zbiornika jest oczywiście tylko częścią strzałki ugięcia kadłuba statku i jest równa:

$$\Delta f = f \cdot \left( \frac{l_z}{L_{pp}} \right)^2$$

Dodatkową bryłę cieczy spowodowaną ugięciem kadłuba, dla zbiornika prostokątnego, obliczymy mnożąc długość zbiornika przez boczne pole ograniczone prostą i parabolą ugięcia w obrębie zbiornika. Pole powierzchni bocznej, na podstawie wzoru Simsona:

$$F = \frac{l_z}{2 \cdot 3} \cdot (0 + 4 \cdot \Delta f + 0) = \frac{2 \cdot \Delta f \cdot l_z}{3}$$

Objętość dodatkowa :

$$\Delta V_f = F \cdot b_z = f \cdot \left( \frac{2 \cdot l_z^3 \cdot b_z}{3 \cdot L_{pp}^2} \right) = f \cdot wsp_f$$

Ostatecznie dodatkową objętość cieczy można określić mnożąc wielkość odkształcenia kadłuba, z odpowiednim znakiem, przez wartość stałą dla danego zbiornika (wielkość w nawiasie).

### Przykład 1.

Statek o długości 110 m, przegłębienie  $t = -0,90$  m, odkształcenie kadłuba  $f = 0,204$  m.

Określić wielkość przegłębienia miejscowego dla zbiornika o środku ciężkości znajdującym się w odległości 91,38 m od pionu rufowego.

#### Rozwiązanie:

1. Korzystając z wykresu:

- odległość względna środka zbiornika od pionu rufowego =  $91,38/110 = 0,83$   
na tej podstawie z wykresu: współczynnik -2,6

$$\Delta t_{mz} = f \cdot ws = 0,204 \cdot (-2,6) = -0,53 \text{ m}$$

$$t_{mz} = t + \Delta t_{mz} = -0,90 + (-0,53) = -1,43 \text{ m}$$

2. Z wykorzystaniem wzoru:

- odległość środka zbiornika od owręża =  $91,38 - 110/2 = 36,38$  m

$$\Delta t_{mz} = -8 \cdot f \cdot \frac{x_{FzPb}}{L_{pp}} = -8 \cdot 0,204 \cdot \frac{36,38}{110} = -0,54 \text{ m}$$

$$t_{mz} = t + \Delta t_{mz} = -0,90 + (-0,54) = -1,44 \text{ m}$$

## Przykład 2.

Statek o długości  $L = 110$  m posiada zbiornik balastowy o długości  $l_z = 19,65$  m, środek ciężkości zbiornika  $91,38$  m od pionu rufowego, szerokość zbiornika w dnie  $6,06$  m, obłó zbiornika o promieniu  $R = 0,44$  m, rura sondażowa jest umieszczona  $1,4$  m od grodzi rufowej.

Dla tych danych opracowano program w aplikacji EXSEL i przeprowadzono obliczenia zawarte w tabel 1.

Tabela 1.

t	f	s	$V_o$	$V_z$	$\Delta v$	$t_{mz}$
0	-0,1	0,01	1,203	3,516	2,313	0,265
0	+0,1	0,05	6,089	3,765	-2,324	-0,265
-0,3	-0,1	0,05	3,279	5,597	2,318	-0,035
-0,3	+0,1	0,10	9,471	7,096	-2,375	-0,565
0,1	-0,1	0,01	2,132	4,456	2,324	0,365
0,1	+0,1	0,03	4,574	2,258	-2,316	-0,165
0	-0,2	0,01	1,203	5,853	4,650	0,529
0	+0,2	0,09	11,039	6,355	-4,684	-0,529
-0,3	-0,2	0,05	3,279	7,937	4,660	0,229
-0,3	+0,2	0,14	14,409	9,708	-4,701	-0,829
0,1	-0,2	0,01	2,132	6,800	4,668	0,629
0,1	+0,2	0,08	10,748	6,062	-4,686	-0,429

Gdzie:  $t$  – przegłębienie – znak „-” – „, przegłębienie na rufę „+” na dziób [4];

$f$  – odkształcenie kadłuba statku;

$s$  – sondowanie zbiornika (minimalne zapewniające zakrycie całego dna;

$V_o$  – objętość cieczy w zbiorniku bez odkształcenia kadłuba statku;

$V_z$  – rzeczywista objętość cieczy w zbiorniku;

$\Delta v$  – różnica objętości cieczy

Ostatecznie dodatkową objętość cieczy można określić mnożąc wielkość odkształcenia kadłuba, z odpowiednim znakiem, przez wartość stałą dla danego zbiornika (wielkość w nawiasie).

## Wnioski końcowe

1. Wpływ odkształcenia kadłuba statku na przegłębienie miejscowe jest tym większy im większe jest odkształcenie kadłuba i większa odległość środka zbiornika od owręza.
2. Przy określaniu objętości cieczy w zbiornikach na podstawie sondowania powinno się uwzględniać przegłębienie miejscowe, a nie przegłębienie całego statku.
3. Poprawka do przegłębienia ma znak przeciwny dla zbiorników w części dziobowej w stosunku do tych w części rufowej.
4. Na masowcu w stanie załadowanym mierzy się resztki balastów w zbiornika dennych, które są usytuowane prawie wzdłuż całego statku. Nawet przy znacznym przegłębieniu poprawki te redukują się. W stanie balastowym zbiorniki są całkowicie zapełnione i problem ten nie istnieje.

5. Zmiana przegłębienia miejscowego może mieć istotny wpływ przy pomiarze zbiorników paliwowych umieszczonych na rufie w maszynowni oraz innych znacznie oddalonych od owręża.
6. Poprawka na przegłębienie miejscowe zachowuje swą wielkość również dla tych pomiarów zbiornika, kiedy dno jest częściowo odsłonięte. Jednak wielkość zmiany objętości cieczy w zbiorniku maleje z chwilą kiedy dno zbiornika się obnaża (patrz wykres xxx).
7. W celu łatwego określenia wielkości zmiany przegłębienia miejscowego dla konkretnego zbiornika celowym wydaje się umieszczenia w tabeli sondażowej przy każdym zbiorniku wielkości współczynnika z wykresu xxx w celu określenia poprawki do przegłębienia miejscowego:

$$\Delta t_{mz} = f \cdot wsp. [m]$$

8. Podobne ułatwienie można zastosować do obliczania dodatkowej objętości cieczy spowodowanej odkształceniem dna w obrębie zbiornika. W tabeli sondażowej można umieścić współczynniki obliczone z wzoru:

$$wsp_f = \frac{2 \cdot l_z^3 \cdot b_z}{3 \cdot L_{pp}^2} [m^2]$$

### **Bibliografia**

1. Code of Uniform Standards and Procedures for the Performance of Draft Surveys of Coal Cargoes. United Nations . Economic Commission for Europe, 1992.
2. Ibester j.: Bulk Carrier Practice. The Nautical Institute, London 1993.
3. Jurdziński M., Kabaciński J.: Określanie masy ładunku na podstawie zanurzenia statku. Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Szczecinie. Gdynia – Szczecin 2005 r.
4. IMO: Model loading and Stability Manuel. MSC/Cir. 920/ 15 June 1999.
5. Kabaciński J.: Stateczność i niezatapialność statku. Wydawnictwo WSM, Szczecin 1995 r.