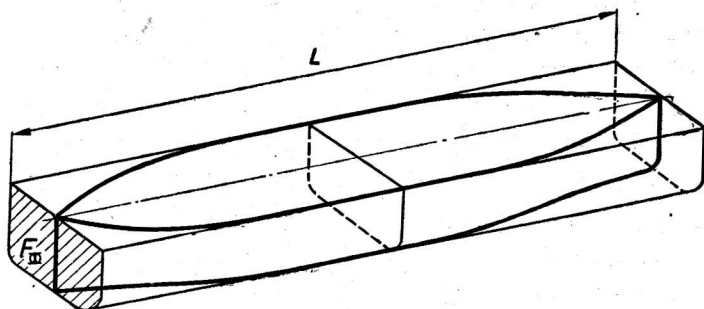


Rys. 1.12



Rys. 1.13

Tablica 1.1

Pełnotliwości kadłuba i stosunki wymiarów głównych

Typ okrętu	$\delta_k^*$	$\beta_k$	$\alpha_k$	$L/B$	$B/T$
Statki pasażerskie (szybkie)	0,55 ÷ 0,65	0,90 ÷ 0,96	0,73 ÷ 0,81	8,0 ÷ 9,0	2,5 ÷ 3,1
Duże statki pasażersko-towarowe	0,60 ÷ 0,75	0,94 ÷ 0,98	0,76 ÷ 0,86	7,5 ÷ 8,0	2,4 ÷ 2,7
Statki towarowe duże	0,65 ÷ 0,80	0,96 ÷ 0,99	0,80 ÷ 0,86	7,0 ÷ 8,0	2,0 ÷ 2,5
Statki towarowe średnie	0,65 ÷ 0,78	0,96 ÷ 0,98	0,82 ÷ 0,87	6,5 ÷ 7,5	2,2 ÷ 2,8
Statki towarowe małe	0,70 ÷ 0,78	0,93 ÷ 0,98	0,82 ÷ 0,87	6,0 ÷ 7,0	2,5 ÷ 3,4
Holowniki, lodołamacze	0,45 ÷ 0,60	0,75 ÷ 0,84	0,75 ÷ 0,83	4,0 ÷ 5,5	2,2 ÷ 3,1
Statki rzeczne towarowe	0,73 ÷ 0,85	0,95 ÷ 0,99	0,75 ÷ 0,90	6,5 ÷ 9,0	3,4 ÷ 6,7
Trawlerzy	0,50 ÷ 0,60	0,77 ÷ 0,90	0,75 ÷ 0,84	5,0 ÷ 7,0	2,0 ÷ 2,5

\*W praktyce pełnotliwości konstrukcyjne  $\delta_k$ ,  $\beta_k$ ,  $\alpha_k$  są często oznaczane literami  $\delta$ ,  $\beta$  i  $\alpha$ .

Poza omówionymi wyżej współczynnikami na cechy kadłuba wpływają także stosunki wymiarów głównych. Dla bliższego określenia tych cech posługujemy się następującymi stosunkami charakteryzującymi odpowiednio:  $L/B$  — cechy stateczności i cechy oporowe kadłuba,  $B/T$  — cechy oporowe,  $L/H$  — cechy wytrzymałości wzdłużnej kadłuba,  $H/T$  — cechy bezpieczeństwa.

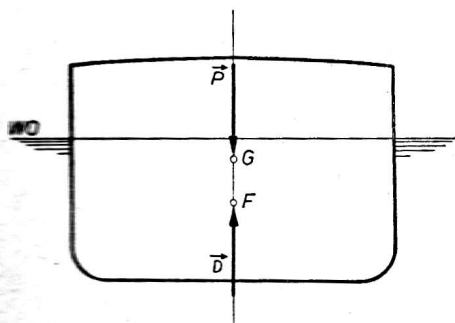
Orientacyjne wartości częściej używanych pełnotliwości i stosunków wymiarów głównych podano w tablicy 1.1.

gących się zdarzyć stanach załadowania. Nieprzywiązywanie należytej wagi do tego zagadnienia może prowadzić do sytuacji niebezpiecznych dla okrętu, a nawet spowodować jego zatonięcie, jak to wielokrotnie miało miejsce wskutek niewłaściwego załadowania okrętu. Stąd również w czasie eksploatacji okrętu konieczna jest stała kontrola położenia jego środka ciężkości; sposoby jej przeprowadzenia omówimy w podrozdziale 4.10.

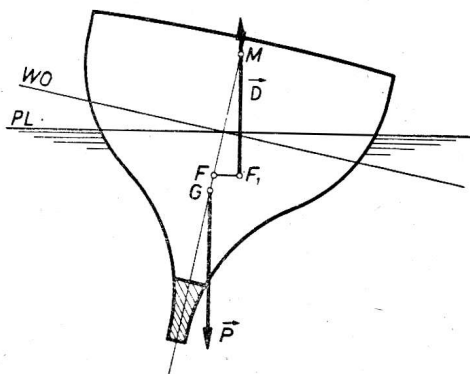
### 2.3. RÓWNOWAGA OKRĘTU

Okręt znajdujący się na wodzie stara się zawsze przyjąć takie położenie, w którym wszystkie działające na niego siły i momenty będą się wzajemnie znosić, gdyż wtedy tylko znajdzie się on w stanie równowagi. Warunkiem równowagi okrętu będzie więc, by zarówno suma sił działających na okręt jak i suma momentów statycznych tych sił były równe zeru.

Jak wiemy z podrozdziału 2.1, na okręt znajdujący się w spoczynku na wodzie działają zawsze dwie równe sobie, lecz przeciwnie skierowane siły: siła ciężkości okrętu  $\vec{P}$ , skierowana pionowo w dół, oraz wypór  $\vec{D}$ , skierowany pionowo do góry. Ażeby okręt mógł pozostawać w stanie równowagi, obie te siły muszą nie tylko być sobie równe co do wielkości, lecz również nie mogą tworzyć pary sił, gdyż



Rys. 2.11



Rys. 2.12

wówczas nastąpiłoby wychylenie okrętu z zajmowanego położenia bez działania żadnej innej siły. Siły te muszą zatem działać wzdłuż jednej prostej, która oczywiście będzie prostopadła do powierzchni wody. Inaczej mówiąc: *okręt, na który nie działają żadne siły z zewnątrz, znajduje się wówczas w równowadze, gdy jego ciężar i wypór są sobie równe, a środek ciężkości i środek wyporu leżą na jednej prostej prostopadłej do powierzchni wody* (rys. 2.11).

Jak jednak będzie się zachowywał okręt, gdy jakaś siła zewnętrzna, na przykład działanie wiatru, spowoduje jego wychylenie ze stanu równowagi?

Otóż po ustaniu działania siły wychylającej okręt może sam powrócić do położenia początkowego — wówczas równowagę jego nazwiemy *stałą*, bądź wychylać

Ostatnim z omawianych wymiarów głównych jest *wysokość boczna* —  $H$ . Określamy ją jako odległość pomiędzy płaszczyzną podstawową a narożem owręza przy:

- 1) linii górnej krawędzi pokładnika dla kadłubów stalowych (rys. 1.2, 1.5, 1.9);
- 2) linii górnej krawędzi poszycia pokładu dla kadłubów drewnianych (rys. 1.7, 1.8);
- 3) dolnej krawędzi obramowania burtowego dla kadłubów bezpokładowych.

### 1.3. PEŁNOTLIWOŚCI I STOSUNKI WYMIARÓW GŁÓWNYCH

Kształty kadłubów różnią się między sobą dość znacznie, co powoduje, iż podanie tylko wymiarów głównych nie charakteryzuje dostatecznie dokładnie wielkości i właściwości morskich okrętów. Dla bliższego określenia tych właściwości posługujemy się tzw. pełnotliwościami.

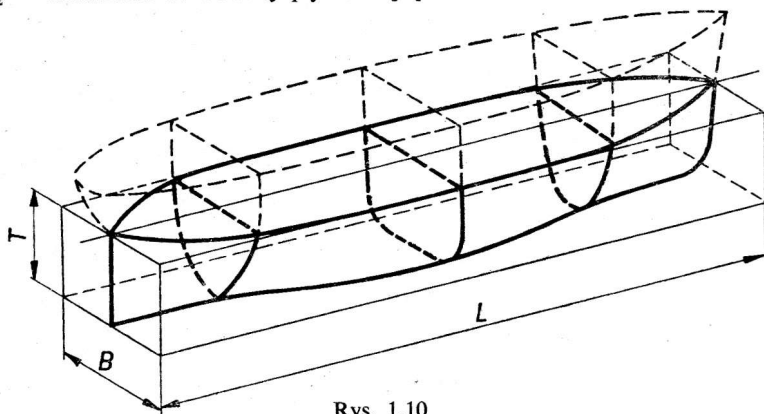
*Pełnotliwością podwodzi*  $\delta$  nazywamy stosunek objętości podwodzi do objętości prostopadłościanu na nim opisanego, przy czym *podwodziem* zwiemy figurę przestrzenną utworzoną przez zanurzoną część kadłuba (dla kadłubów stalowych bez uwzględnienia poszycia i części wystających, dla drewnianych — z uwzględnieniem poszycia, bez części wystających).

Pełnotliwość podwodzi wyraża się wzorem

$$\delta = \frac{V_z}{L_w B_w T_z} \quad (1.1)$$

gdzie:

- $V_z$  — objętość podwodzi [ $m^3$ ];
- $L_w$  — długość na wodnicy pływania [m];
- $B_w$  — szerokość na wodnicy pływania [m];
- $T_z$  — zanurzenie do wodnicy pływania [m].



Rys. 1.10

*Pełnotliwością konstrukcyjną podwodzi*  $\delta_k$  nazywamy stosunek objętości podwodzi  $V$  przy zanurzeniu konstrukcyjnym  $T$  do objętości prostopadłościanu o wymiarach  $L \times B \times T$  (rys. 1.10) i wyrażamy wzorem

$$\delta_k = \frac{V}{LBT} \quad (1.2)$$

Stąd objętość podwodzia możemy obliczyć według wzoru

$$V = \delta_k LBT \quad (1.3)$$

Pełnotliwość podwodzia  $\delta$  ma ścisły związek z prędkością okrętu; im okręt ma być szybszy tym kadłub jego powinien być smuklejszy, tym mniejsza zatem powinna być pełnotliwość podwodzia.

Poza pełnotliwością podwodzia posługujemy się jeszcze: pełnotliwością przekroju owrężowego, pełnotliwością przekroju wodnicowego, pełnotliwością wzdłużną i pełnotliwością pionową.

Pełnotliwością przekroju owrężowego —  $\beta$  nazywamy stosunek pola zanurzonej części przekroju owrężowego do pola powierzchni opisanego na nim prostokąta. Oznaczając dla przekroju owrężowego, zanurzonego do konstrukcyjnego przekroju wodnicowego pole zanurzonej części przekroju symbolem  $F_{\infty}$  (rys. 1.11), otrzymamy pełnotliwość konstrukcyjnego przekroju owrężowego  $\beta_k$  z wzoru

$$\beta_k = \frac{F_{\infty}}{BT} \quad (1.4)$$

Pełnotliwość przekroju wodnicowego —  $\alpha$  jest to stosunek pola przekroju wodnicowego  $F_{wo}$  do pola powierzchni prostokąta na nim opisanego (rys. 1.12) i wyraża się wzorem

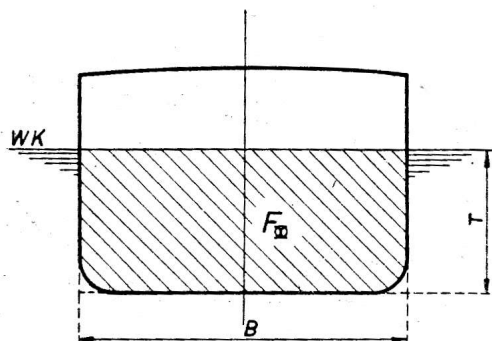
$$\alpha = \frac{F_{wo}}{L_w B_w} \quad (1.5)$$

Pełnotliwość wzdłużną —  $\varphi$  określa stosunek objętości podwodzia do objętości walca o tworzących prostopadłych do płaszczyzny owręża, o wysokości równej długości między pionami  $L$  i podstawie równej zanurzonej części konstrukcyjnego przekroju owrężowego (rys. 1.13):

$$\varphi = \frac{V}{F_{\infty} L} = \frac{\delta_k LBT}{\beta_k BTL} = \frac{\delta_k}{\beta_k} \quad (1.6)$$

Pełnotliwość pionową —  $\varkappa$  jest to stosunek objętości podwodzia do objętości walca o tworzących prostopadłych do płaszczyzny podstawowej, o podstawie równej konstrukcyjnemu przekrojowi wodnicowemu i wysokości równej zanurzeniu konstrukcyjnemu

$$\varkappa = \frac{V}{F_{WK} T} = \frac{\delta_k LBT}{\alpha_k LBT} = \frac{\delta_k}{\alpha_k} \quad (1.7)$$



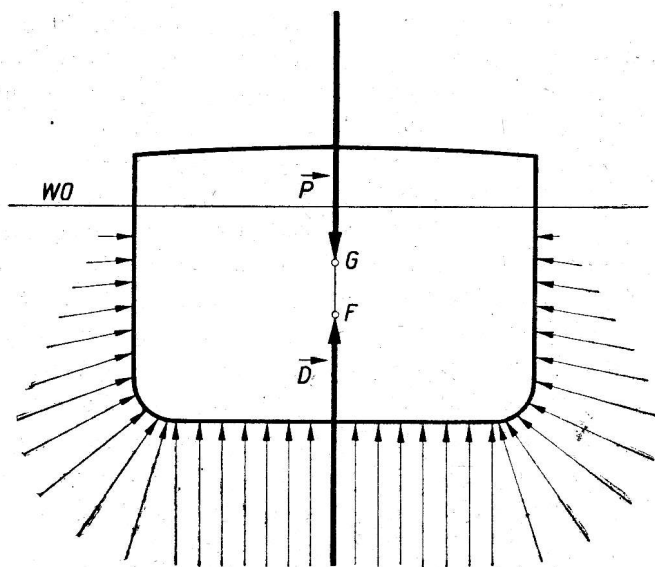
Rys. 1.11



## PLYWALNOŚĆ OKRĘTU

### 2.1. WYPÓR, WYPORNOŚĆ, ŚRODEK WYPORU, METACENTRUM

Gdy dowolne ciało, na przykład kadłub okrętu, zanurzymy w wodzie, wówczas pewna ilość wody o objętości  $V$ , równej objętości podwodzia okrętu, zostaje wyparta z zajmowanego uprzednio miejsca. Na całą zanurzoną powierzchnię kadłuba, pływającego swobodnie na spokojnej, niesfalowanej wodzie, wywierane są ciśnienia wody, równe ciśnieniom jakich doznają poszczególne poziome warstwy wody od warstw nad nimi leżących. Ponieważ ciśnienie wody wzrasta proporcjonalnie do jej głębokości, zatem ciśnienia wywierane na poszczególne elementarne powierzchnie kadłuba będą wprost proporcjonalne do odległości tych powierzchni od powierzchni wody. Wypadkową wszystkich tych sił, działającą pionowo w górę, nazywamy *wyporem* i oznaczamy symbolem  $\vec{D}$  (rys. 2.1).



Rys. 2.1

Przeciwnie do kierunku działania wyporu działa *siła ciężkości*, oznaczana symbolem  $\vec{P}$ , która wtlacza kadłub do wody; wielkość (wartość bezwzględna) siły ciężkości nazywamy *ciężarem* okrętu i oznaczamy literą  $P$ . Na kadłub okrętu działają więc dwie przeciwnie skierowane siły: siła ciężkości  $\vec{P}$  i wypór  $\vec{D}$ . Stan równowagi ustali się wówczas, tzn. okręt nie będzie wynurzał się ani też zanurzał głębiej, gdy obie siły będą sobie równe co do wielkości  $P = D$  i będą działać wzdłuż jednej prostej (podrozdz. 2.3).

Wielkość (wartość bezwzględna) wyporu dowolnego ciała, zwana *wypornością* i oznaczana literą  $D$ , określona jest ściśle prawem Archimidesa, które brzmi następująco: „wypadkowa naporu cieczy na ciało w niej zanurzone, działająca pionowo w górę, równa się ciężarowi cieczy, wypartej przez dane ciało”. Dowód na to jest prosty. Wyobraźmy sobie, że usuwamy zanurzony w wodzie okręt, a przestrzeń przez niego w wodzie zajmowaną wypełniamy płynem o takim samym ciężarze właściwym jak woda otaczająca. Siły naporu wody, działające przedtem na powierzchnię podwodzia, których wypadkową jest wypór, są obecnie zrównoważone siłą ciężkości wlanego płynu. Ponieważ układ pozostaje w równowadze, zatem wielkość wyporu okrętu, a więc jego wyporność, musi być równa ciężarowi płynu równemu ciężarowi wody wypartej przez okręt, czyli

$$D = P = \gamma V \quad (2.1)$$

gdzie:

$D$  — wyporność okrętu [kG];

$\gamma$  — ciężar właściwy wody [kG/m<sup>3</sup>];

$V$  — objętość podwodzia [m<sup>3</sup>].

Równocześnie siła ciężkości wlanego płynu i wypór okrętu muszą działać wzdłuż jednej prostej. By warunek ten był spełniony przy wszystkich położeniach okrętu, kierunek działania wyporu musi zawsze przechodzić przez punkt przyłożenia siły ciężkości wlanego płynu, którym jest środek geometryczny bryły podwodzia. Można zatem przyjąć, iż punkt ten, zwany *środkiem wyporu* i oznaczany literą  $F^1$ , jest punktem przyłożenia wyporu okrętu.

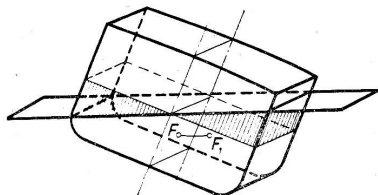
Jak z powyższego wynika, położenie środka wyporu zależy będzie wyłącznie od wielkości i kształtu podwodzia. Kadłub okrętu jest symetryczny względem płaszczyzny wzdłużnej (płaszczyzny symetrii); dla okrętu nie przechylonego na burtę środek wyporu musi leżeć w płaszczyźnie symetrii (rys. 2.1). Dla okrętów o kształtach normalnych środek wyporu znajduje się wówczas na wysokości około 0,55  $T$  (gdzie  $T$  oznacza zanurzenie okrętu), w okolicy połowy długości okrętu.

Położenie środka wyporu możemy wyznaczyć dokładnie dla każdego zanurzenia i każdego położenia okrętu, jeżeli tylko znamy kształt jego kadłuba; służące do tego celu metody, sprowadzające się do znalezienia środka geometrycznego bryły podwodzia, podamy w rozdziale 3 dla okrętu nieprzechylonego oraz w rozdziale 4 dla okrętu przechylonego.

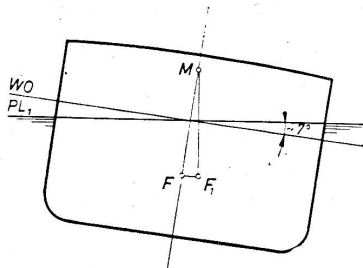
<sup>1</sup> Środek wyporu oznaczany jest w literaturze radzieckiej literą  $C$ , w literaturze anglosaskiej literą  $B$ .

Jeżeli z jakichkolwiek powodów okręt zostanie przechylony na burtę, wówczas środek wyporu zmieni swe położenie. W czasie przechyłu ciężar okrętu  $P$ , a wraz z nim i wyporność  $D$  pozostają niezmienione, nie może się więc również zmienić objętość podwodzia  $V$ . Wskutek jednakże wynurzenia się jednej a zanurzenia drugiej burty kształt bryły podwodzia ulegnie zmianie, co musi za sobą pociągnąć zmianę położenia jej środka geometrycznego, a więc i pokrywającego się z nim środka wyporu (rys. 2.2).

Środek wyporu przesuwają się przy przechyłach zawsze w kierunku burty zanurzającej się. Przy małych kątach przechyłu (do ok.  $7^\circ$ ) środek wyporu porusza się będzie po krzywej zbliżonej bardzo do łuku okręgu, którego środkiem krzywizny



Rys. 2.2



Rys. 2.3

znajduje się w punkcie leżącym w płaszczyźnie symetrii okrętu. Punkt ten nosi nazwę *metacentrum poprzeczne* (początkowe) lub w skrócie *metacentrum* i oznaczany jest literą  $M$  lub  $M_B$  (rys. 2.3). Położenie punktu  $M$  — jak to wykażemy w podrozdziale 2.3 i omówimy szerzej w podrozdziale 4.2 — ma zasadniczy wpływ na zachowanie się okrętu na morzu.

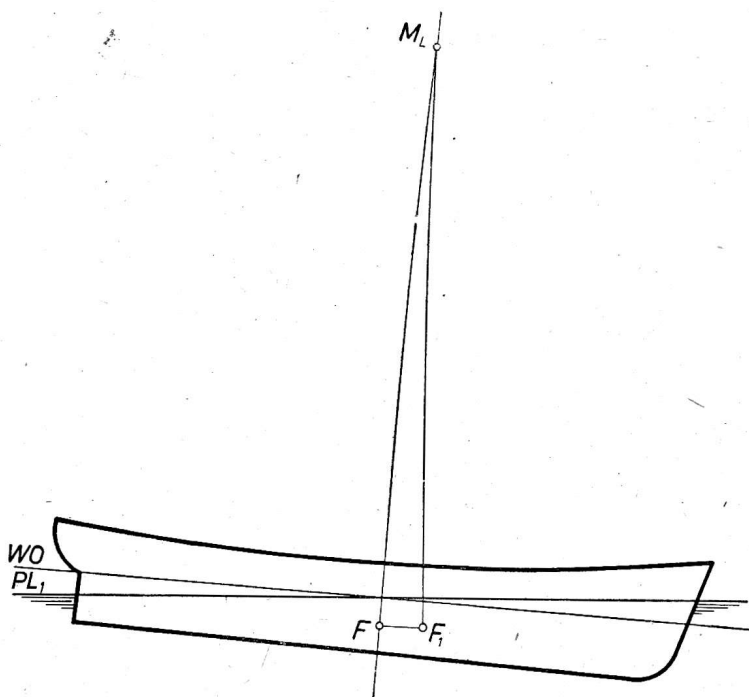
Ponieważ położenie środka wyporu  $F$  zależy od kształtu podwodzia, zatem przy tych samych kątach przechyłu zmiany położenia środków wyporu okrętów o różnych kształtach kadłuba będą różne, różne więc także będą położenia metacentrum  $M$ .

Podobny wpływ na wzdłużne położenie środka wyporu wywierają wychylenia statku na dziób lub rufę, zwane *przegłębieniami*, powodujące przesuwanie się środka wyporu zawsze w kierunku zanurzającego się dziobu lub rufy. Środek wyporu wędruje przy tym również po krzywej zbliżonej do łuku okręgu, o promieniu jednak znacznie większym niż przy przechyłach bocznych; środek tego okręgu znajduje się w punkcie zwanym *metacentrum wzdłużne* i oznaczanym literami  $M_L$  (rys. 2.4). Metacentrum wzdłużne  $M_L$ , którego właściwości omówimy szerzej w podrozdziale 4.3, znajduje się zawsze znacznie wyżej niż metacentrum poprzeczne  $M$ .

Na okręt znajdujący się w spoczynku działają zatem wzdłuż jednej prostej dwie siły równe co do wielkości, lecz przeciwnie skierowane: wypór  $\bar{D}$  i siła ciężkości  $\bar{P}$ . Zanurzenie kadłuba będzie więc takie, że ciężar okrętu  $P$  równy będzie jego wyporności  $D$ , obliczanej z wzoru (2.1) jako iloczyn objętości podwodzia i ciężaru włas-

ciwego wody  $\gamma$ . Zanurzenie okrętu zależy zatem od ciężaru okrętu, kształtu podwodzia i ciężaru właściwego wody.

Gdy ciężar okrętu wzrasta (np. przez przyjęcie ładunku), wówczas okręt zanurza się głębiej, gdy ciężar maleje — wynurza się. Zanurzenie okrętu może jednak ulegać również zmianom przy niezmiennym ciężarze, a więc stałej wyporności, a to wsku-



Rys. 2.4

tek zmian ciężaru właściwego wody  $\gamma$ , który wynosi dla wody słodkiej  $1000 \text{ kg/m}^3$ , dla Morza Bałtyckiego około  $1015 \text{ kg/m}^3$ , zaś dla Morza Północnego i Oceanu Atlantyckiego około  $1025 \text{ kg/m}^3$ . W obliczeniach teoretycznych przyjmuje się dla okrętów o nieograniczonym rejonie żeglugi standardowy ciężar właściwy  $\gamma = 1025 \text{ kg/m}^3$ .

Skoro więc okręt przejdzie z wody słonej ( $\gamma_1$ ) na wodę słodką ( $\gamma_2$ ), na przykład w ujście rzeki, wówczas wskutek zmniejszenia się ciężaru właściwego wody wzrośnie objętość podwodzia  $V$ , gdyż

$$D = \gamma_1 V_1 = \gamma_2 V_2 = \text{const}$$

a ponieważ  $\gamma_2 < \gamma_1$ , zatem  $V_2 > V_1$ .

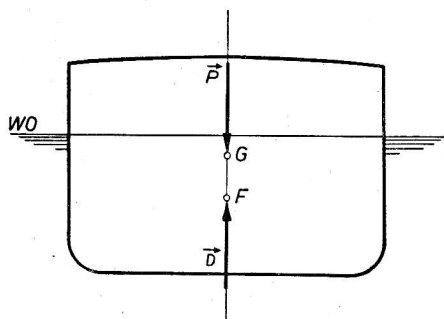
Wskutek tego zanurzenie okrętu w danym stanie załadowania będzie większe w wodzie słodkiej niż w wodzie słonej (rys. 2.5). Zmiana zanurzenia będzie od różnic ciężaru właściwego wody oraz od kształtu podwodzia okrętu i może być określona za pomocą tzw. arkusza krzywych hydrostatycznych (podrozdz. 3.2).

gących się zdarzyć stanach załadowania. Nieprzywiązywanie należytej wagi do tego zagadnienia może prowadzić do sytuacji niebezpiecznych dla okrętu, a nawet spowodować jego zatonięcie, jak to wielokrotnie miało miejsce wskutek niewłaściwego załadowania okrętu. Stąd również w czasie eksploatacji okrętu konieczna jest stała kontrola położenia jego środka ciężkości; sposoby jej przeprowadzenia omówimy w podrozdziale 4.10.

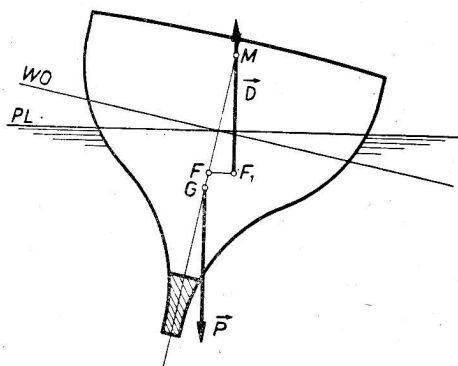
### 2.3. RÓWNOWAGA OKRĘTU

Okręt znajdujący się na wodzie stara się zawsze przyjąć takie położenie, w którym wszystkie działające na niego siły i momenty będą się wzajemnie znosić, gdyż wtedy tylko znajdzie się on w stanie równowagi. Warunkiem równowagi okrętu będzie więc, by zarówno suma sił działających na okręt jak i suma momentów statycznych tych sił były równe zero.

Jak wiemy z podrozdziału 2.1, na okręt znajdujący się w spoczynku na wodzie działają zawsze dwie równe sobie, lecz przeciwnie skierowane siły: siła ciężkości okrętu  $\vec{P}$ , skierowana pionowo w dół, oraz wypór  $\vec{D}$ , skierowany pionowo do góry. Ażeby okręt mógł pozostawać w stanie równowagi, obie te siły muszą nie tylko być sobie równe co do wielkości, lecz również nie mogą tworzyć pary sił, gdyż



Rys. 2.11



Rys. 2.12

wówczas nastąpiłoby wychylenie okrętu z zajmowanego położenia bez działania żadnej innej siły. Siły te muszą zatem działać wzdłuż jednej prostej, która oczywiście będzie prostopadła do powierzchni wody. Inaczej mówiąc: *okręt, na który nie działają żadne siły z zewnątrz, znajduje się wówczas w równowadze, gdy jego ciężar i wyporność są sobie równe, a środek ciężkości i środek wyporu leżą na jednej prostej prostopadłej do powierzchni wody* (rys. 2.11).

Jak jednak będzie się zachowywał okręt, gdy jakaś siła zewnętrzna, na przykład działanie wiatru, spowoduje jego wychylenie ze stanu równowagi?

Otóż po ustaniu działania siły wychylającej okręt może sam powrócić do położenia początkowego — wówczas *równowagę* jego nazwiemy *stałą*, bądź wychylać

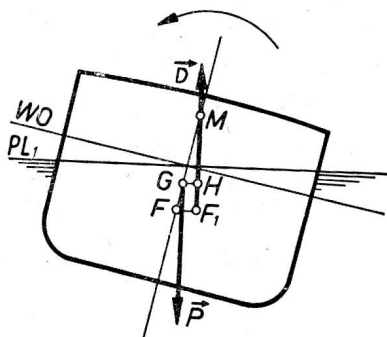
się nadal — i wówczas określimy jego *równowagę* jako *niestałą* lub *chwiejną*, bądź też pozostać w przyjętym, nowym położeniu, nie powracając do poprzedniego, ani nie wychylając się nadal — co określimy mianem *równowagi obojętnej*.

Zasadniczym warunkiem pływalności każdego obiektu jest, by po wychyleniu z położenia równowagi pod działaniem siły z zewnątrz (np. wiatru lub fali) mógł on sam powrócić do stanu poprzedniego — a więc, by równowaga jego była stała. Rozpatrzmy przeto nieco bliżej podane trzy rodzaje równowagi w odniesieniu do nawodnych jednostek pływających, by móc ustalić warunki równowagi stałej.

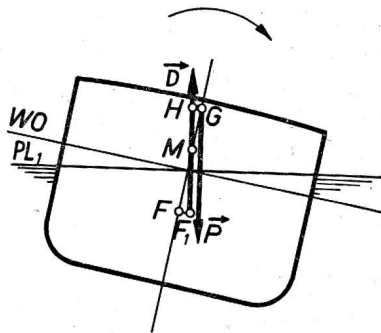
Jeżeli okręt wychylimy z położenia równowagi, wówczas oczywiście nie zmieni się ani jego ciężar — a więc również i jego wyporność, ani też położenie jego środka ciężkości  $G$  (o ile na okręcie nie ma ciężarów ruchomych). Ze względu jednak na zmianę kształtu podwodzia środek wyporu  $F$  przesunie się w nowe położenie  $F_1$ .

Ponieważ kierunki działania siły ciężkości  $\vec{P}$  i wyporu  $\vec{D}$  pozostają nadal prostopadłe do powierzchni wody, zatem przesunięcie środka wyporu  $F$ , jako punktu przyłożenia wyporu  $\vec{D}$  w nowe położenie  $F_1$  może spowodować powstanie pary sił:  $\vec{P}$  i  $\vec{D}$ , która to para sił może bądź to prostować okręt, bądź też wychylać go nadal.

Jeżeli środek ciężkości okrętu  $G$  leży poniżej środka wyporu  $F$ , to, jak widzimy z rysunku 2.12, powstająca przy przechyle para sił będzie przeciwdziałać wychyleniu i równowaga okrętu będzie równowagą stałą. Wypadek taki zachodzi jednak



Rys. 2.13



Rys. 2.14

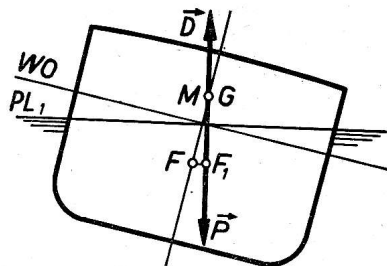
wyjątkowo na przykład dla jachtów z kilem (rys. 2.12), które z tego właśnie powodu nie przewracają się nawet w wypadku, gdy maszty ich prawie dotykają wody.

Środek ciężkości większości okrętów nawodnych znajduje się powyżej środka wyporu i wówczas równowaga okrętu może być:

- 1) stała, jeśli po ustaniu działania siły przechylającej moment pary sił: ciężkości  $\vec{P}$  i wyporu  $\vec{D}$ , który powstał przy przechyle, będzie przeciwdziałał przechyłowi (rys. 2.13) i powodował powrót okrętu do położenia początkowego;
- 2) niestała, gdy występujący moment będzie działał w kierunku dalszego wychylenia okrętu (rys. 2.14);

- 3) obojętna, gdy przechylenie nie spowoduje powstania momentu, tzn. gdy środek wyporu  $F_1$  i środek ciężkości  $G$  będą nadal leżeć na jednej prostej, prostopadłej do powierzchni wody (rys. 2.15).

Jak widzimy, położenie środka ciężkości  $G$  ponad środkiem wyporu  $F$  nie przesądza jeszcze rodzaju równowagi. O równowadze tej decydować będzie w tym wypadku położenie środka ciężkości  $G$  w stosunku do punktu przecięcia osi symetrii okrętu przez kierunek działania wyporu po wychyleniu, co wyraźnie widać z rysunków 2.13, 2.14 i 2.15. Punkt ten dla małych kątów przechyłu pokrywa się z metacentrum  $M$ , będącym, jak wzmiankowano uprzednio, środkiem krzywizny, po której przesuwa się środek wyporu.

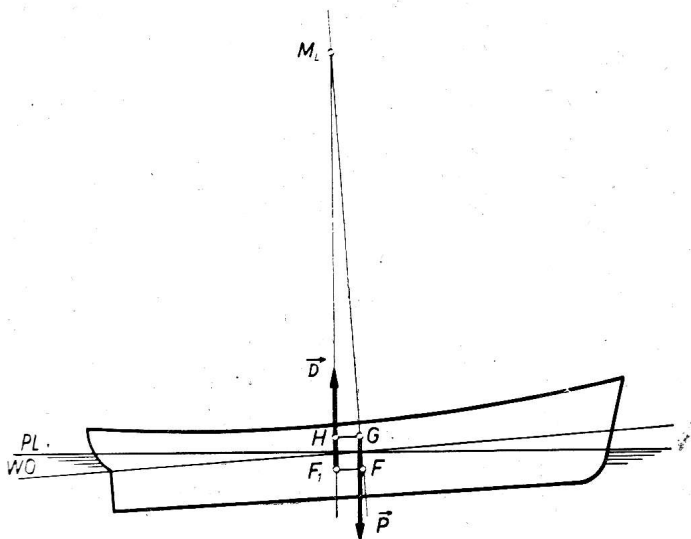


Rys. 2.15

Dla małych więc kątów przechyłu o równowadze okrętu nawodnego decydować będzie wzajemne położenie metacentrum  $M$  i środka ciężkości okrętu  $G$ . Jeżeli metacentrum  $M$  leży ponad środkiem ciężkości  $G$  (rys. 2.13), wówczas powstały przy wychyleniu moment pary sił  $\vec{D}$  i  $\vec{P}$  o ramieniu  $\overline{GH}$  jest momentem prostującym i równowaga okrętu jest stała. Gdy metacentrum  $M$  leży poniżej  $G$  (rys. 2.14), to przy przechyle powstaje moment przewracający i równowaga jest niestała. W wypadku pokrywania się metacentrum  $M$  ze środkiem ciężkości  $G$  (rys. 2.15) ramię pary sił jest równe zeru, moment nie występuje i równowaga jest obojętna.

Możemy zatem stwierdzić, iż: *równowaga okrętu jest stałą wówczas, gdy metacentrum poprzeczne  $M$  leży ponad jego środkiem ciężkości  $G$ .*

Podobne kryterium równowagi stałej zastosujemy do wzdłużnych wychyleń okrętu (rys. 2.16). Ze względu jednak na znacznie większy promień krzywizny, po



Rys. 2.16

której porusza się środek wyporu przy przegłębieniach, metacentrum wzdłużne  $M_L$  leży zawsze znacznie wyżej niż metacentrum poprzeczne  $M$ , wskutek czego równowaga okrętu przy przegłębieniach jest zawsze równowagą stałą.

Aby więc określić warunki równowagi okrętu w danym stanie załadowania, należy wyznaczyć:

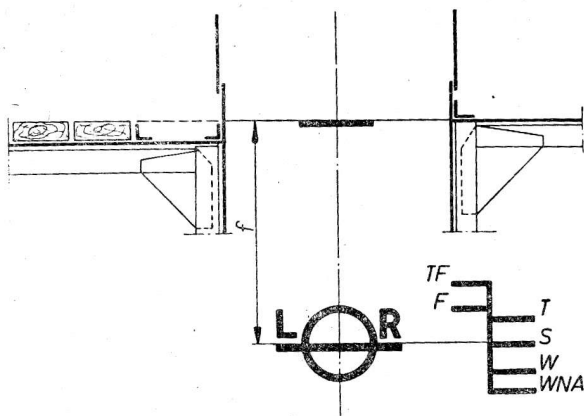
- 1) całkowity ciężar okrętu załadowanego i położenie jego środka ciężkości  $G$ ,
- 2) wyporność okrętu i położenie jego środka wyporu  $F$ ,
- 3) położenie metacentrum  $M$ .

## 2.4. OKREŚLANIE WIELKOŚCI OKRĘTÓW

Wielkość okrętów wojennych określamy zwykle przez podawanie ich *wyporności*, która — jak wiemy — musi się równać ich ciężarowi. Tak jednak określana wielkość okrętu nie jest pojęciem jednoznacznym, gdyż ciężar okrętu ulega stałym zmianom wskutek zużywania paliwa, wody, zapasów i amunicji. Okoliczność ta zmusza do bliższego określenia stanu ciężarów zmiennych, dla którego podajemy wyporność. Stan ten przyjmujemy taki, jaki będzie przypuszczalnie istniał w chwili gotowości do podjęcia walki. Tak określoną wyporność nazywamy *wypornością konstrukcyjną*.

Wielkość okrętów handlowych określić możemy kilkoma sposobami, a to podając ich ciężar, nośność, ładowność lub pojemność.

*Ciężarem* okrętu pustego nazywamy ciężar kadłuba całkowicie wyposażonego, a więc z maszynami i kotłami, całkowitym wyposażeniem pokładowym oraz wyposażeniem wnętrza, jednakże bez ładunku, zapasów, paliwa, załogi i ewentualnie pasażerów. Ciężar okrętu, jako miara siły ciężkości, podawany był uprzednio



Rys. 2.17

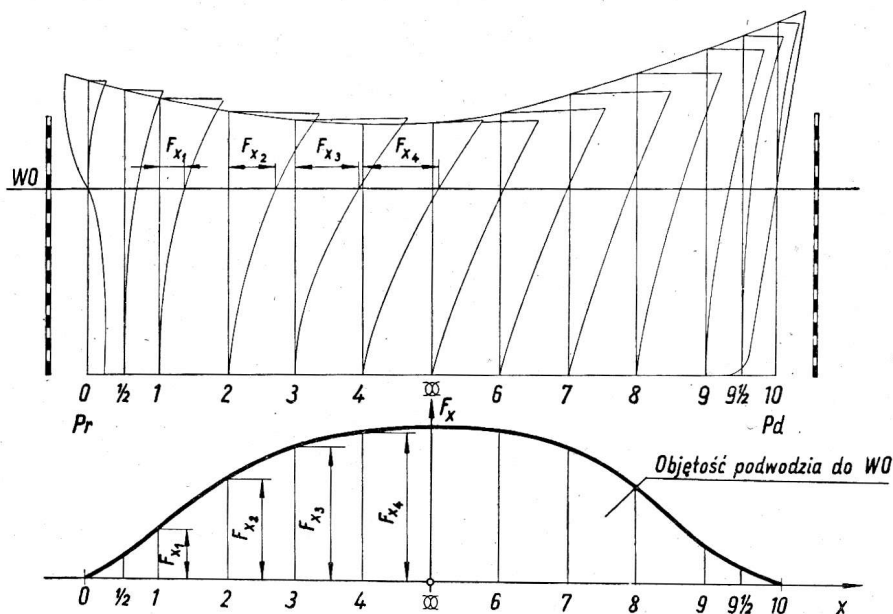
w tonach siły (1 T = 1000 kG); w związku z wprowadzeniem jednostek miar układu SI ciężar okrętu może być podawany w układzie jednostek technicznych jedynie w kilogramach siły (kG), przejściowo dopuszczonych do użycia jako legalne (patrz aneks).



wodnicowym  $WO$  (z uwzględnieniem różnic skal), otrzymamy wysokość środka wyporu

$$z_F = \frac{M_z}{V} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{S_i} F_{x_i} \Delta x}{\sum_{i=1}^n F_{x_i} \Delta x} \quad (3.41)$$

W celu umożliwienia obliczania objętości podwodzia i odciętej środka wyporu dla dowolnego zanurzenia okrętu sporządzamy tzw. skalę Bonjeana (rys. 3.24), na której na śladach kolejnych wręznic wykreślamy omówione uprzednio krzywe całkowite pola odpowiedniego przekroju wręznicowego. Na rysunku nano-



Rys. 3.24

simy także obrys okrętu w płaszczyźnie symetrii oraz skalę zanurzeń dziobu i rufy. Dla ułatwienia odczytów wykonujemy skalę Bonjeana z reguły na papierze milimetrycznym w skażonej skali, umożliwiającą dokładne odkładanie zanurzeń dziobu i rufy.

Skala Bonjeana uzupełniana jest zwykle krzywymi całkowitymi momentu statycznego przekrojów wręznicowych względem płaszczyzny podstawowej, jak to pokazano na rysunku 3.25, przedstawiającym skalę Bonjeana trawlera rybackiego. Sporządzona w ten sposób skala Bonjeana pozwala obliczać objętość podwodzia oraz odciętą i wysokość środka wyporu nie tylko okrętu zanurzającego się do dowolnej wodnicy (tzn. bez przegłębienia na dziób lub rufę), lecz także posiadającego dowolne przegłębienie, do czego też przede wszystkim ma służyć.

samym krzywe te stają się niezbędne zarówno dla konstruktora przy projektowaniu okrętu, jak i dla kierownictwa okrętu w okresie jego eksploatacji.

Krzywe hydrostatyczne sporządzane są dla konstrukcyjnego stanu pływania okrętu (podrozdz. 1.1) na podstawie linii teoretycznych kadłuba, z których bezpośrednio odczytywane są rzędne wodnic i wręznic, pozwalające na obliczanie wartości odciętych odpowiednich krzywych. Obliczenia krzywych wykonujemy przeważnie za pomocą jednej z metod numerycznych (podrozdz. 3.1.2) w sposób omówiony w podrozdziale 3.1.4. Wyliczone dla kolejnych zanurzeń okrętu wartości nanosimy jako odcięte na śladach odpowiednich przekrojów wodnicowych; łącząc wyznaczone punkty liniami ciągłymi wykreślamy poszczególne krzywe.

Pełny wykres krzywych hydrostatycznych obejmuje następujące krzywe:

- pól przekrojów wodnicowych  $F_z$ ,
- odciętych środków geometrycznych przekrojów wodnicowych  $x_S$ ,
- poprzecznych momentów bezwładności przekrojów wodnicowych  $I_B$ ,
- wzdlużnych momentów bezwładności przekrojów wodnicowych  $I_L$ ,
- objętości podwodzia  $V$ ,
- wyporności w wodzie morskiej  $D$ ,
- odciętych środka wyporu  $x_F$ ,
- wysokości środka wyporu  $z_F$ ,
- wysokości metacentrum poprzecznego  $z_M$ ,
- dużych promieni metacentrycznych  $r_L$ ,
- jednostkowych momentów przegłębiających  $M_m$ ,
- pełnotliwości podwodzia  $\delta$ ,
- pełnotliwości przekroju owrężowego  $\beta$ ,
- pełnotliwości przekrojów wodnicowych  $\alpha$ ,
- pełnotliwości wzdlużnych  $\phi$ ,
- pól powierzchni zwilżonej kadłuba  $\Omega$ .

Rozpatrzmy sposób obliczania i wykreślania poszczególnych krzywych oraz metody posługiwania się nimi w praktyce.

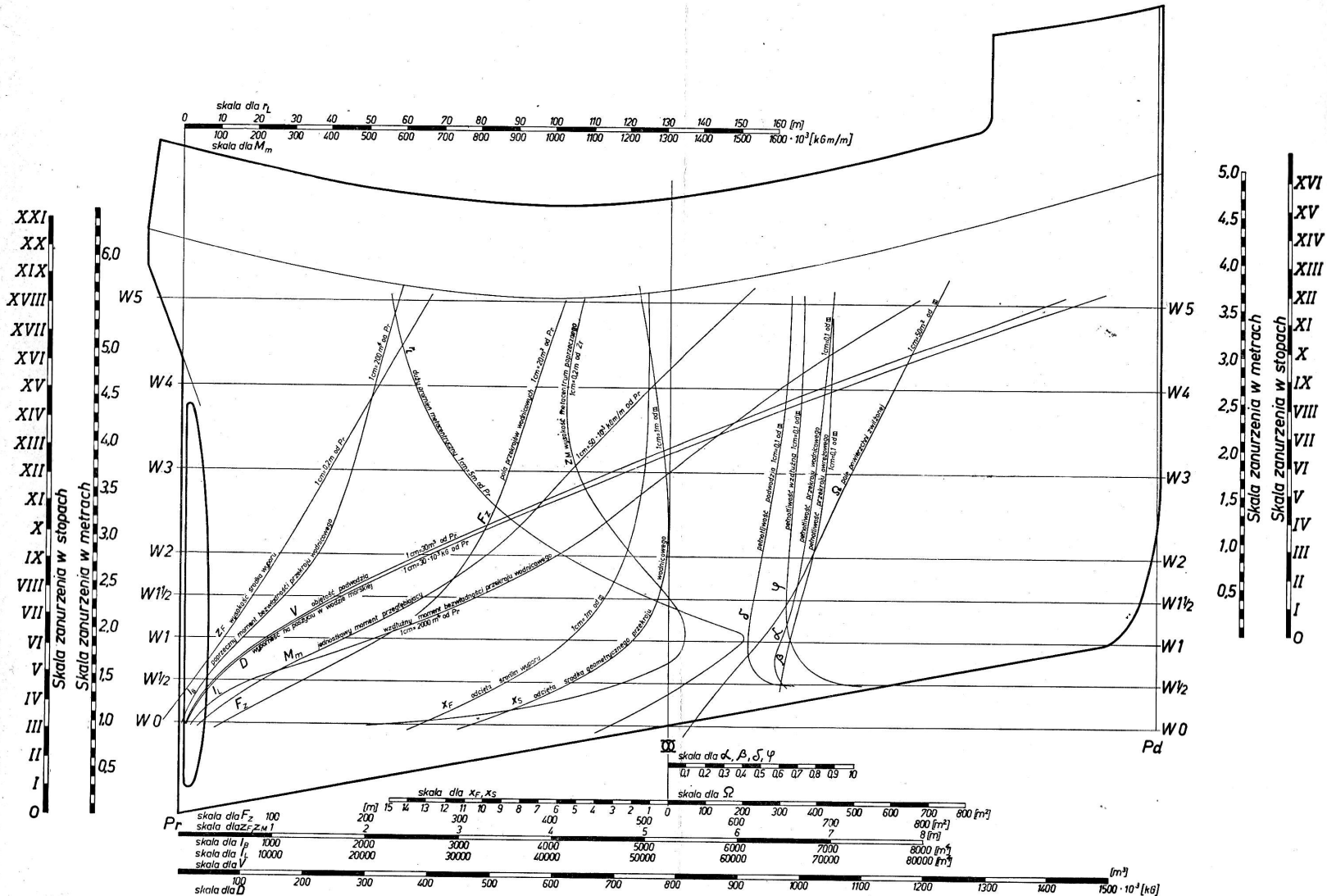
Krzywą pól przekrojów wodnicowych  $F_z$  (rys. 3.31) obliczamy stosując wzór (3.28) lub (3.35). Krzywą tą możemy się posłużyć do wyznaczania niewielkich zmian zanurzenia okrętu wywołanych dodawaniem lub zdejmowaniem ciężarów. Odpowiadające temu małe zmiany objętości podwodzia będą w przybliżeniu równe iloczynowi utworzonemu z pola przekroju wodnicowego  $F_z$ , do którego okręt był początkowo zanurzony, przez przyrost zanurzenia  $\Delta T$ . Dodatkowy ciężar  $p$  równy będzie przyrostowi wyporności, określonego wzorem

$$p = \Delta D = k\gamma\Delta V = k\gamma F_z \Delta T$$

gdzie:

$k = 1,005$  — współczynnik uwzględniający objętość poszycia kadłuba przyjmowaną na około 0,5% objętości podwodzia;

$\gamma = 1025$  — ciężar właściwy wody morskiej [ $\text{kg/m}^3$ ].



Rys. 3.41.

mu pancernik „Monarch” o zbliżonej wyporności i cechach:  $\overline{GM} = 0,73$  m i  $f = 4,27$  m przeszedł sztorm bez szkody. Wykresy ramion obu okrętów podane są na rysunku 4.15. Większa wolna burta pancernika „Monarch” spowodowała niemal podwojenie maksymalnego ramienia prostującego, zwiększenie stateczności dynamicznej (podrozdz. 4.11) i powiększenie zakresu krzywej ramion pomimo nieco mniejszej początkowej wysokości metacentrycznej.

Wypadek powyższy wykazał wyraźnie po raz pierwszy niedostateczność wnioskowania o stateczności wyłącznie na podstawie wysokości metacentrycznej i zmusił do badania zachowania się okrętu również przy dużych kątach przechyłu, czym zajmujemy się w podrozdziale 4.9.

### 4.3. STATECZNOŚĆ POZĄTKOWA WZDŁUŻNA

Jak zaznaczyliśmy w podrozdziale 4.1.3 zagadnienie stateczności wzdlużnej można ograniczyć do stateczności początkowej, której wskaźnikiem będzie wysokość metacentryczna wzdlużna  $\overline{GM}_L$ , wyznaczana z wzoru (3.49):

$$\overline{GM}_L = \overline{KF} + \overline{FM}_L - \overline{KG} = z_F + r_L - z_G$$

Dla posługiwania się tym wzorem musimy umieć obliczyć duży promień metacentryczny  $r_L = \overline{FM}_L$ .

#### 4.3.1. Duży promień metacentryczny

Załóżmy przechylenie okrętu wzdlużnie o mały kąt  $\psi$  (rys. 4.16) przyjmując, podobnie jak przy obliczaniu małego promienia metacentrycznego, że:

- 1) krzywa środków wyporu dla małych kątów  $\psi$  jest w przybliżeniu łukiem okręgu o promieniu  $r_L$ , którego środek leży w punkcie  $M_L$ ;
- 2) przesunięcie środka wyporu  $\overline{FF}_1$  spowodowane jest wynurzeniem się wycinka klinowego o objętości  $v$  na rufie i zanurzeniem się wycinka klinowego o takiej samej objętości  $v$  na dziobie (lub odwrotnie);
- 3) przy małych kątach przegłębienia  $\psi$  wycinki klinowe wynurzony i zanurzony są wycinkami bryły obrotowej powstałej przez obrót przekroju wodnicowego  $WO$  wokół osi poprzecznej, przechodzącej przez środek geometryczny  $S$  tegoż przekroju.

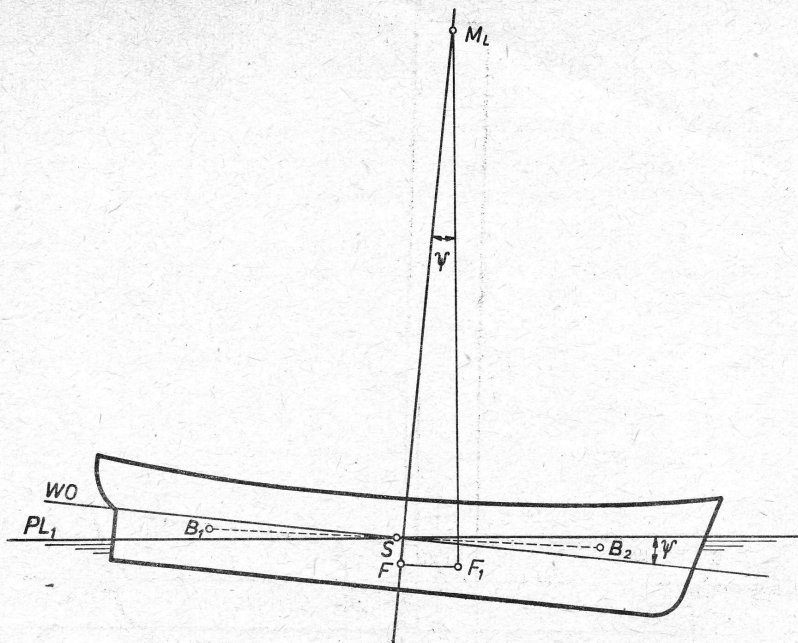
Na podstawie założeń 1 i 2 możemy napisać

$$\overline{FF}_1 \cong \overline{FF}_1 = \psi r_L = \psi \overline{FM}_L$$

$$\overline{FF}_1 = \frac{v}{V} \overline{B_1 B_2}$$

Przyrównując stronami powyższe wzory, otrzymamy

$$r_L = \overline{FM}_L = \frac{v \overline{B_1 B_2}}{V \psi}$$



Rys. 4.16

Można udowodnić, iż podobnie jak dla przechyłów poprzecznych

$$v \overline{B_1 B_2} = \psi I_L$$

skąd:

$$r_L = \overline{FM}_L = \frac{I_L}{V} \quad (4.7)$$

gdzie:

$I_L$  — wzdlużny moment bezwładności przekroju wodnicowego [m<sup>4</sup>],  
 $V$  — objętość podwodzia okrętu [m<sup>3</sup>].

Sposób obliczania obu wielkości występujących we wzorze (4.7) podano w podrozdziale 3.1.

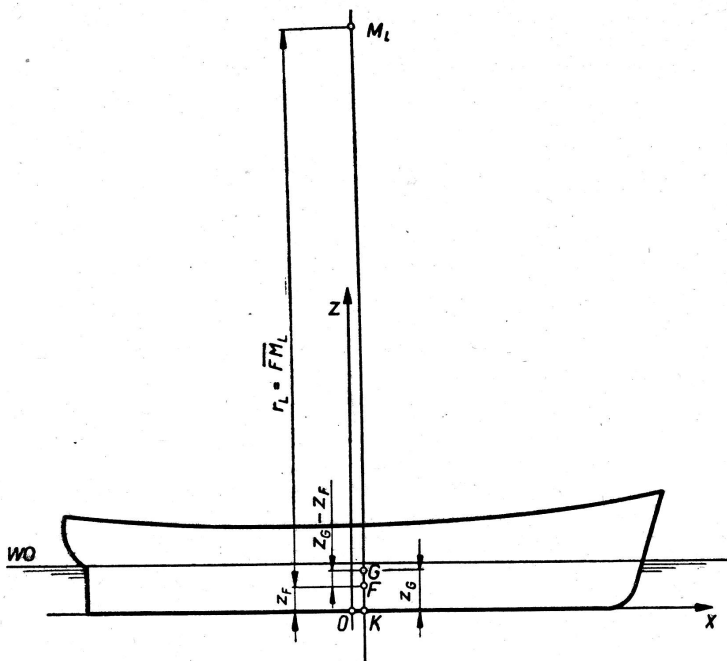
#### 4.3.2. Wysokość metacentryczna wzdlużna

Wysokość metacentryczną wzdlużną wyznaczamy z wzoru (3.49):

$$\overline{GM}_L = \overline{KF} + \overline{FM}_L - \overline{KG} = z_F + r_L - z_G = r_L - (z_G - z_F)$$

Jak widać wysokość ta, a więc i stateczność wzdlużna, zależą zarówno od kształtu kadłuba, czego wyrazem jest składnik  $r_L$ , jak też od odległości środka ciężkości  $G$  od środka wyporu  $F$ , o czym świadczy składnik  $(z_G - z_F)$ , (rys. 4.17).

O wielkości dużego promienia metacentrycznego  $r_L$  decyduje wzdlużny moment bezwładności przekroju wodnicowego, zależny w głównej mierze od odległości skraj-



Rys. 4.17

nych części tegoż przekroju od osi. Wzdłużny moment bezwładności  $I_L$  jest wobec tego zawsze wielokrotnie większy od poprzecznego momentu bezwładności  $I_B$ , co powoduje, że  $r_L$  jest wielkością rzędu długości okrętu i wynosi w przybliżeniu  $1 \div 1,5 L$ . Przy tak dużym promieniu metacentrycznym  $r_L$  wpływ położenia środka ciężkości na wzdłużną wysokość metacentryczną  $\overline{GM_L}$  jest praktycznie bez znaczenia, tak iż można przyjmować

$$\overline{GM_L} \approx \overline{FM_L}.$$

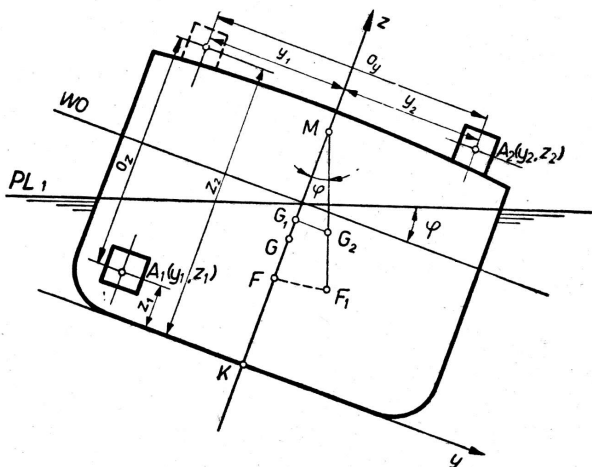
#### 4.4. WPŁYW PRZESUWANIA CIĘŻARÓW NA STATECZNOŚĆ POCZĄTKOWĄ

Jak wynika z poprzednich podrozdziałów, zmiany położenia środka ciężkości okrętu  $G$ , wywołane przesuwaniem ciężarów składowych (ładunku, zapasów itp.) wpływają poważnie na stateczność początkową okrętu; ulega przy tym również zmianie przebieg krzywej ramion, a więc stateczność przy większych kątach przechyłu, co omówimy w podrozdziale 4.12.

Przesunięcie ciężarów może także wywołać stały przechył lub przegłębienie okrętu. Przy dużych momentach przechylających kąt przechyłu wyznaczyć możemy poprawnie tylko za pomocą krzywej ramion lub krzywej momentów prostujących. W wypadku, gdy moment wymuszający jest niewielki wyznaczamy kąt przechyłu lub przegłębienia na drodze obliczeniowej.

#### 4.4.1. Przesuwanie ciężarów w płaszczyźnie poprzecznej

Założmy, iż na okręcie o ciężarze  $P$ , pływającym w stanie równowagi stałej bez przechyłu i przegłębienia, przesunięto ciężar  $p$  z punktu  $A_1$  do punktu  $A_2$  (rys. 4.18). Jako układ odniesienia przyjmijmy układ osi kadłuba, przechylający się wraz z okrętem.



Rys. 4.18

Wskutek przesunięcia ciężaru składowego środek ciężkości okrętu przesunie się z punktu  $G$  do  $G_2$ , przy czym stosownie do wzorów (2.21) i (2.23) przesunięcia składowe wyniosą:

$$\overline{GG_1} = z_{G_1} - z_G = \frac{P}{P} (z_2 - z_1) = \frac{P o_z}{P}$$

$$\overline{G_1 G_2} = y_{G_2} - y_{G_1} = \frac{P}{P} (y_2 - y_1) = \frac{P o_y}{P}$$

gdzie:

$o_z = z_2 - z_1$  — przesunięcie ciężaru pionowe;

$o_y = y_2 - y_1$  — przesunięcie ciężaru w poprzek okrętu.

Dla małych kątów przechyłu, dla których metacentrum  $M$  jest punktem stałym

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\overline{G_1 G_2}}{\overline{G_1 M}} = \frac{\overline{G_1 G_2}}{\overline{GM} - \overline{GG_1}}$$

Podstawiając w miejsce  $\overline{G_1 G_2}$  i  $\overline{GG_1}$  wyznaczone wartości otrzymamy

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P (y_2 - y_1)}{P \overline{GM} - P (z_2 - z_1)} = \frac{P o_y}{P \overline{GM} - P o_z} \quad (4.8)$$

Przy przesuwaniu ciężaru wyłącznie w poprzek okrętu

$$z_2 - z_1 = o_z = 0$$

i wówczas

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{p o_y}{P \overline{GM}} \quad (4.9)$$

zaś wysokość metacentryczna przechylonego okrętu

$$\overline{G_2 M} = \frac{\overline{GM}}{\cos \varphi} \quad (4.10)$$

Przy pionowym podnoszeniu lub opuszczaniu ciężaru

$$y_2 - y_1 = o_y = 0$$

wobec czego

$$\operatorname{tg} \varphi = 0 \quad \text{i} \quad \varphi = 0$$

W danym wypadku przechył nie wystąpi, zmieni się jednak początkowa wysokość metacentryczna, która wyniesie:

$$\overline{G_1 M} = \overline{GM} - \overline{GG_1} = \overline{GM} - \frac{P}{P} (z_2 - z_1) = \overline{GM} - \frac{p o_z}{P_1} \quad (4.11)$$

Przy przesunięciu ciężaru ku górze ( $z_2 - z_1 > 0$ ) wysokość metacentryczna zmaleje, przy przesunięciu w dół ( $z_2 - z_1 < 0$ ) — wzrośnie.

#### PRZYKŁAD 4.1

Na okręcie o wyporności  $D = 2000 \cdot 10^3$  kG i wysokości metacentrycznej  $\overline{GM} = 0,6$  m podniesiono z siłowni na pokład na wysokość  $o_z = 5,5$  m kocioł pomocniczy o ciężarze  $7 \cdot 10^3$  kG i przesunęto go w poprzek okrętu na prawą burtę o odległość  $o_y = 3,5$  m. Obliczyć nową wysokość metacentryczną i kąt przechyłu.

#### ROZWIĄZANIE

1. Nową wysokość metacentryczną wyliczymy według wzoru (4.11)

$$\overline{G_1 M} = \overline{GM} - \frac{p o_z}{P} = 0,6 - \frac{7 \cdot 10^3 \cdot 5,5}{2000 \cdot 10^3} = 0,6 - 0,02 = 0,58 \text{ m}$$

2. Przechył okrętu obliczymy według wzoru (4.8)

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{p o_y}{P \overline{GM} - p o_z} = \frac{7 \cdot 10^3 \cdot 3,5}{2000 \cdot 10^3 \cdot 0,6 - 7 \cdot 10^3 \cdot 5,5} = \frac{24,5}{1200 - 38,5} = 0,021$$

skąd

$$\varphi = 1^\circ 12'$$

#### PRZYKŁAD 4.2

Na statku pasażerskim o wyporności  $D = 3800 \cdot 10^3$  kG i wysokości metacentrycznej  $\overline{GM} = 0,6$  m pasażerowie znajdujący się w liczbie 160 osób na pokładzie słonecznym skupili się na prawej burcie przy mijaniu innego okrętu. Szerokość okrętu  $B = 11,6$  m, długość pokładu słonecznego  $l = 12$  m.



Obliczyć kąt przechyłu wywołany przejściem pasażerów na jedną burtę, przy założeniu, że ciężar jednego pasażera wynosi 75 kG, a na 1 m<sup>2</sup> powierzchni pokładu może się zmieścić 6 osób.

#### ROZWIĄZANIE

1. Ciężar wszystkich pasażerów

$$p = 160 \cdot 75 = 12\,000 \text{ kG}$$

2. Powierzchnia pokładu, na której skupili się pasażerowie

$$f = \frac{160}{6} = 26,6 \text{ m}^2$$

3. Szerokość powierzchni pokładu zajętego przez pasażerów

$$b = \frac{f}{l} = \frac{26,6}{12} = 2,22 \text{ m}$$

4. Przyjmijmy, że początkowo pasażerowie byli rozmieszczeni równomiernie na całej powierzchni pokładu. Ramię momentu przechylającego będzie wówczas równe odległości środka geometrycznego powierzchni zajętej przez pasażerów od płaszczyzny symetrii okrętu:

$$o_y = \frac{B}{2} - \frac{b}{2} = \frac{11,6}{2} - \frac{2,22}{2} = 5,8 - 1,11 = 4,69 \text{ m}$$

5. Przechył okrętu obliczymy według wzoru (4.9)

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{p o_y}{P G M} = \frac{12 \cdot 10^3 \cdot 4,69}{3800 \cdot 10^3 \cdot 0,6} = 0,0247$$

skąd

$$\varphi = 1^\circ 25'$$

#### 4.4.2. Przesuwanie ciężarów w płaszczyźnie wzdłużnej

Kąt  $\psi$  przegłębienia okrętu wywołanego przesunięciem ciężaru  $p$  wyliczamy w podobny sposób jak kąt przechyłu  $\varphi$ .

Przesuniemy na okręcie o ciężarze  $P$ , pływającym w stanie równowagi stałej bez przechyłu i przegłębienia, ciężar składowy  $p$  z punktu  $A_1$  do punktu  $A_2$  (rys. 4.19). Wywołane tym przesunięcia składowe środka ciężkości okrętu możemy wyznaczyć z wzorów (2.20) i (2.23):

$$\overline{GG_1} = z_{G_1} - z_G = \frac{p}{P} (z_2 - z_1) = \frac{p o_z}{P}$$

$$\overline{G_1 G_2} = x_{G_2} - x_{G_1} = \frac{p}{P} (x_2 - x_1) = \frac{p o_x}{P}$$

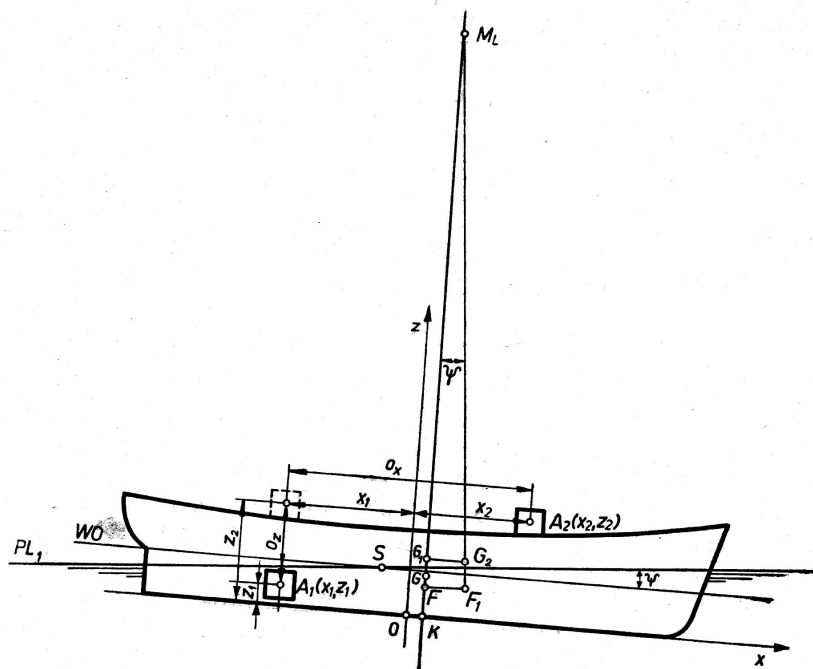
gdzie:

$o_z = z_2 - z_1$  — przesunięcie ciężaru pionowe;

$o_x = x_2 - x_1$  — przesunięcie ciężaru wzdłuż okrętu.

Tangens kąta przegłębienia okrętu wyrazi się wzorem

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\overline{G_1 G_2}}{\overline{G_1 M_L}} = \frac{\overline{G_1 G_2}}{\overline{G M_L} - \overline{GG_1}} = \frac{p (x_2 - x_1)}{P \overline{G M_L} - p (z_2 - z_1)} = \frac{p o_x}{P \overline{G M_L} - p o_z} \quad (4.12)$$



Rys. 4.19

Ze względu na stosunkowo dużą wartość  $P \overline{GM}_L$  można przy małych ciężarach  $p$  nie uwzględniać iloczynu  $po_x$ . Wówczas

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{p (x_2 - x_1)}{P \overline{GM}_L} = \frac{po_x}{P \overline{GM}_L} \quad (4.13)$$

Znając kąt  $\psi$  możemy wyliczyć przegłębienie okrętu  $t$ , którą to nazwą oznaczamy różnicę zanurzeń dziobu i rufy:

$$t = T_d - T_r$$

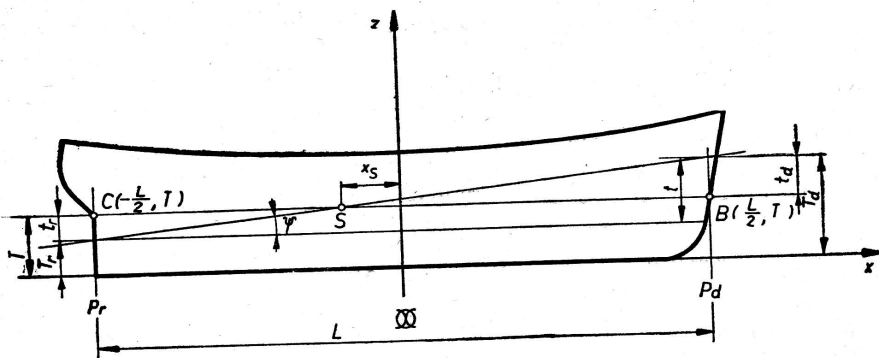
Jak widać z rysunku 4.20

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{t}{L}$$

skąd

$$t = L \operatorname{tg} \psi = L \frac{p (x_2 - x_1)}{P \overline{GM}_L} = L \frac{po_x}{P \overline{GM}_L} \quad (4.14)$$

Przy przesuwaniu ciężaru z rufy na dziób będzie  $x_2 - x_1 > 0$ , a zatem i  $t > 0$ ; wywołane takim przesunięciem zwiększenie zanurzenia dziobu a wynurzenie rufy, czyli przegłębienie na dziób określimy jako przegłębienie dodatnie. Przegłębienie ujemne oznacza wzrost zanurzenia rufy i wynurzenie dziobu, czyli przegłębienie na rufę.



Rys. 4.20

Zmiany zanurzeń dziobu i rufy na ogół nie są sobie równe, gdyż oś obrotu, przechodząca przez środek geometryczny początkowego przekroju wodnicowego, do którego okręt się zanurza, nie leży przeważnie w płaszczyźnie owręza. Przyrosty zanurzeń możemy określić według rysunku 4.20:

$$t_d = \overline{SB} \operatorname{tg} \psi = \left( \frac{L}{2} - x_s \right) \operatorname{tg} \psi = \left( \frac{L}{2} - x_s \right) \frac{t}{L} \quad (4.15a)$$

$$t_r = \overline{SC} \operatorname{tg} \psi = \left( -\frac{L}{2} - x_s \right) \operatorname{tg} \psi = \left( -\frac{L}{2} - x_s \right) \frac{t}{L} \quad (4.15b)$$

gdzie:

$x_s$  — odcięta środka geometrycznego przekroju wodnicowego [m];

$\frac{L}{2}, -\frac{L}{2}$  — odcięte punktów B i C [m].

Nowe zanurzenia określimy wzorami:

$$T_{d1} = T_d + t_d \quad (4.16a)$$

$$T_{r1} = T_r + t_r \quad (4.16b)$$

#### PRZYKŁAD 4.3

Kapitan okrętu postanowił przejść ponad mielizną, nad którą głębokość wody wynosi 2,60 m. Zanurzenie okrętu: dziobu  $T_d = 2,05$  m, rufy  $T_r = 2,70$  m, długość okrętu  $L = 58$  m, wyporność  $D = 620 \cdot 10^3$  kG, wzdłużna wysokość metacentryczna  $\overline{GM}_L = 94$  m, odcięta środka geometrycznego przekroju wodnicowego  $x_s = -1,10$  m. Ile oleju napędowego należy przepompować ze zbiorników rufowych do dziobowych, by w czasie przejścia mieć co najmniej 20 cm wody pod stępką, jeżeli odległość między środkami geometrycznymi zbiorników wynosi 26 m?

#### ROZWIĄZANIE

1. Nowe zanurzenie rufy powinno wynosić

$$T_{r1} = 2,60 - 0,20 = 2,40 \text{ m}$$

2. Przyrost zanurzenia rufy musi więc być ujemny

$$t_r = T_{r1} - T_r = 2,40 - 2,70 = -0,30 \text{ m}$$

3. Konieczny dla otrzymania takiego wynurzenia rufy kąt przegłębienia obliczymy za pomocą wzoru (4.15b)

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{t_r}{-\frac{L}{2} - x_S} = \frac{-0,30}{\left[-\frac{58}{2} - (-1,1)\right]} = \frac{-0,30}{-27,9} = 0,0108$$

4. Szukaną ilość oleju wyznaczymy z wzoru (4.13)

$$p = \operatorname{tg} \psi \frac{\overline{P G M_L}}{\rho_s} = 0,0108 \cdot \frac{620 \cdot 10^3 \cdot 94}{26} = 24,2 \cdot 10^3 \text{ kG}$$

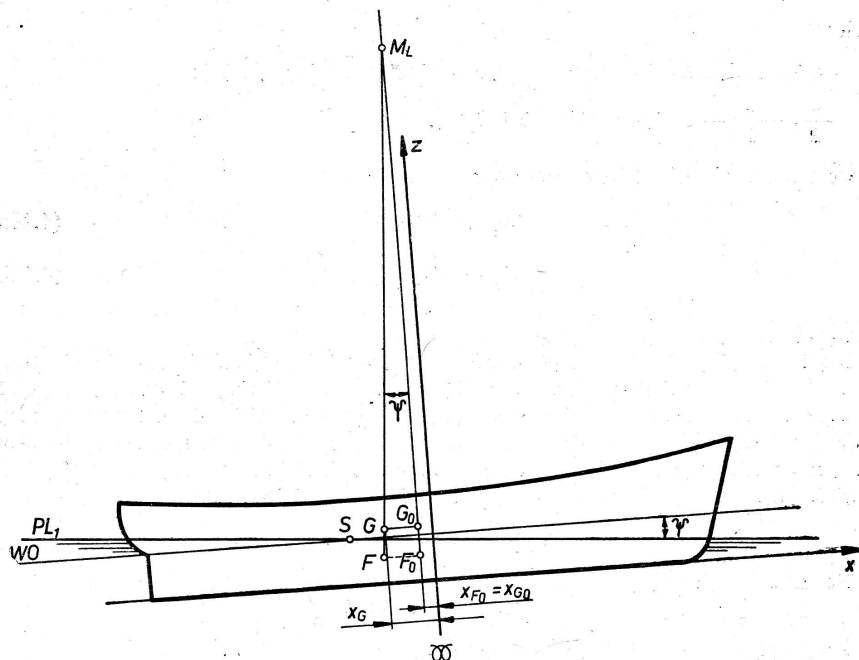
5. Przyrost zanurzenia dziobu wyniesie według wzoru (4.15a)

$$t_d = \left( \frac{L}{2} - x_S \right) \operatorname{tg} \psi = \left[ \frac{58}{2} - (-1,1) \right] \cdot 0,0108 = 0,325 \text{ m}$$

- ## 6. Stąd nowe zanurzenie dziobu

$$T_{d_i} = T_d + t_d = 2,05 + 0,325 = 2,375 \text{ m}$$

Po zakończeniu budowy okrętu okazuje się często, że jego środek ciężkości i środek wyporu okrętu nieprzeglębionego nie leżą w jednakowej odległości od płaszczyzny owręża. Po zwodowaniu okrętu wystąpi wówczas przegłębienie, spowodowane jak gdyby przesunięciem ciężaru okrętu  $P$  z punktu  $G_o$ , w którym powinien się znajdować środek ciężkości, do punktu  $G$ , w którym znajduje się on rzeczywiście (rys. 4.21).



**Rys. 4.21**

Podstawiając odpowiednio:

$$p = P; \quad x_1 = x_{G_o} = x_{F_o}, \quad x_2 = x_G$$

gdzie  $x_{F_o}$  – odcięta środka wyporu okrętu nieprzeglębionego, otrzymamy z wzoru (4.14) przegłębienie

$$t = L \frac{x_G - x_{F_o}}{GM_L} \quad (4.17)$$

z wzoru (4.13) kąt przegłębienia

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{x_G - x_{F_o}}{GM_L} \quad (4.18)$$

zaś z wzorów (4.15a) i 4.15b) zmiany zanurzenia dziubu i rufy:

$$t_d = \left( \frac{L}{2} - x_s \right) \frac{x_G - x_{F_o}}{GM_L} \quad (4.19a)$$

$$t_r = \left( -\frac{L}{2} - x_s \right) \frac{x_G - x_{F_o}}{GM_L} \quad (4.19b)$$

#### PRZYKŁAD 4.4

Obliczona dla stanu przed wodowaniem odcięta środka ciężkości kadłuba częściowo wyposażonego wynosi  $x_G = 2,5$  m. Dla obliczonego ciężaru kadłuba odczytano z arkusza krzywych hydrostatycznych: odcięta środka wyporu  $x_{F_o} = 1,90$  m, wzdłużną wysokość metacentryczną  $GM_L = 191,5$  m, zanurzenie  $T = 2,80$  m. Długość przekroju wodnicowego dla danego zanurzenia wynosi  $L_w = 140,5$  m, a odcięta środka geometrycznego tegoż przekroju  $x_s = 1,05$  m. Obliczyć zanurzenie dziubu i rufy w czasie wodowania.

#### ROZWIĄZANIE

Zmiany zanurzenia dziubu i rufy w stosunku do pływania bez przegłębienia obliczymy za pomocą wzorów (4.19a) i (4.19b)

$$t_d = \left( \frac{L}{2} - x_s \right) \frac{x_G - x_{F_o}}{GM_L} = \left( \frac{140,5}{2} - 1,05 \right) \cdot \frac{(2,5 - 1,9)}{191,5} = 0,216 \text{ m}$$

$$t_r = \left( -\frac{L}{2} - x_s \right) \frac{x_G - x_{F_o}}{GM_L} = \left( -\frac{140,5}{2} - 1,05 \right) \cdot \frac{(2,5 - 1,9)}{191,5} = 0,223 \text{ m}$$

Zanurzenie po zwodowaniu według wzorów (4.16a) i (4.16b)

$$T_d = T + t_d = 2,80 + 0,216 = 3,016 \text{ m}$$

$$T_r = T + t_r = 2,80 - 0,223 = 2,577 \text{ m}$$

#### 4.4.3. Jednostkowy moment przegłębający

Moment przegłębający, wywołany wzdłużnym przesunięciem ciężaru  $p$  na odległość  $o_x = x_2 - x_1$  wyrazi się wzorem

$$M_{w\psi} = p (x_2 - x_1)$$

Podstawiając powyższe wyrażenie do wzoru (4.14) otrzymamy:

$$M_{w\psi} = t \frac{P \overline{GM}_L}{L} \quad (4.20)$$

Moment wywołujący przegłębienie  $t = 1$  m, zwany *jednostkowym momentem przegłębającym* wyrazi się wówczas wzorem

$$M_m = 1 \cdot \frac{P \overline{GM}_L}{L} \text{ [kGm/m]} \quad (4.21)$$

Podstawiając powyższe do równania (4.20) otrzymamy wzór

$$t = \frac{M_{w\psi}}{M_m} \quad (4.22)$$

pozwalający określić przegłębienie  $t$  wywołane momentem przegłębającym  $\vec{M}_{w\psi}$ .  
Wzór (4.21) można uprościć podstawiając:

$$\overline{GM}_L \cong \overline{FM}_L; \quad \overline{FM}_L = \frac{I_L}{V}; \quad P = \gamma V$$

wówczas

$$M_m = \gamma \frac{I_L}{L} \quad (4.23)$$

Wartości jednostkowego momentu przegłębającego, wyliczone z wzoru (4.23) dla kolejnych zanurzeń, nanosimy na arkusz krzywych hydrostatycznych (podrozdz. 3.2).

Znajomość jednostkowego momentu przegłębającego ma duże znaczenie dla kierownictwa okrętu, pozwala bowiem w prosty sposób ustalić wielkość ciężaru i odległość, na jaką należy go wzdłużnie przenieść, by zlikwidować istniejące przegłębienie lub wywołać je w razie potrzeby.

#### PRZYKŁAD 4.5

Okręt o parametrach:  $L = 80$  m,  $B = 14$  m,  $D = 3600 \cdot 10^3$  kG,  $T_d = 3,80$  m,  $T_r = 4,40$  m pływa w wodzie morskiej ( $\gamma = 1025$  kG/m<sup>3</sup>). Dla danej wyporności wzdłużny moment bezwładności przekroju wodnicowego  $I_L = 380\,000$  m<sup>4</sup> a odcięta jego środka geometrycznego  $x_S = -2,25$  m. Obliczyć ile wody należy przepompować ze skrajnika rufowego do dziobowego dla usunięcia przegłębienia i jakie będzie wówczas zanurzenie okrętu, jeśli środek geometryczny skrajnika rufowego leży 4,80 m przed  $Pr$ , a skrajnika dziobowego 5,40 m za  $Pd$ .

#### ROZWIĄZANIE

1. Dla usunięcia istniejącego przegłębienia okrętu

$$t = T_d - T_r = 3,80 - 4,40 = -0,60 \text{ m}$$

należy wywołać przegłębienie o znaku przeciwnym  $t = 0,60$  m.

2. Odcięte środków geometrycznych skrajników:

$$x_1 = x_r = -\frac{L}{2} + 4,80 = -\frac{80}{2} + 4,80 = -35,20 \text{ m}$$

$$x_2 = x_d = \frac{L}{2} - 5,40 = \frac{80}{2} - 5,40 = 34,60 \text{ m}$$

3. Moment przegłębiający wywołany przepompowaniem wody

$$M_{W\Psi} = p(x_d - x_r) = p[34,60 - (-35,20)] = 69,80 p$$

4. Jednostkowy moment przegłębiający według wzoru (4.23)

$$M_m = \gamma \frac{I_L}{L} = 1025 \cdot \frac{380\,000}{80} = 4869 \cdot 10^3 \text{ kGm/m}$$

5. Zgodnie z wzorem (4.22)

$$t = \frac{M_{W\Psi}}{M_m} = \frac{69,80 p}{M_m}$$

skąd ilość wody jaką należy przepompować

$$p = \frac{t M_m}{69,80} = \frac{0,60 \cdot 4869 \cdot 10^3}{69,80} = 41,85 \cdot 10^3 \text{ kG}$$

6. Przyrosty zanurzeń dziubu i rufy obliczymy według wzorów (4.15a) i (4.15b):

$$t_d = \left( \frac{L}{2} - x_s \right) \frac{t}{L} = [40 - (-2,05)] \cdot \frac{0,60}{80} = 42,05 \cdot \frac{0,60}{80} = 0,32 \text{ m}$$

$$t_r = \left( -\frac{L}{2} - x_s \right) \frac{t}{L} = [-40 - (-2,05)] \cdot \frac{0,60}{80} = -37,95 \cdot \frac{0,60}{80} = -0,28 \text{ m}$$

7. Zanurzenie okrętu po przepompowaniu wody według wzorów (4.16a) i (4.16b)

$$T = T_d + t_d = 3,80 + 0,32 = 4,12 \text{ m}$$

$$T = T_r + t_r = 4,40 - 0,28 = 4,12 \text{ m}$$

#### PRZYKŁAD 4.6

Okręt o parametrach:  $L = 89,50 \text{ m}$ ,  $T = 5,60$ ,  $D = 4200 \cdot 10^3 \text{ kG}$  pływa w wodzie morskiej ( $\gamma = 1025 \text{ kG/m}^3$ ). Dla danej wyporności wzdłużny moment bezwładności przekroju wodnicowego  $I_L = 440\,000 \text{ m}^4$ , a odcięta jego środka geometrycznego  $x_s = -2,05 \text{ m}$ . Obliczyć ile wody należy przepompować ze skrajnika dziobowego do rufowego dla uzyskania zanurzenia rufy  $T_r = 6,00 \text{ m}$  i jakie będzie wówczas zanurzenie dziubu  $T_d$ , jeśli środek geometryczny skrajnika rufowego leży  $5,20 \text{ m}$  przed  $Pr$ , a dziobowego  $6,30 \text{ m}$  za  $Pd$ .

#### ROZWIĄZANIE

1. Przegłębienie okrętu  $t$  obliczymy z wzoru (4.15b)

$$t_r = \left( -\frac{L}{2} - x_s \right) \frac{t}{L}$$

skąd dla

$$t_r = T_r - T = 6,00 - 5,60 = 0,40 \text{ m}$$

$$t = \frac{t_r L}{-\frac{L}{2} - x_s} = \frac{0,40 \cdot 89,50}{\left[ -\frac{89,50}{2} - (-2,05) \right]} = \frac{0,40 \cdot 89,50}{-42,70} = -0,84 \text{ m}$$

2. Zmianę zanurzenia dziubu obliczymy z wzoru (4.15a)

$$t_d = \left( \frac{L}{2} - x_s \right) \frac{t}{L} = \left[ \frac{89,50}{2} - (-2,05) \right] \cdot \frac{-0,84}{89,50} = 46,80 \cdot \frac{-0,84}{89,50} = -0,44 \text{ m}$$

3. Stąd nowe zanurzenie dziubu

$$T_d = T + t_d = 5,60 + (-0,44) = 5,16 \text{ m}$$

4. Jednostkowy moment przegłębiający według wzoru (4.23)

$$M_m = \gamma \frac{I_L}{L} = 1025 \cdot \frac{440\,000}{89,50} = 5039 \cdot 10^3 \text{ kGm/m}$$

5. Odcięte środków geometrycznych skrajników

$$x_2 = x_r = -\frac{L}{2} + 5,20 = -\frac{89,50}{2} + 5,20 = -39,55 \text{ m}$$

$$x_1 = x_d = \frac{L}{2} - 6,30 = \frac{89,50}{2} - 6,30 = 38,45 \text{ m}$$

6. Zgodnie z wzorem (4.22)

$$t = \frac{M_{W\psi}}{M_m} = \frac{p(x_r - x_d)}{M_m}$$

skąd ilość wody, jaką należy przepompować

$$p = \frac{t M_m}{x_r - x_d} = \frac{-0,84 \cdot 5039 \cdot 10^3}{-39,55 - 38,45} = \frac{-0,84 \cdot 5039 \cdot 10^3}{-78} = 54,25 \cdot 10^3 \text{ kG}$$

#### 4.5. WPLYW PRZYJMOWANIA LUB ZDEJMOWANIA CIĘŻARÓW NA STATECZNOŚĆ POCZĄTKOWĄ

Przyjęcie na okręt ładunku lub zapasów, rozładowanie okrętu lub zużycie zapasów pociąga za sobą zmiany ciężaru  $P$ , a więc i wyporności okrętu  $D$ , zanurzenia  $T$ , położenia środka wyporu  $F$ , metacentrum  $M$  oraz  $M_L$  i przeważnie także położenia środka ciężkości okrętu  $G$ . Wynikiem tego będą zmiany stateczności poprzecznej i wzdłużnej i ewentualne wystąpienie przechyłu i przegłębienia okrętu. Przyjmowanie lub zdejmowanie dużych ciężarów powoduje znaczne zmiany zanurzenia; dla określenia tych zmian, wyznaczenia nowej wysokości metacentrycznej i kątów przechyłu musimy posługiwać się arkuszem krzywych hydrostatycznych i krzywymi ramion prostujących (podrozdz. 4.12). Przy małych zmianach ciężarowych możemy wyznaczyć zmiany stateczności oraz kąty przechyłu i przegłębienia na drodze rachunkowej.

##### 4.5.1. Przyjmowanie lub zdejmowanie ciężarów, nie wywołujące przechyłu i przegłębienia

Przy małych zmianach ciężarowych możemy przyjąć, że dla wywołanych niewielkich zmian zanurzenia wielkość, kształt i położenie środka geometrycznego przekroju wodnicowego, do którego okręt się zanurza, pozostają niezmienione. Jeśli środek geometryczny tego przekroju i środek ciężkości ciężaru przyjętego lub zdjętego leżą na jednej prostej pionowej, to przyjęcie lub zdjęcie ciężaru nie wywoła przechyłu ani przegłębienia.

Określmy dla takiego wypadku zmianę zanurzenia i stateczności początkowej wywołaną przyjęciem małego ciężaru  $p$ , którego środek ciężkości znalazł się w punkcie  $A(x_s, 0, z)$  (rys. 4.22). Oznaczmy środek wyporu, środek ciężkości okrętu i metacentrum przed przyjęciem ciężaru literami  $F$ ,  $G$  i  $M$ , zaś po przyjęciu ciężaru



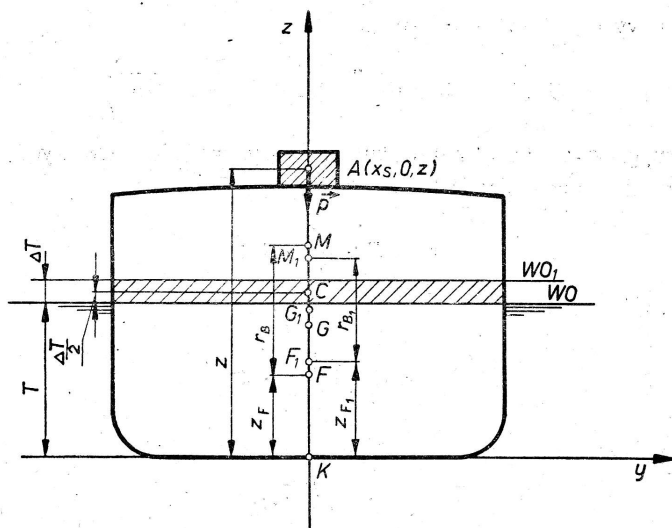
— literami  $F_1$ ,  $G_1$  i  $M_1$ . Literą  $C$  oznaczmy środek geometryczny warstwy dodatkowo zanurzonego kadłuba, zaś symbolem  $F_z$  pole przekroju wodnicowego, do którego zanurza się okręt.

Zmianę zanurzenia okrętu wyznaczymy z wzoru

$$p = \Delta D = \gamma F_z \Delta T$$

skąd

$$\Delta T = \frac{p}{\gamma F_z} \quad (4.24)$$



Rys. 4.22

Zmiany położenia środka wyporu i środka ciężkości okrętu określimy korzystając z wzoru (2.8):

$$\overline{FF_1} = \frac{v}{V+v} \overline{FC} = \frac{p}{P+p} \left( T + \frac{\Delta T}{2} - z_F \right)$$

$$\overline{GG_1} = \frac{p}{P+p} \overline{GA} = \frac{p}{P+p} (z - z_G)$$

Zakładając, że moment bezwładności przekroju wodnicowego  $I_B$  nie uległ zmianie, obliczmy nowy promień metacentryczny

$$r_{B_1} = \overline{F_1 M_1} = \frac{I_B}{V+v} = \frac{V}{V+v} \frac{I_B}{V} = \frac{V}{V+v} \overline{FM} = \frac{P}{P+p} r_B$$

Przekształćmy wzór powyższy dodając i odejmując  $r_B$

$$r_{B_1} = \frac{P}{P+p} r_B + r_B - r_B \frac{P+p}{P+p} = r_B - \frac{p}{P+p} r_B$$

Nową wysokość metacentryczną określimy wzorem

$$\overline{G_1 M_1} = z_{F_1} + r_{B_1} - z_{G_1} = z_F + \overline{FF_1} + r_B - \frac{p}{P+p} r_B - (z_G + \overline{GG_1})$$

Po podstawieniu wzorów na  $\overline{FF_1}$  i  $\overline{GG_1}$ , otrzymamy

$$\overline{G_1 M_1} = z_F + r_B - z_G + \frac{p}{P+p} \left( T + \frac{\Delta T}{2} - z_F - r_B - z + z_G \right)$$

A ponieważ

$$z_F + r_B - z_G = \overline{GM}$$

zatem nowa wysokość metacentryczna

$$\overline{G_1 M_1} = \overline{GM} + \frac{p}{P+p} \left( T + \frac{\Delta T}{2} - z - \overline{GM} \right) \quad (4.25)$$

Rozpatrując równanie (4.25) widzimy, iż wysokość metacentryczna po przyjęciu ładunku nie zmienia się, jeśli

$$z = T + \frac{\Delta T}{2} - \overline{GM}$$

wzrośnie, jeśli

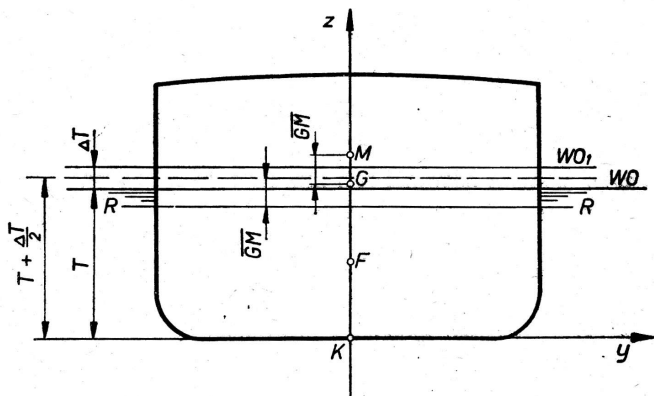
$$z < T + \frac{\Delta T}{2} - \overline{GM}$$

zmaleje zaś, gdy

$$z > T + \frac{\Delta T}{2} - \overline{GM}$$

Jeśli w odległości

$$z = T + \frac{\Delta T}{2} - \overline{GM}$$



Rys. 4.23

od płaszczyzny podstawowej i równoległe do niej poprowadzimy płaszczyznę  $RR$  (rys. 4.23), zwaną *płaszczyzną obojętną*, to jak wynika z wzoru (4.25) przyjęcie ciężaru poniżej tej płaszczyzny spowoduje wzrost wysokości metacentrycznej  $\overline{GM}$ , przyjęcie ciężaru powyżej niej — zmniejszenie się  $\overline{GM}$ . Wzór (4.25) można stosować także przy niewielkim przegłębieniu okrętu, podstawiając w miejsce zanurzenia  $T$  zanurzenie średnie  $T_{sr}$ .

Wzdłużną wysokość metacentryczną po przyjęciu ciężaru możemy przez analogię określić wzorem:

$$\overline{G_1 M_{L_1}} = \overline{GM}_L + \frac{p}{P+p} \left( T + \frac{\Delta T}{2} - z - \overline{GM}_L \right)$$

Ponieważ różnica wielkości  $\left( T + \frac{\Delta T}{2} \right)$  i  $z$  będzie bardzo mała w porównaniu z wielkością  $\overline{GM}_L$ , zatem można ją pominąć bez większego błędu i wówczas:

$$\overline{G_1 M_{L_1}} = \overline{GM}_L - \frac{p}{P+p} \overline{GM}_L$$

a po sprowadzeniu do wspólnego mianownika

$$\overline{G_1 M_{L_1}} = \frac{P}{P+p} \overline{GM}_L \quad (4.26)$$

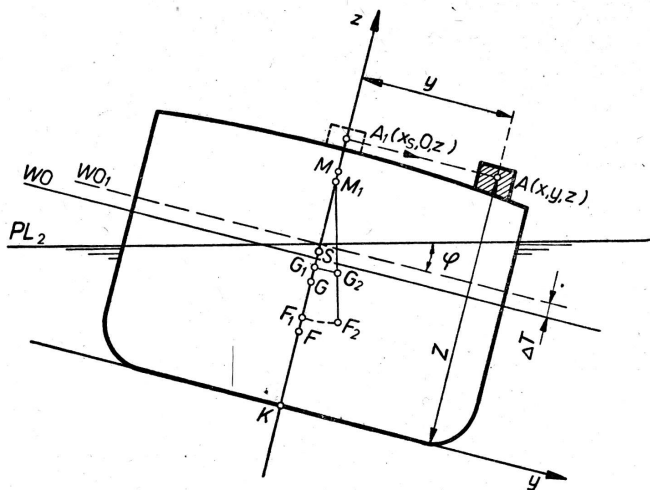
Zdejmowanie ciężarów traktujemy jako dodawanie ciężarów ujemnych, podstawiając do podanych wzorów w miejsce  $p$  wartość  $-p$ , i zmieniając na ujemny znak przy  $\Delta T$  (przy wynurzeniu okrętu  $\Delta T$  będzie ujemne). Zdjęcie ciężaru z miejsca poniżej płaszczyzny obojętnej powoduje zmniejszenie się wysokości metacentrycznej  $\overline{GM}$ , zdjęcie ciężaru z miejsca powyżej tej płaszczyzny — wzrost  $\overline{GM}$ .

#### 4.5.2. Przyjmowanie lub zdejmowanie ciężarów w dowolnym miejscu

Dodanie ciężaru w dowolnym miejscu wywoła takie same skutki jak umieszczenie tegoż ciężaru początkowo pionowo ponad (lub pod) środkiem geometrycznym przekroju wodnicowego, do którego okręt się zanurza, co wywoła wzrost zanurzenia i zmiany  $\overline{GM}$  i  $\overline{GM}_L$ , a następnie poziome przesunięcie ciężaru do zajmowanego rzeczywiście miejsca, co pociągnie za sobą wystąpienie przechyłu lub przegłębienia.

Przyjmijmy, że okręt o wyporności  $D = P$  ma zanurzenie dziobu  $T_d$ , rufy  $T_r$ , zaś odcietą środka geometrycznego przekroju wodnicowego  $WO$  (odpowiadającego średniemu zanurzeniu)  $x_s$ ; na okręt przyjęto mały ciężar  $p$  o środku ciężkości w punkcie  $A (x, y, z)$ , (rys. 4.24 i 4.25).

Załóżmy początkowo, że ciężar przyjęty został w urojone miejsce w punkcie  $A_1 (x_s, 0, z)$ , pionowo ponad (lub pod) środkiem geometrycznym przekroju  $WO$ . Wyliczmy wówczas:



Rys. 4.24

przyrost zanurzenia z wzoru (4.24)

$$\Delta T = \frac{p}{\gamma F_z}$$

nową poprzeczną wysokość metacentryczną z wzoru (4.25)

$$\overline{G_1 M_1} = \overline{GM} + \frac{p}{P+p} \left( T + \frac{\Delta T}{2} - z - \overline{GM} \right)$$

nową wzdłużną wysokość metacentryczną z wzoru (4.26)

$$\overline{G_1 M_{L1}} = \frac{P}{P+p} \overline{GM_L}$$

Przesuńmy następnie ciężar z położenia urojonego w miejsce rzeczywiście zajmowane o odległość:

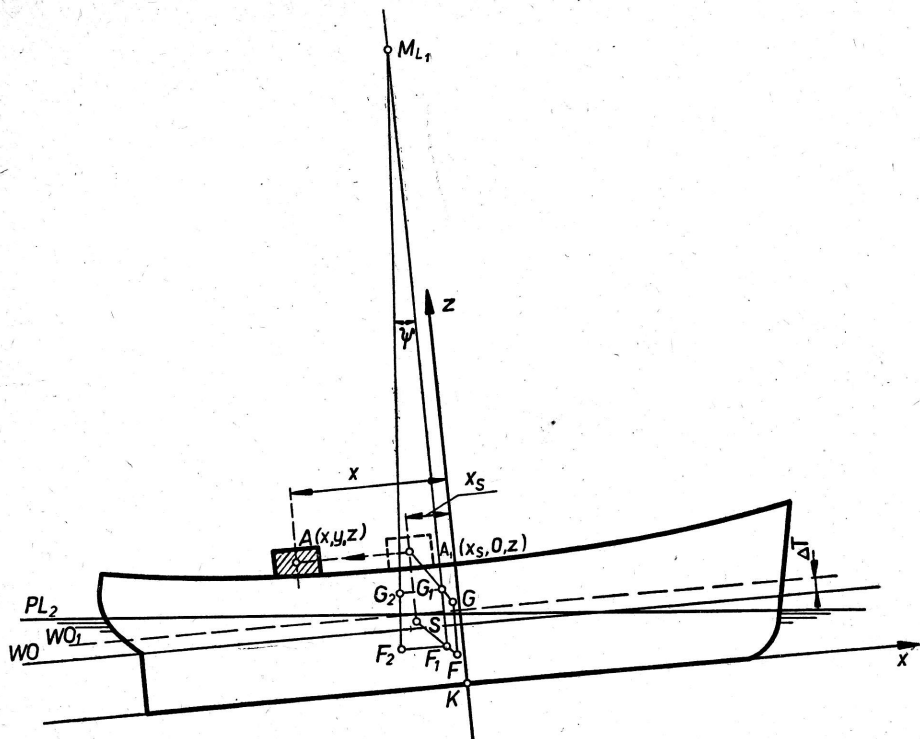
w kierunku poprzecznym  $o_y = y_2 - y_1 = y - 0 = y$ ,

w kierunku wzdłużnym  $o_x = x_2 - x_1 = x - x_s$ .

Przechył i przegłębienie okrętu obliczymy stosując wzory podane w podrozdziale 4.4, do których w miejsce  $P$  podstawimy nowy ciężar okrętu  $P+p$ , zaś w miejsce  $\overline{GM}$  i  $\overline{GM_L}$  wyliczone powyżej wartości  $\overline{G_1 M_1}$  i  $\overline{G_1 M_{L1}}$ .

Przechył okrętu określimy według wzoru (4.9)

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{py}{(P+p) \overline{G_1 M_1}} \quad (4.27)$$



Rys. 4.25

Przełączenie okrętu wyniesie według wzoru (4.13)

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{p(x-x_S)}{(P+p) \overline{G_1 M_{L_1}}} = \frac{p(x-x_S)}{P \overline{G M_L}} \quad (4.28)$$

Nowe zanurzenie dziobu i rufy będzie wówczas

$$T_{d1} = T_d + \Delta T + t_d$$

$$T_{r1} = T_r + \Delta T + t_r$$

Podstawmy odpowiednie wartości z wzoru (4.24), (4.15a) i (4.15b):

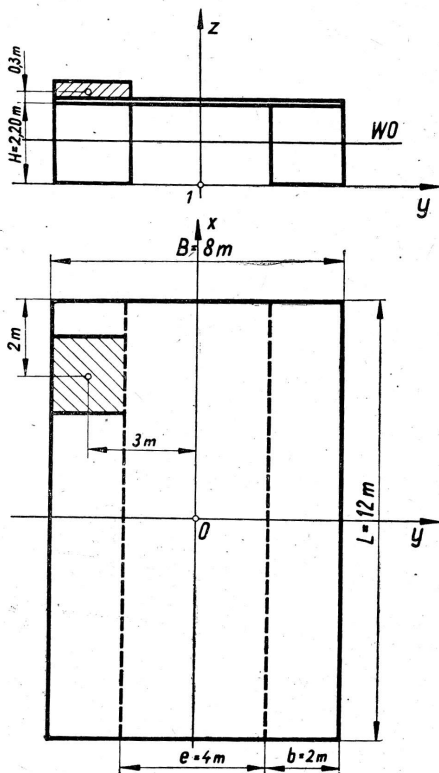
$$T_{d1} = T_d + \frac{p}{\gamma F_z} + \left( \frac{L}{2} - x_S \right) \frac{p(x-x_S)}{P \overline{G M_L}} \quad (4.29a)$$

$$T_{r1} = T_r + \frac{p}{\gamma F_z} + \left( -\frac{L}{2} - x_S \right) \frac{p(x-x_S)}{P \overline{G M_L}} \quad (4.29b)$$

Wzory powyższe ważne są również w wypadku zdejmowania ciężarów po podstawieniu w miejsce  $p$  wartości  $-p$ .

# PRZYKŁAD 4.7

Na barkę składającą się z dwóch pontonów prostopadłościennych o wymiarach jak na rysunku 4.26 podniesiono z dna ciężar  $p = 5,8 \cdot 10^3$  kG i złożono na pokładzie jednego z pontonów w miejscu zaznaczonym na rysunku. Ciężar barki pustej  $P = 53,8 \cdot 10^3$  kG, wysokość jej środka ciężkości  $z_G = 1,80$  m. Obliczyć kąt przechyłu i zanurzenie dziobu i rufy w wodzie słodkiej po złożeniu ciężaru.



Rys. 4.26

## ROZWIĄZANIE

Dla barki pustej:

- Objętość podwodzia dla słodkiej wody ( $\gamma = 1000$  kG/m<sup>3</sup>)

$$V = \frac{D}{\gamma} = \frac{P}{\gamma} = \frac{53,8 \cdot 10^3}{1000} = 53,8 \text{ m}^3$$

- Zanurzenie barki

$$T = \frac{V}{2Lb} = \frac{53,8}{2 \cdot 12 \cdot 2} = \frac{53,8}{48} = 1,12 \text{ m}$$

- Wysokość środka wyporu

$$z_F = \frac{T}{2} = \frac{1,12}{2} = 0,56 \text{ m}$$

- Poprzeczny moment bezwładności przekroju wodnicowego

$$I_B = \frac{LB^3}{12} - \frac{Le^3}{12} = \frac{12 \cdot 8^3}{12} - \frac{12 \cdot 4^3}{12} = 512 - 64 = 448 \text{ m}^4$$

- Poprzeczny promień metacentryczny

$$r_B = \overline{FM} = \frac{I_B}{V} = \frac{448}{53,8} = 8,33 \text{ m}$$

- Poprzeczna wysokość metacentryczna

$$\overline{GM} = z_F + r_B - z_G = 0,56 + 8,33 - 1,80 = 7,09 \text{ m}$$

- Wzdłużny moment bezwładności przekroju wodnicowego

$$I_L = \frac{BL^3}{12} - \frac{eL^3}{12} = \frac{8 \cdot 12^3}{12} - \frac{4 \cdot 12^3}{12} = 4 \cdot 12^2 = 576 \text{ m}^4$$

- Wzdłużny promień metacentryczny

$$r_L = \overline{FM}_L = \frac{I_L}{V} = \frac{576}{53,8} = 10,71 \text{ m}$$

- Wzdłużna wysokość metacentryczna

$$\overline{GM}_L = z_F + r_L - z_G = 0,56 + 10,71 - 1,80 = 9,47 \text{ m}$$

Dla barki z podniesionym ciężarem:

1. Przyrost zanurzenia według wzoru (4.24)

$$\Delta T = \frac{P}{\gamma F_z} = \frac{P}{\gamma 2Lb} = \frac{5,8 \cdot 10^3}{1000 \cdot 2 \cdot 12 \cdot 2} = 0,12 \text{ m}$$

2. Poprzeczna wysokość metacentryczna według wzoru (4.25)

$$\begin{aligned} \overline{G_1 M_1} &= \overline{GM} + \frac{P}{P+p} \left( T + \frac{\Delta T}{2} - z - \overline{GM} \right) = \\ &= 7,09 + \frac{5,8 \cdot 10^3}{53,8 \cdot 10^3 + 5,8 \cdot 10^3} \cdot \left( 1,12 + \frac{0,12}{2} - 2,50 - 7,09 \right) = 6,27 \text{ m} \end{aligned}$$

3. Wzdłużna wysokość metacentryczna według wzoru (4.26)

$$\overline{G_1 M_{L1}} = \frac{P}{P+p} \overline{GM_L} = \frac{53,8 \cdot 10^3}{53,8 \cdot 10^3 + 5,8 \cdot 10^3} \cdot 9,47 = 8,55 \text{ m}$$

4. Kąt przechyłu według wzoru (4.27)

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{py}{(P+p) \overline{G_1 M_1}} = \frac{5,8 \cdot 10^3 \cdot (-3)}{(53,8 \cdot 10^3 + 5,8 \cdot 10^3) \cdot 6,27} = -0,0465$$

$$\varphi = -2^\circ 40' \quad (\text{przechył na lewą burtę})$$

5. Zanurzenie dziobu i rufy według wzorów (4.29a) i (4.29b)

$$T_{d1} = T_d + \Delta T + \left( \frac{L}{2} - x_s \right) \frac{P(x - x_s)}{P \overline{GM_L}} = 1,12 + 0,12 + \left( \frac{12}{2} - 0 \right) \frac{5,8 \cdot 10^3 \cdot (4 - 0)}{53,8 \cdot 10^3 \cdot 9,47} = 1,51 \text{ m}$$

$$T_{r1} = T_r + \Delta T + \left( -\frac{L}{2} - x_s \right) \frac{P(x - x_s)}{P \overline{GM_L}} = 1,12 + 0,12 + \left( -\frac{12}{2} - 0 \right) \frac{5,8 \cdot 10^3 \cdot (4 - 0)}{53,8 \cdot 10^3 \cdot 9,47} = 0,95 \text{ m}$$

#### PRZYKŁAD 4.8

Na okręcie napełniono całkowicie wodą morską ( $\gamma = 1025 \text{ kG/m}^3$ ) dwa zbiorniki balastowe (lewej i prawej burty) o pojemności  $v = 79 \text{ m}^3$  każdy. Środek ciężkości przyjętego balastu leży w płaszczyźnie symetrii w odległości 12,4 m przed owrężem i 0,73 m ponad płaszczyznę podstawową. Zanurzenie okrętu przed zabalastowaniem:  $T_d = 3,1 \text{ m}$ ,  $T_r = 3,3 \text{ m}$ , długość  $L = 100,60 \text{ m}$ . Dla średniego zanurzenia  $T_{sr} = 3,2 \text{ m}$  odczytano z arkusza krzywych hydrostatycznych: wyporność  $D = 3080 \cdot 10^3 \text{ kG}$ , pole przekroju wodnicowego  $F_z = 990 \text{ m}^2$ , odcięta środka geometrycznego tego przekroju  $x_s = -0,2 \text{ m}$ , wysokości metacentryczne: poprzeczną  $\overline{GM} = 0,9 \text{ m}$  i wzdłużną  $\overline{GM_L} = 180 \text{ m}$ . Obliczyć poprzeczną wysokość metacentryczną i zanurzenie dziobu i rufy po zabalastowaniu.

#### ROZWIĄZANIE

1. Przyrost średniego zanurzenia według wzoru (4.24)

$$\Delta T = \frac{P}{\gamma F_z} = \frac{2\gamma v}{\gamma F_z} = \frac{2 \cdot 1025 \cdot 79}{1025 \cdot 990} = 0,16 \text{ m}$$

2. Poprzeczna wysokość metacentryczna według wzoru (4.25)

$$\overline{G_1 M_1} = \overline{GM} + \frac{p}{P+p} \left( T_{\delta r} + \frac{\Delta T}{2} - z - \overline{GM} \right) =$$

$$= 0,9 + \frac{2 \cdot 1025 \cdot 79}{3080 \cdot 10^3 + 2 \cdot 1025 \cdot 79} \cdot \left( 3,2 + \frac{0,16}{2} - 0,73 - 0,9 \right) = 0,98 \text{ m}$$

3. Nowe zanurzenie dziobu i rufy według wzorów (4.29a) i (4.29b)

$$T_{d_1} = T_d + \Delta T + \left( \frac{L}{2} - x_s \right) \frac{p(x - x_s)}{P \overline{GM}_L} = 3,1 + 0,16 +$$

$$+ \left[ -\frac{100,6}{2} - (-0,2) \right] \cdot \frac{2 \cdot 1025 \cdot 79 \cdot [12,4 - (-0,2)]}{3080 \cdot 10^3 \cdot 180} = 3,45 \text{ m}$$

$$T_{r_1} = T_r + \Delta T + \left( -\frac{L}{2} - x_s \right) \frac{p(x - x_s)}{P \overline{GM}_L} = 3,3 + 0,16 +$$

$$+ \left[ -\frac{100,6}{2} - (-0,2) \right] \cdot \frac{2 \cdot 1025 \cdot 79 \cdot [21,4 - (-0,2)]}{3080 \cdot 10^3 \cdot 180} = 3,28 \text{ m}$$

#### PRZYKŁAD 4.9

Podczas kapitalnego remontu zdjęto ze statku silnik o ciężarze  $p = 28 \cdot 10^3$  kG, którego współrzędne środka ciężkości były:  $x = -12,8$  m,  $y = 2,2$  m,  $z = 2,8$  m. Znaleźć przechył i zanurzenie dziobu i rufy po zdjęciu silnika, jeśli dane początkowe statku były następujące:  $L = 85,0$  m,  $B = 9,5$  m,  $T_d = 2,0$  m,  $T_r = 2,4$  m, a dla zanurzenia średniego:  $\delta = 0,665$ ,  $\alpha = 0,775$ ,  $x_G = -1,8$  m,  $\overline{GM} = 1,4$  m,  $\overline{GM}_L = 110$  m. Statek pływa w wodzie słodkiej ( $\gamma = 1000$  kG/m<sup>3</sup>).

#### ROZWIĄZANIE

1. Średnie zanurzenie statku początkowe

$$T_{\delta r} = \frac{T_d + T_r}{2} = \frac{2 + 2,4}{2} = 2,2 \text{ m}$$

2. Wyporność początkowa statku

$$D = \gamma V = \gamma \delta L B T_{\delta r} = 1000 \cdot 0,665 \cdot 85 \cdot 9,5 \cdot 2,2 = 1181 \cdot 10^3 \text{ kG}$$

3. Pole przekroju wodnicowego, odpowiadającego  $T_{\delta r}$

$$F_z = \alpha L B = 0,775 \cdot 85 \cdot 9,5 = 626 \text{ m}^2$$

4. Zmiana zanurzenia na skutek zdjęcia silnika według wzoru (4.24)

$$\Delta T = \frac{p}{\gamma F_z} = \frac{-28 \cdot 10^3}{1000 \cdot 626} = -0,04 \text{ m}$$

5. Wysokość metacentryczna po zdjęciu silnika według wzoru (4.25)

$$\overline{G_1 M_1} = \overline{GM} + \frac{p}{P+p} \left( T + \frac{\Delta T}{2} - z - \overline{GM} \right) =$$

$$= 1,4 + \frac{-28 \cdot 10^3}{1181 \cdot 10^3 - 28 \cdot 10^3} \left( 2,2 + \frac{-0,04}{2} - 2,8 - 1,4 \right) = 1,45 \text{ m}$$

6. Przechył na skutek zdjęcia silnika według wzoru (4.27)

$$\text{tg } \varphi = \frac{py}{(P+p) \overline{G_1 M_1}} = \frac{-28 \cdot 10^3 \cdot 2,2}{(1181 \cdot 10^3 - 28 \cdot 10^3) \cdot 1,45} = -0,037$$

$$\varphi = -2^\circ 7' \text{ (przechył na lewą burzę)}$$



7. Nowe zanurzenie dziobu i rufy według wzorów (4.29a) i (4.29b)

$$T_{d1} = T_d + \Delta T + \left( \frac{L}{2} - x_S \right) \frac{\rho (x - x_S)}{\rho \overline{GM}_L} = 2,0 + (-0,04) +$$

$$+ \left[ \frac{85}{2} - (-1,8) \right] \cdot \frac{-28 \cdot 10^3 \cdot [-12,8 - (-1,8)]}{1181 \cdot 10^3 \cdot 110} = 2,06 \text{ m}$$

$$T_{r1} = T_r + \Delta T + \left( -\frac{L}{2} - x_S \right) \frac{\rho (x - x_S)}{\rho \overline{GM}_L} = 2,4 + (-0,04) +$$

$$+ \left[ -\frac{85}{2} - (-1,8) \right] \cdot \frac{-28 \cdot 10^3 \cdot [-12,8 - (-1,8)]}{1181 \cdot 10^3 \cdot 110} = 2,26 \text{ m}$$

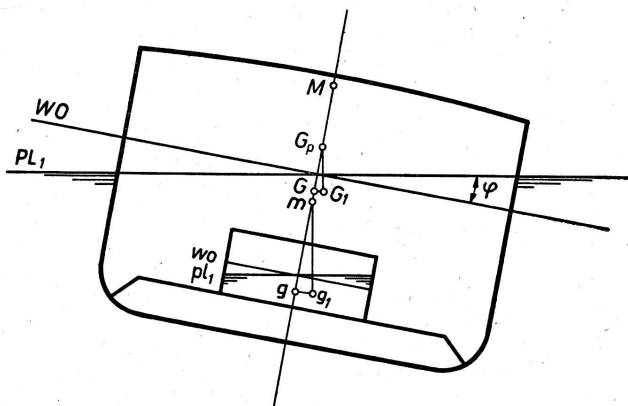
#### 4.6. WPŁYW CIĘŻARÓW CIEKŁYCH I ZAWIESZONYCH NA STATECZNOŚĆ POZĄTKOWĄ

Ciężary ciekłe, nie wypełniające całkowicie zbiorników (woda słodka lub balastowa, paliwo itp.), jak też ciężary zawieszone wywierają na stateczność wpływ inny niż ciężary stałe, gdyż przy przechyłach ich środki ciężkości zmieniają swe położenie, powodując tym samym zmiany położenia środka ciężkości okrętu.

##### 4.6.1. Wpływ ciężarów ciekłych na stateczność początkową

Jeśli ładunek ciekły wypełnia całkowicie zajmowany zbiornik, to jego środek ciężkości, leżący w środku geometrycznym zbiornika, nie zmienia przy przechyśle swego położenia. Wpływ takiego ciężaru ciekłego na stateczność jest taki sam, jak ciężaru stałego. Jeżeli jednak ładunek ciekły nie wypełnia całkowicie zbiornika, wówczas w czasie przechyłu okrętu ciecz w zbiorniku przelewa się na burtę zanurzającą się, a jego powierzchnia zachowuje pozycję poziomą. Powierzchnię taką zwiemy *swobodną* lub *wolną powierzchnią cieczy*.

Zbadajmy wpływ ładunku o swobodnej powierzchni na stateczność początkową,



Rys. 4.27

przechylając okręt ze zbiornikiem wypełnionym częściowo cieczą o ciężarze właściwym  $\gamma_p$  i o objętości  $v$  (rys. 4.27). Oznaczmy ciężar cieczy w zbiorniku literą  $p = \gamma_p v$ , ciężar okrętu wraz z cieczą w zbiorniku literą  $P$ , środek ciężkości okrętu nieprzechylonego literą  $G$ , ciężar właściwy wody zaburtowej literą  $\gamma$ .

Przy przechyle powierzchnia cieczy w zbiorniku przyjmuje położenie  $pl_1$ , a środek ciężkości cieczy, znajdujący się w położeniu normalnym w punkcie  $g$ , przesuwają się do punktu  $g_1$  wskutek przesunięcia się masy cieczy i towarzyszącej temu przesunięciu zmiany kształtu wypełnionej cieczą objętości. Rozumując podobnie, jak w podrozdziale 4.2.1 przy obliczaniu małego promienia metacentrycznego, można udowodnić, że przy małych kątach przechyłu kierunki działania ciężaru cieczy przechodzą przez stały punkt  $m$ , zwany metacentrum cieczy w przedziale (zbiorniku), oraz że odległość  $\overline{gm}$  można wyrazić wzorem:

$$\overline{gm} = \frac{i_B}{v}$$

gdzie:

$i_B$  — poprzeczny moment bezwładności swobodnej powierzchni cieczy w przedziale<sup>5</sup> [m<sup>4</sup>];  
 $v$  — objętość cieczy w zbiorniku [m<sup>3</sup>].

Ponieważ przy małych kątach przechyłu kierunki działania ciężaru cieczy przechodzą przez stały punkt  $m$ , zatem wpływ cieczy o swobodnej powierzchni na wysokość metacentryczną jest identyczny z wpływem jaki wywołałoby pozorne przesunięcie środka ciężkości ciężaru stałego, równego ciężarowi cieczy, z punktu  $g$  do punktu  $m$ . Pociągnęłoby to za sobą pozorne przesunięcie się środka ciężkości okrętu z punktu  $G$  do punktu  $G_p$ , a przez to samo zmniejszenie wysokości metacentrycznej o wielkości  $\Delta \overline{GM} = \overline{GG_p}$ . Przesunięcie  $\overline{GG_p}$  możemy wyznaczyć za pomocą wzoru (2.19)

$$\overline{GG_p} = \frac{p}{P} \overline{gm} = \frac{\gamma_p v}{\gamma V} \frac{i_B}{v} = \frac{\gamma_p}{\gamma} \frac{i_B}{V} = \Delta \overline{GM} \quad (4.30)$$

Zmniejszona wysokość metacentryczna  $\overline{G_p M}$  będzie zatem równa

$$\overline{G_p M} = r_B - (z_G - z_F) - \overline{GG_p} = \frac{I_B}{V} - \frac{\gamma_p}{\gamma} \frac{i_B}{V} - (z_G - z_F)$$

ostatecznie

$$\overline{G_p M} = \frac{I_B - \gamma_p i_B}{\gamma V} - (z_G - z_F) = \overline{GM} - \frac{\gamma_p}{\gamma} \frac{i_B}{V} \quad (4.31)$$

<sup>5</sup> Moment bezwładności przekroju wodnicowego przedziału (zbiornika) na wysokości swobodnej powierzchni cieczy, względem osi wzdłużnej, równoległej do płaszczyzny symetrii okrętu, przechodzącej przez środek geometryczny przekroju.

Przy większej liczbie zbiorników niezupełnie napełnionych cieczami o różnych ciężarach właściwych wpływ swobodnych powierzchni sumują się, wzór (4.31) przybierze wówczas postać

$$\overline{G_p M} = \frac{I_B - \sum_{k=1}^n \frac{\gamma_{pk}}{\gamma} i_{Bk}}{V} - (z_G - z_F) = \overline{GM} - \frac{\sum_{k=1}^n \frac{\gamma_{pk}}{\gamma} i_{Bk}}{V} \quad (4.32)$$

Podobny wzór możemy wyprowadzić na zredukowaną wzdłużną wysokość metacentryczną wstawiając odpowiednio wzdłużne momenty bezwładności swobodnej powierzchni cieczy; w praktyce wpływ swobodnych powierzchni na wzdłużną wysokość metacentryczną jest nieznaczny wobec dużej wartości  $\overline{GM}_L$  i dlatego też poprawek do niej z tego tytułu nie wprowadzamy.

Jak wynika z powyższych wzorów, obecność swobodnej powierzchni powoduje **zawsze zmniejszenie** początkowej wysokości metacentrycznej okrętu. Zmniejszenie to zależy jedynie od wielkości momentów bezwładności swobodnych powierzchni, zaś ilość i ciężar cieczy w zbiorniku nie ma na nie wpływu. Szczególnie niebezpieczne jest zmniejszenie się poprzecznej wysokości metacentrycznej, gdyż może ono zagrażać bezpieczeństwu okrętu. Gdy swobodna powierzchnia cieczy sięga od burty do burty, wpływ jej na wysokość metacentryczną jest tak duży, iż już przy długości powierzchni  $l = 0,12 \div 0,23 L$  może nastąpić całkowita utrata stateczności początkowej.

Ujemny wpływ swobodnej powierzchni na stateczność poprzeczną można skutecznie zmniejszyć przez podział zbiorników przegrodami wzdłużnymi. Przy kształcie swobodnej powierzchni zbliżonym do prostokąta poprzeczny moment bezwładności wyznaczyć można w przybliżeniu z wzoru

$$i_B = \frac{lb^3}{12}$$

gdzie:

- $l$  — długość zbiornika [m];
- $b$  — szerokość zbiornika [m].

Dzieląc zbiornik wzdłużnie na  $n$  symetrycznych części otrzymamy

$$i'_B = n \frac{l \left( \frac{b}{n} \right)^3}{12} = \frac{1}{n^2} \frac{lb^3}{12} = \frac{i_B}{n^2}$$

Podział na dwie części powoduje zatem czterokrotne zmniejszenie wpływu swobodnej powierzchni, na trzy części — dziewięciokrotne itd. Tym też tłumaczy się dzielenie szerokich zbiorników wzdłużnymi grodziami wodoszczelnymi (np. zbiorników dennych lub zbiorników ładunkowych na zbiornikowcach).

Przyjęcie na okręt ładunku ciekłego, połączone z wystąpieniem swobodnej powierzchni cieczy, wywiera podwójny wpływ na wysokość metacentryczną  $\overline{GM}$ , a mianowicie: wpływ na położenie środka ciężkości okrętu ze względu na ciężar cieczy (traktowanego jako ciężar stały) oraz wpływ (zawsze ujemny) na  $\overline{GM}$  ze

względem na swobodną powierzchnię cieczy. W praktyce eksploatacyjnej należy dążyć do ograniczenia wpływu swobodnej powierzchni na stateczność. W tym celu należy w miarę możliwości napełniać zbiorniki całkowicie, a przy opróżnianiu usuwać z nich całkowicie ciecz. Balastowanie okrętu powinno być dokonywane przez kolejne (nie równoczesne) napełnianie lub opróżnianie zbiorników i kompletne zapełnienie kilku z nich, nie zaś częściowe — większej ich liczby. Zwiększenie zanurzenia okrętu przez napełnianie wodą ładowni jest bardzo niebezpieczne, gdyż może wywołać poważne zmniejszenie stateczności ze względu na dużą szerokość ładowni. Szczególnie niebezpieczne jest zbieranie się większych ilości wody na górnych pokładach (np. w czasie gaszenia pożarów), gdyż wpływ mogących powstać przy tym dużych swobodnych powierzchni, połączony ze zmniejszeniem się wysokości metacentrycznej na skutek dodania ciężaru (wody) powyżej płaszczyzny obojętnej (podrozd. 4.5) może spowodować utratę stateczności i przewrócenie się okrętu. Podobne skutki wywołać może na małych statkach długotrwałe zalanie pokładu otwartego przy fali z rufy.

W wypadku niespodziewanego zmniejszenia się wysokości metacentrycznej lub wystąpienia trwałego przechyłu okrętu bez widocznych przyczyn, należy zawsze sprawdzić stan zapełnienia zbiorników, gdyż zjawiska występujące mogą być spowodowane cieczami o swobodnej powierzchni w zbiornikach.

#### PRZYKŁAD 4.10

Na okręcie o wyporności  $D = 5300 \cdot 10^3$  kG napełniano do połowy wodą zaburtową ( $\gamma = 1025$  kG/m<sup>3</sup>) dwa symetryczne zbiorniki (lewej i prawej burty) o długości  $l = 11,8$  m i szerokości (każdego)  $b = 7,2$  m. Określić zmniejszenie wysokości metacentrycznej wywołane obecnością swobodnej powierzchni cieczy.

#### ROZWIĄZANIE

Zmniejszenie wysokości metacentrycznej według wzoru (4.30)

$$\Delta \overline{GM} = 2 \frac{\gamma_p}{\gamma} \frac{i_B}{V}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \gamma_p &= \gamma = 1025 \text{ kG/m}^3 \\ V &= \frac{D}{\gamma} = \frac{5300 \cdot 10^3}{1025} = 5170 \text{ m}^3 \\ i_B &= \frac{lb^3}{12} = \frac{11,8 \cdot 7,2^3}{12} = 366,5 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

skąd

$$\Delta \overline{GM} = 2 \frac{\gamma_p}{\gamma} \frac{i_B}{V} = \frac{2 \cdot 366,5}{5170} = 0,14 \text{ m}$$

#### PRZYKŁAD 4.11

Na okręcie o parametrach:  $L = 52$  m,  $B = 9$  m,  $\delta_k = 0,75$ ,  $\alpha = 0,86$ ,  $D = 1200 \cdot 10^3$  kG,  $\overline{GM} = 0,5$  m napełniono częściowo wodą zaburtową w ilości  $16 \cdot 10^3$  kG zbiornik prostopadłościenny dna podwójnego prawej burty, przyległy do wzdłużnika środkowego. Wymiary zbiornika:  $l =$

$= 11,8 \text{ m}$ ,  $b = 4 \text{ m}$ ,  $h = 0,6 \text{ m}$ . Obliczyć nową wysokość metacentryczną i kąt przechyłu okrętu przy pływaniu w wodzie słodkiej ( $\gamma = 1000 \text{ kG/m}^3$ ).

#### ROZWIĄZANIE

1. Zakładając, że w występujących granicach zmian zanurzenia zmiany  $\delta_k$  i  $\alpha$  są nieznaczne, obliczymy zanurzenie okrętu przed napełnieniem zbiornika według wzoru (1.3)

$$T = \frac{V}{\delta_k LB} = \frac{D}{\gamma \delta_k LB} = \frac{1200 \cdot 10^3}{1000 \cdot 0,75 \cdot 52 \cdot 9} = 3,42 \text{ m}$$

2. Przyrost zanurzenia wskutek napełnienia zbiornika według wzoru (4.24)

$$\Delta T = \frac{p}{\gamma F_z} = \frac{p}{\gamma \alpha LB} = \frac{16 \cdot 10^3}{1000 \cdot 0,86 \cdot 52 \cdot 9} = 0,04 \text{ m}$$

3. Wysokość napełnienia zbiornika wodą

$$h_1 = \frac{p}{\gamma lb} = \frac{16 \cdot 10^3}{1000 \cdot 11,8 \cdot 4} = 0,34 \text{ m}$$

4. Wysokość metacentryczna po napełnieniu zbiornika bez uwzględnienia wpływu swobodnej powierzchni według wzoru (4.25)

$$\begin{aligned} \overline{G_1 M_1} &= \overline{GM} + \frac{p}{P+p} \left( T + \frac{\Delta T}{2} - z - \overline{GM} \right) = \\ &= 0,5 + \frac{16 \cdot 10^3}{1200 \cdot 10^3 + 16 \cdot 10^3} \left( 3,42 + \frac{0,04}{2} - \frac{0,34}{2} - 0,5 \right) = 0,54 \text{ m} \end{aligned}$$

5. Poprzeczny moment bezwładności swobodnej powierzchni

$$i_B = \frac{lb^3}{12} = \frac{11,8 \cdot 4^3}{12} = 63 \text{ m}^4$$

6. Zmniejszenie wysokości metacentrycznej wskutek wpływu swobodnej powierzchni według wzoru (4.30)

$$\Delta \overline{G_1 M_1} = \frac{\gamma_p i_B}{V_1} = \frac{\gamma_p i_B}{\gamma V_1} = \frac{\gamma_p i_B}{D_1} = \frac{1000 \cdot 63}{1200 \cdot 10^3 + 16 \cdot 10^3} = 0,05 \text{ m}$$

7. Wysokość metacentryczna z uwzględnieniem wpływu swobodnej powierzchni

$$\overline{G_{1p} M_1} = \overline{G_1 M_1} - \Delta \overline{G_1 M_1} = 0,54 - 0,05 = 0,49 \text{ m}$$

8. Kąt przechyłu okrętu według wzoru (4.9)

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{p o_y}{P_1 \overline{G_{1p} M_1}} = \frac{p \cdot \frac{b}{2}}{(P+p) \overline{G_{1p} M_1}} = \frac{16 \cdot 10^3 \cdot \frac{4}{2}}{(1200 \cdot 10^3 + 16 \cdot 10^3) \cdot 0,49} = 0,0537$$

$$\varphi = 3^\circ 4'$$

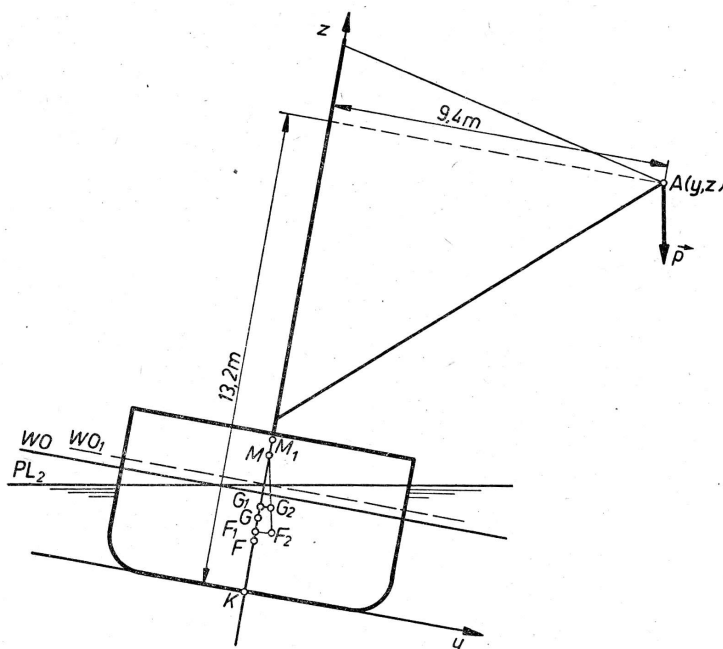
#### 4.6.2. Wpływ ciężarów zawieszonych na stateczność początkową

Ciężar zawieszony (np. ładunek zawieszony na bomie) zmienia swe położenie przy przechyłach, powodując tym samym zmiany położenia środka ciężkości okrętu. Przy każdym jednak przechyle kierunek działania ciężaru zawieszonego przechodzi

zawsze przez punkt zawieszenia, wpływ jego na stateczność będzie zatem taki jak gdyby środek ciężkości ciężaru znajdował się w punkcie zawieszenia. Zawieszenie więc ciężaru powoduje pozorne przesunięcie się środka ciężkości okrętu w górę i odpowiednie zmniejszenie się wysokości metacentrycznej  $\overline{GM}$ .

Przy ciężarach zawieszonych swobodnie przyjmuje się do obliczeń wysokości metacentrycznej punkt zaczepienia ciężaru (np. liny na bomie) jako punkt przyłożenia jego środka ciężkości.

Ciężary zawieszone, lecz unieruchomione za pomocą dodatkowego zamocowa-



Rys. 4.28

nia, nie zmieniają swego położenia przy przechyle i mogą być uważane za ciężary nieruchome. W wyjątkowych jednak wypadkach, gdy istnieje obawa zerwania zamocowań, należy przeliczyć ich wpływ na stateczność traktując je jak ciężar zawieszony.

Wnioski powyższe dotyczą także stateczności wzdłużnej.

#### PRZYKŁAD 4.12

W czasie ładowania transportowca o wyporności  $D = 1750 \cdot 10^3$  kG podniesiono na bomie ciężar  $p = 10 \cdot 10^3$  kG. Położenie punktu zaczepienia liny pokazano na rysunku 4.28. Wysokość metacentryczna okrętu przed podniesieniem ciężaru  $\overline{GM} = 0,7$  m, zanurzenie  $T = 3,40$  m, odpowiadające zanurzeniu  $T$  pole przekroju wodnicowego  $F_z = 494$  m<sup>2</sup>, ciężar właściwy wody  $\gamma = 1025$  kG/m<sup>3</sup>. Znaleźć kąt przechyłu okrętu przy podnoszeniu ciężaru  $p$ .

# ROZWIĄZANIE

1. Przyrost zanurzenia według wzoru (4.24)

$$\Delta T = \frac{p}{\gamma F_z} = \frac{10 \cdot 10^3}{1025 \cdot 494} = 0,02 \text{ m}$$

2. Nowa wysokość metacentryczna według wzoru (4.25)

$$\begin{aligned} \overline{G_1 M_1} &= \overline{GM} + \frac{p}{P+p} \cdot \left( T + \frac{\Delta T}{2} - z - \overline{GM} \right) = \\ &= 0,7 + \frac{10 \cdot 10^3}{1750 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3} \left( 3,40 + \frac{0,02}{2} - 13,2 - 0,7 \right) = 0,64 \text{ m} \end{aligned}$$

3. Przechył okrętu według wzoru (4.27)

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{py}{(P+p) \overline{G_1 M_1}} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 9,4}{(1750 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) \cdot 0,64} = 0,0835 \\ \varphi &= 4^\circ 47' \end{aligned}$$

## PRZYKŁAD 4.13

Na okręcie o wyporności  $D = 4800 \cdot 10^3 \text{ kG}$  i wysokości metacentrycznej  $\overline{GM} = 0,5 \text{ m}$  podniesiono na bomie pionowo z dna ładowni ciężar  $p = 12 \cdot 10^3 \text{ kG}$ . Obliczyć zmianę wysokości metacentrycznej, spowodowaną uniesieniem ciężaru, jeśli wysokość zamocowania liny na bomie wynosi  $z_2 = 17,2 \text{ m}$ , zaś początkowa wysokość środka ciężkości ciężaru  $p$  wynosiła  $z_1 = 4 \text{ m}$ .

## ROZWIĄZANIE

Uniesienie ciężaru równoznaczne jest z przeniesieniem ciężaru z miejsca spoczynku do miejsca zamocowania liny na bomie. Zmniejszenie wysokości metacentrycznej będzie więc równe pozornemu przesunięciu środka ciężkości okrętu, który wyliczymy według wzoru (2.19)

$$\Delta \overline{GM} = \overline{GG_p} = \frac{p}{P} (z_2 - z_1) = \frac{12 \cdot 10^3}{4800 \cdot 10^3} (17,2 - 4) = 0,03 \text{ m}.$$

## 4.7. STATECZNOŚĆ OKRĘTU PRZY ZETKNIĘCIU Z DNEM

Zetknięcie okrętu z dnem może być przypadkowe, na przykład przy wejściu na skałę, bądź też zamierzone, jak to ma miejsce w czasie dokowania lub wyrzucenia się na mieliznę. W każdym wypadku zetknięcie z dnem może spowodować zmniejszenie się lub utratę stateczności, a więc może zagrażać bezpieczeństwu okrętu.

### 4.7.1. Zetknięcie okrętu z dnem na całej długości stępki

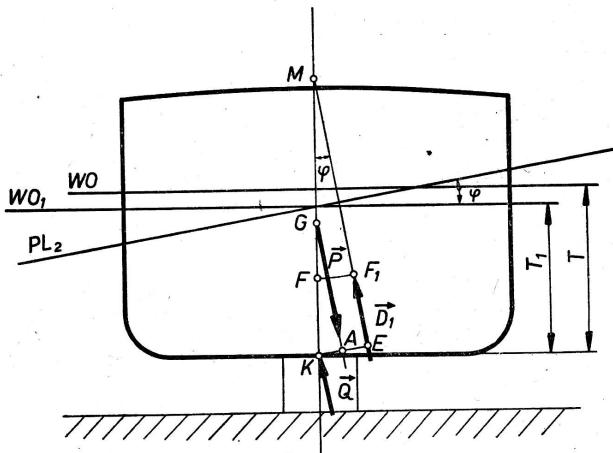
Zetknięcie okrętu z dnem na całej długości stępki może mieć miejsce w czasie dokowania okrętu lub przy wejściu z dużą prędkością na mieliznę.

Przyjmijmy, iż okręt wprowadzony do doku pływającego dotknie w pewnej chwili podpór na całej długości stępki. Dalsze wynurzenie się doku pociągnie za sobą wynurzenie się okrętu; tym samym zanurzenie okrętu  $T_1$  stanie się mniejsze od zanurzenia  $T$ , odpowiadającego ciężarowi okrętu  $P$ .

Wskutek zmniejszającego się zanurzenia wyporność okrętu maleje, przyjmując wartość  $D_1$ , a jej ubytek musi być równoważony przez wzrastający nacisk podpór na stępkę  $Q$ , przy czym

$$P = D_1 + Q$$

Wystąpienie siły  $\vec{Q}$  wywoła zmniejszenie się stateczności, szczególnie niebezpieczne dla stateczności poprzecznej.



Rys. 4.29

Jeśli jakakolwiek przyczyna spowoduje przechył częściowo wynurzonego okrętu o mały kąt  $\varphi$  (rys. 4.29), wówczas moment prostujący (obliczony względem linii podstawowej) wyrazi się wzorem

$$M_H = D_1 \overline{KE} - P \overline{KA} = (D_1 \overline{KM} - P \overline{KG}) \sin \varphi$$

Podstawiając do powyższego równania

$$D_1 = P - Q$$

i dzieląc obie jego strony przez  $P \sin \varphi$ , otrzymamy

$$\frac{M_U}{P \sin \varphi} = \overline{KM} - \overline{KG} - \frac{Q}{P} \overline{KM} = \overline{GM} - \frac{Q}{P} \overline{KM} \quad (4.33)$$

Przy zmniejszaniu się zanurzenia wyrażenie  $\frac{Q}{P} \overline{KM}$  wzrasta szybciej niż wyrażenie  $\overline{GM}$ , wskutek wzrostu nacisku  $Q$  i odległości  $\overline{KM}$ . Z tego powodu prawa strona równania maleje przy zmniejszaniu się zanurzenia, osiąga wartość równą zeru dla

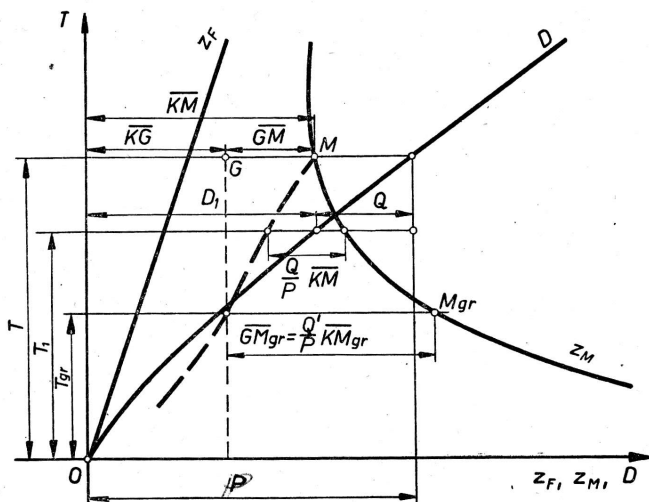
$$\overline{GM} = \frac{Q}{P} \overline{KM}$$

a następnie przyjmuje wartości ujemne.



Ponieważ mianownik lewej strony równania (4.33) jest stały i zawsze dodatni, więc o znaku i wartości momentu prostującego  $\bar{M}_U$  decyduje znak i wartość prawej strony równania. A zatem w czasie wynurzenia się okrętu moment prostujący maleje aż do zera, a następnie przybiera wartości ujemne, co sprawia, że równowaga okrętu staje się niestabilną.

Okręt dokowany należy więc podprzeć podporami bocznymi najpóźniej w chwili uzyskania przez moment  $\bar{M}_U$  wartości równej zero, w przeciwnym bowiem razie



Rys. 4.30

mógłby się on przewrócić pod działaniem niewielkiej nawet siły przechylającej (np. bocznego wiatru).

Zanurzenie okrętu dokowanego  $T_{gr}$ , przy którym następuje utrata równowagi stałej, możemy określić za pomocą krzywych hydrostatycznych. Na arkuszu krzywych (rys. 4.30) odkładamy mianowicie dla kolejnych malejących zanurzeń wartości  $\frac{Q}{P} \bar{KM}$  w lewo od krzywej wysokości metacentrum  $z_M = \bar{KM}$ , poczynając od zanurzenia  $T$ , odpowiadającego ciężarowi okrętu  $P = D$ . Wartości  $\bar{KM}$  i  $Q$  odczytujemy dla poszczególnych zanurzeń z arkusza krzywych, jak pokazano na rysunku 4.30.

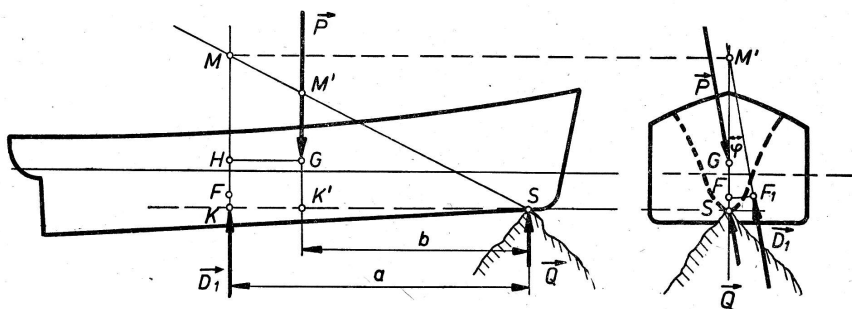
Przecięcie się krzywej, otrzymanej z połączenia wyznaczonych punktów z prostą, poprowadzoną w odległości  $\bar{KG} = z_G$  od osi rzędnych (naniesioną na arkusz krzywych dla stanu odpowiadającego dokowaniu) pozwoli odczytać poszukiwane zanurzenie  $T_{gr}$ .

Dla zapobieżenia nieprzewidzianej wcześniejszej utracie równowagi stałej należy przed wejściem na dok usunąć swobodne powierzchnie płynów przez osuszenie zęz oraz wypompowanie lub całkowite napełnienie zbiorników. Należy również

odpowiednio zamocować wszystkie ciężary zawieszone i ruchome. W czasie dokowania nie wolno przesuwac na okręcie żadnych ciężarów ani też przepompowywać zawartości zbiorników.

#### 4.7.2. Zetknięcie okrętu z dnem w jednym punkcie

Typowym przykładem zetknięcia okrętu z dnem w jednym punkcie jest wpadnięcie okrętu na skałę. Powoduje ono częściowe wynurzenie się okrętu, połączone z wystąpieniem siły nacisku  $\vec{Q}$  oraz ze zmianą przegłębienia, a więc i z przesunięciem środka wyporu do punktu  $F$  (rys. 4.31).



Rys. 4.31

Przy tego rodzaju zetknięciu z dnem muszą być spełnione następujące warunki równowagi:

$$P = D_1 + Q$$

oraz

$$\Sigma M = Pb - D_1 a = 0$$

$$Pb = D_1 a$$

Również w tym wypadku wystąpienie nacisku  $Q$  wywoła zmniejszenie się stateczności poprzecznej.

Zakładając, że oś  $KS$  jest osią obrotu okrętu przy przechyle o mały kąt  $\varphi$ , możemy wyrazić moment prostujący, podobnie jak w podrozdziale 4.7.1, wzorem

$$M_U = (D_1 \overline{KM} - P \overline{K'G}) \sin \varphi$$

Podstawiając do powyższego równania

$$D_1 = P \frac{b}{a}$$

i dzieląc obie jego strony przez  $P \sin \varphi$  otrzymamy

$$\frac{M_U}{P \sin \varphi} = \frac{b}{a} \overline{KM} - \overline{K'G}$$

Z podobieństwa trójkątów  $SKM$  i  $SK'M'$  (rys. 4.31) wynika, iż

$$\frac{b}{a} = \frac{\overline{K'M'}}{\overline{KM}}$$

skąd

$$\frac{M_U}{P \sin \varphi} = \overline{K'M'} - \overline{K'G} = \overline{GM'} \quad (4.34)$$

Równanie (4.34) uwidacznia wyraźnie fakt zmniejszenia się stateczności okrętu osadzonego na skale, gdyż poprzeczna wysokość metacentryczna wyraża się w tym wypadku nie odcinkiem  $\overline{GM}$ , lecz mniejszym od niego odcinkiem  $\overline{GM'}$ .

Podparcie okrętu w jednym tylko punkcie wpływa zatem na jego stateczność w taki sposób, jak gdyby metacentrum okrętu przesunęło się z punktu  $M$  do punktu  $M'$ . Punkt  $M'$  leży na przecięciu prostej pionowej, przechodzącej przez środek ciężkości okrętu  $G$  z prostą, łączącą punkt podparcia  $S$  z położeniem metacentrum  $M$ , odpowiadającym danemu przegłębieniu. O ile prosta  $MS$  przebiegnie poniżej środka ciężkości  $G$  — wówczas okręt utraci stateczność i może się przewrócić. Wypadek ten może nastąpić tym łatwiej, im punkt podparcia okrętu  $S$  leży bliżej środka ciężkości  $G$ .

Z powyższych rozważań wynika, że dla okrętu, który wpadł na skalę, same już tylko warunki statyczne stwarzają poważne niebezpieczeństwo jego zatonięcia na skutek utraty stateczności poprzecznej, niezależnie od dodatkowych wpływów dynamicznych wiatru i fali. Równocześnie zagraża okrętowi niebezpieczeństwo przełamania się z powodu wystąpienia w kadłubie zbyt wielkich naprężeń zarówno od sił statycznych, jak i wzmiankowanych sił dynamicznych.

#### 4.8. DOŚWIADCZALNE WYZNACZANIE POŁOŻENIA ŚRODKA CIĘŻKOŚCI OKRĘTU

Dokładne określenie położenia środka ciężkości okrętu  $G$  jest niezbędne dla wyznaczenia jego wysokości metacentrycznej i dla poprawnego wykreślenia krzywej ramion prostujących.

Ustalenie położenia środka ciężkości okrętu pustego wyposażonego na drodze rachunkowej jest bardzo żmudne i obarczone zbyt dużymi błędami ze względu na wielką ilość części składowych konstrukcji, których dokładne wyznaczenie ciężarów i momentów jest niemożliwe. Z tego też powodu ostateczne położenie środka ciężkości okrętu pustego wyznaczane jest po zakończeniu montażu wyposażenia w sposób doświadczalny za pomocą tzw. próby przechyłów. W pewnych wypadkach sposób ten stosowany jest także do kontroli wysokości metacentrycznej okrętu w czasie eksploatacji.

##### 4.8.1. Podstawy teoretyczne próby przechyłów

Umieśmy po obu burtach okrętu, pływającego bez przechyłu, dwa niewielkie ciężary o wielkości  $p$  każdy w równych odległościach  $\frac{1}{2} o_y$  od płaszczyzny symetrii (rys. 4.32) tak, by okręt nadal pływał bez przechyłu. Przesuwając jeden z tych cięż-

żarów  $p$  w poprzek okrętu na odległość  $o$ , wywołamy przechył okrętu o kąt  $\varphi$ , którego tangens możemy wyznaczyć z wzoru (4.9)

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{p \sigma_y}{P G M} \quad (4.9)$$

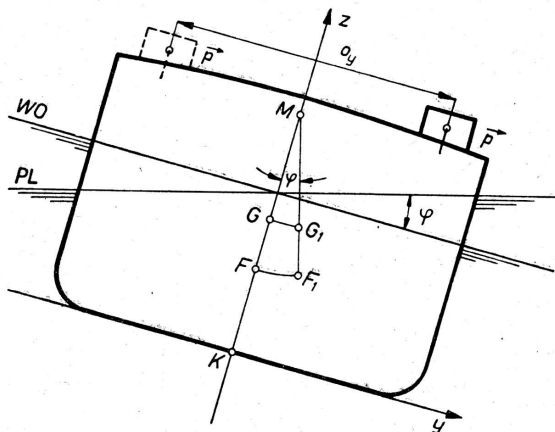
gdzie:

$P$  — ciężar okrętu wraz z ciężarami  $p$  [kG];

$\overline{GM}$  — wysokość metacentryczna okrętu w danym stanie obciążenia [m].

Znając  $P$ ,  $p$  i  $\alpha$ , możemy, po zmierzeniu  $\tan \varphi$  (np. za pomocą pionu) obliczyć z powyższego wzoru  $\overline{GM}$ :

$$\overline{GM} = \frac{p o_y}{P \operatorname{tg} \varphi}$$



**Rys. 4.32**

Odczytując z krzywych hydrostatycznych dla danego (średniego) zanurzenia wysokość metacentrum  $\overline{KM} = z_M$  znajdujemy wysokość środka ciężkości okrętu z wzoru:

$$z_G = \overline{KG} = \overline{KM} - \overline{GM}$$

Warunkiem poprawności otrzymanych wyników jest mały kąt przechyłu  $\varphi$  ( $3^\circ \div 4^\circ$ ), gdyż przy kątach większych wzór (4.9) traci swą ważność.

Gdy okręt pływa bez przegłębienia lub z niewielkim przegłębieniem, odczytujemy z krzywych hydrostatycznych dla zmierzonego zanurzenia średniego i ustalonego ciężaru właściwego wody  $\gamma$ : wyporność  $D$  — która równa będzie ciężarowi okrętu  $P$  w czasie próby oraz odciętą środka wyporu  $x_F$ , której równa będzie odcięta środka ciężkości okrętu  $x_G$ .

Przy większych przegłębieniach, których jednak należy unikać w czasie próby przechyłów, musimy dla zmierzonego zanurzenia na dziobie i na rufie obliczyć

ze skali Bonjeana wyporność  $D$  oraz wysokość i odciętą środka wyporu  $z_F$  i  $x_F$ ; promień metacentryczny  $r_B = \overline{FM}$  musimy wówczas wyznaczyć z rzeczywistego przekroju pływnicowego, który otrzymamy z linii teoretycznych.

Używane do wywołania przechyłów ciężary zdejmujemy z okrętu po wykonaniu próby. Dla wyznaczenia położenia środka ciężkości okrętu w stanie normalnego wyposażenia musimy skorygować wyniki, uwzględniając przesunięcie środka ciężkości na skutek zdjęcia ciężarów przechyłowych i innych ciężarów zbędnych, znajdujących się na okręcie w czasie próby jak też na skutek późniejszego dodania ciężarów brakujących.

Dla umożliwienia przeprowadzenia próby przechyłów w warunkach eksploatacyjnych wmontowane są na niektórych okrętach symetrycznie zbiorniki burtowe o jednakowych pojemnościach. Próba polega wówczas na kolejnym przepompowywaniu wody ze zbiornika jednej burty do zbiornika na burcie przeciwnej. Dla uniknięcia wpływu swobodnej powierzchni zbiorniki muszą być zapełnione całkowicie. Ze względu na mniejszą dokładność sposób ten nie jest stosowany przy próbach stoczniovych, jednak łatwość wykonania próby jest przyczyną korzystania z niego w eksploatacji dla określenia wysokości metacentrycznej okrętu załadowanego przed jego wyjściem na morze.

#### 4.8.2. Przygotowanie okrętu do próby przechyłów

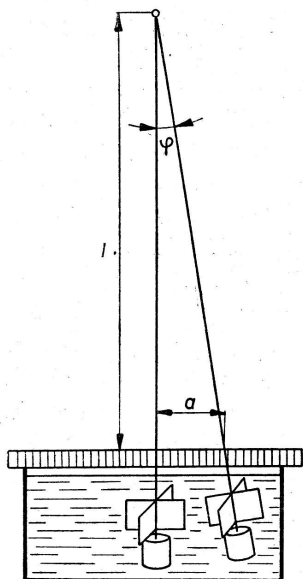
Próba przechyłów powinna odbywać się w dniu możliwie bezwietrznym lub przy sile wiatru nie wyżej  $3^\circ$  w skali Beauforta, na wodzie spokojnej, bez prądów. Okręt powinien pływać zupełnie swobodnie, przy zlurowanych cumach i kablach oraz zdjętych trapach i kładkach. Przed rozpoczęciem próby należy zlikwidować ewentualny przechył i w miarę możliwości przegłębić przez odpowiednie przesunięcia ciężarów (np. napełnienie zbiorników balastowych). Okręt należy oczyścić, usunąć z niego wszystkie ciężary zbędne i umieścić na właściwym miejscu wyposażenie ruchome (np. kotwice, łodzie itp.). Przed rozpoczęciem próby należy sporządzić szczegółowe wykazy ciężarów brakujących do normalnego wyposażenia oraz osobno wykazy ciężarów przechyłowych i zbędnych, nie należących do wyposażenia, a których nie można było usunąć; w wykazach tych należy podać wartości ciężarów i współrzędne ich środków ciężkości. Wszystkie zbiorniki wody i olejów powinny być przesondowane, a ich stan ujęty w zestawieniach.

Dla uniknięcia wpływu swobodnej powierzchni płynów, mogącej zniekształcić wyniki pomiarów, wszystkie zbiorniki wody, paliwa płynnego i olejów smarowych muszą być albo całkowicie puste, albo też całkowicie zapełnione. W wypadku konieczności pozostawienia zbiornika częściowo napełnionego należy wpływ jego swobodnej powierzchni uwzględnić odpowiednio w obliczeniach końcowych. Kotły powinny być napełnione wodą do poziomu normalnego. W czasie próby nie wolno przepompowywać wody ani paliwa płynnego. Ciężary ruchome (np. zawieszone) należy zamocować tak, by nie mogły się poruszać przy przechyłach.

Wszyscy ludzie znajdujący się na okręcie muszą przebywać na ściśle określonych miejscach, szczególnie w czasie dokonywania odczytów.

Do mierzenia kątów przechyłu używamy dwóch lub trzech pionów umieszczonych na dziobie, na śródkreściu i na rufie.

Cieżarki pionów ( $2 \div 5$  kG) zawieszamy na cienkiej, długiej linie ( $5 \div 8$  m) w płaszczyźnie symetrii okrętu w lukach lub nad otworami w pokładzie. Dla tłumienia wahań pionów przy przechyle umieszczamy ciężarki w wanienkach napełnionych wodą lub olejem (rys. 4.33). Wychylenia pionu mierzymy na listwie umocowanej do wanienki i zaopatrzonej w podziałkę milimetrową. Długości pionów (od punktu zaczepienia do listwy) odnotowujemy w formularzach służących do zapisu wychyleń pionów.



Rys. 4.33

Numer obserwacji	Rozmieszczenie ciężarów przechyłowych
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

Rys. 4.34