



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

**WYDZIAŁ OCEANOTECHNIKI I OKRĘTOWNICTWA**

**Katedra Hydromechaniki i Hydroakustyki**

**ĆWICZENIA LABORATORYJNE Z HYDROMECHANIKI OKRĘTU**

**Ćwiczenie Nr 2a i b**

**Doświadczalne określenie położenia środka ciężkości statku**

**(próba przechyłów i przy użyciu kołyski)**

**Opracowali pracownicy Katedry**

**Gdańsk 1979**

## **1. Cel ćwiczenia.**

Próba przechyłów przeprowadzona w warunkach laboratoryjnych na modelu, ma na celu danie podstaw do przeprowadzenia podobnego doświadczenia na statku rzeczywistym.

## **2. Wiadomości podstawowe.**

Dokładna znajomość ciężaru i środka ciężkości okrętu  $G$  jest niezbędna przy wyznaczeniu wysokości metacentrycznej  $h_0$  i przy wykreśleniu krzywej ramion prostujących okrętu.

Obliczenie ciężaru okrętu pustego i położenia jego środka ciężkości wykonywane jest przy projektowaniu okrętu, jednakże wyniki tych obliczeń zawsze odbiegają od wartości rzeczywistych. Stąd wynika konieczność doświadczalnego określenia tych wielkości, zaraz po zakończeniu budowy statku, gdy okręt jest jeszcze pusty, nie oddany do eksploatacji, ale jest już całkowicie wyposażony. Próbę przechyłów należy również stosować do określenia położenia środka ciężkości krętu po każdej przebudowie okrętu lub po większych remontach kadłuba.

Ciężar i położenie środka ciężkości każdego okrętu zawsze są sprawdzane doświadczalnie.

Próbie przechyłów okrętu przeprowadza stocznia budując lub remontując okręt w obecności przedstawiciela instytucji klasyfikacyjnej. Doświadczenie opracowywane jest w postaci protokołu. Próba przechyłów polega na przechyleniu okrętu za pomocą przenoszenia specjalnie do tego celu przeznaczonych ciężarów, prostopadle do płaszczyzny symetrii statku, jak również na pomiarze kąta przechyłu przy pomocy pionów.

## **3. Próba przechyłów na statku rzeczywistym.**

### **3.1 Warunki pogodowe**

Próbie przechyłów należy przeprowadzić przy bezwietrznej pogodzie, spokojnej powierzchni akwenu i tam gdzie nie ma prądu. Prędkość wiatru nie powinna przewyższać 3 m/s.

Gdy wieje wiatr i powierzchnia wody jest lekko sfalowana, lub istnieje nieznaczny prąd wody, statek powinien być ustawiony dziobem do wiatru lub prądu

i być utrzymywany dwiema wzdłużnymi cumami (cum może być więcej, lecz nie więcej niż cztery) w miarę możliwości długimi i połączonymi razem poniżej kluz.

Podczas próby przed dokonaniem każdego odczytu wychylenie pionu należy poprawić cumy w ten sposób, aby nie przeszkadzały w swobodnym przechyle okrętu oraz uważać, aby statek nie dotykał kadłubem ściany nabrzeża, dna lub stojącego obok drugiego statku, trapy zejściowe powinny być zdjęte.

### **3.2 Przygotowanie statku do próby.**

Przed próbą przechyłów statek powinien być w miarę możliwości w pełni wyposażony, lecz niezaladowany. Całe wyposażenie oraz części zapasowe powinny znajdować się w swych miejscach przeznaczenia. Przedmioty, które mogą się przemieszczać w czasie przechyłu statku, powinny być zamocowane. Wszystkie zbiorniki wody, ciekłego balastu, oleju, paliwa (z wyjątkiem rozchodowych) i innych cieczy powinny być w zasadzie całkowicie puste.

Kotły powinny być napełnione wodą do poziomu roboczego. Jeżeli kotły są puste, to w wykazie ciężarów brakujących należy uwzględnić ciężar wody w kotłach.

Przed rozpoczęciem próby należy się upewnić, że ładownie i maszynownie są osuszone i wyczyszczone oraz, że na statku nie ma nieuwzględnionych ładunków lub innych przedmiotów.

W wyjątkowych przypadkach, gdy niemożliwe jest osuszenie poszczególnych zbiorników, należy ustalić z możliwie największą dokładnością wielkość wolnych powierzchni, a następnie uwzględnić je, przy obliczaniu wysokości metacentrycznej. Statek może mieć również całkowicie zapełnione poszczególne zbiorniki, lecz w takim przypadku należy przedsięwziąć środki wykluczające możliwość powstania „poduszek powietrznych” w zbiornikach. W zbiornikach dna podwójnego, po odpompowaniu ładunków ciężkich, należy usunąć resztki cieczy z części dna poniżej koszy ssących.

W porze zimowej próbę przechyłów można wykonać tylko w przypadku, gdy nie zachodzi obmarzanie kadłuba statku. Wstępny przechył może wynosić nie więcej niż  $0,5^\circ$ . Nie jest konieczne wyrównanie przegłębienia.

### **3.3 Ciężary przechyłowe**

Do przeprowadzenia próby przechyłów metodą przenoszenia ciężarów należy na statek przyjąć taką ich ilość, aby otrzymać wychylenia pionów odpowiadające kątom  $1-3^\circ$  w zależności od długości pionów i wielkości statków. Im dłuższe są piony i im większy jest statek tym mniejsze powinny być kąty przechyłów

podczas próby. Chodzi o to, aby wychylenie pionu „w” nie było zbyt małe, gdyż wówczas błąd względny  $\Delta w/w$  może być duży, a także, aby wpływ dodatkowej stateczności kształtu był możliwie jak najmniejszy, jeśli w obliczeniach pomija się ją. Wskazane jest, aby maksymalne wychylenie pionów było większe niż 150 mm.

Jeśli przy obliczaniu wysokości metacentrycznej przy pomocy próby przechyłów nie uwzględnia się dodatkowej stateczności kształtu, wówczas dopuszczalny kąt przechyłu w czasie próby zależy od stosunku  $h_0/r_0$ .

Z bardzo dobrym przybliżeniem, dla statku o burtach prostopadłych można napisać:

$$l = (h_0 + \frac{1}{2} r_0 \cdot \tan^2(\phi)) \sin(\phi) = (1 + \frac{1}{2} \frac{r_0}{h_0} \cdot \tan^2(\phi)) h_0 \cdot \sin(\phi)$$

Z powyższego wzoru wynika, że błąd względny wysokości metacentrycznej  $h_0$  wywołany pominięciem dodatkowej stateczności kształtu wynosi:

$$\frac{\Delta h_0}{h_0} = \varepsilon_1 = \frac{1}{2} \frac{r_0}{h_0} \tan^2(\phi) = \frac{1}{2} \frac{r_0}{h_0} \overline{(\phi)^2}$$

$\overline{(\phi)^2}$  - średni kwadrat kątów przechyłu,  $\overline{(\phi)^2} = \frac{1}{2} \cdot \phi_2^2$  ( przy 6 przechyłach)

$h_0$  - wysokość metacentryczna w czasie próby

$\phi_2$  - maksymalny kąt przechyłu w czasie próby

$r_0$  - promień metacentryczny okrętu w położeniu wyprostowanym

Aby błąd względny wysokości metacentrycznej nie był większy od zadanej wartości  $\varepsilon_1$ , dopuszczalne kąty przechyłu nie powinny być większe niż

$$\phi_2 \leq 57,3^\circ \cdot 2 \sqrt{\varepsilon_1 \cdot \frac{h_0}{r_0}} \quad (1)$$

np.:  $\varepsilon_1 = 1\%$ ,  $h_0 = 1$  [m],  $r_0 = 8$  [m]

$$\phi_2 \leq 57,3^\circ \cdot 2 \sqrt{\frac{1}{800}} \approx 4^\circ$$

Wysokości metacentryczne praktycznie nie zależą od wielkości statku, natomiast promienie metacentryczne są proporcjonalne do wielkości statku, dlatego przy tym samym

błądzie  $\varepsilon_1$  kąty przechyłu podczas próby na małym statku muszą być na ogół większe niż na statku dużym.

Jeśli w obliczeniach uwzględnia się dodatkową stateczność kształtu, wówczas praktycznie nie ma ograniczenia na kąty przechyłu, byleby przechyły były mniejsze od kąta, przy którym obło zaczyna wychodzić z wody. Jeśli w czasie próby występowałyby kąty przechyłu większe od wielkości określonej wzorem (1) wówczas konieczne należy uwzględniać dodatkową stateczność kształtu przy obliczaniu wysokości metacentrycznej (za błąd  $\varepsilon_1$  należy przyjmować wartość nie większą niż 1 %).

Jako ciężary przechyłowe muszą służyć ciężarki żeliwne, pręty rusztów, stalowe klocki, worki z piaskiem itp.

Masa poszczególnych ciężarów przechyłowych powinna być znana. Przyjęte na statek ciężary do próby przechyłów należy ułożyć na górnym pokładzie przy burtach, w czterech lub sześciu grupach, w przybliżeniu równych wagowo. Grupy należy rozłożyć symetrycznie względem środka ciężkości wodnicy statku.

### 3.4 Zbędne i brakujące ciężary na statku

Przed próbą przechyłów należy zebrać dane o zbędnych i brakujących na statku ciężarach, o ich ilości przewidzianej dla statku pustego i ich rozmieszczeniu wzdłuż, wszerz i wwyż na statku. Określenie ciężaru i miejsc rozmieszczenia ciężarów brakujących i zbędnych należy wykonać z możliwie największą dokładnością. Suma ciężarów brakujących nie powinna przewyższać 2 %, a suma ciężarów zbędnych (oprócz ciężarów przechyłowych) - 4 % ciężaru statku pustego.

### 3.5 Określenie kątów przechyłu

Do określenia kątów przechyłu można stosować piony ciężarkowe, naczynia połączone, inklinometry i inne przyrządy specjalne.

Przy zastosowaniu pionów ciężarkowych długość sznurka powinna być największa z możliwych do zastosowania na danym statku. Zaleca się, aby na większych statkach długość sznurka wynosiła nie mniej niż 4-6 m, a na małych - co najmniej 1,5 m. Ciężarek pionu ze skrzydełkami należy umieścić w podłużnym zbiorniku z wodą lub olejem, w celu szybkiego tłumienia wahań pionu. Należy stosować co najmniej 2 piony, lecz zaleca się stosować 3 piony umieszczone w różnych punktach długości statku. W pobliżu ciężarka pionu należy zamocować poziomo listwę z umieszczoną na niej podziałką do odczytywania wychyleń pionu. Już w pierwszej fazie kołysania pionu (po przechyleniu okrętu) na przygotowanym formularzu należy notować granice tych wychyleń w prawo i w lewo dla 4-5 pełnych wahań. Jako odczyt rzeczywisty należy przyjmować średnią arytmetyczną z otrzymanych tym

sposobem 8-10 zapisów granicznych wychyleń pionu. Długość pionu  $l$  jest to długość od punktu zawieszenia do podziałki, na której odczytuje się wychylenia. Dzielać wychylenie „ $w$ ” pionu przez jego długość  $l$  otrzymuje się tangens kąta przechyłu:

$$\tan\phi = \frac{w}{l} \quad (2)$$

Do dalszych obliczeń wprowadza się średnią wartość  $\tan\phi$ , otrzymaną ze wskazań wszystkich zainstalowanych pionów.

Na mniejszych okrętach, na których zainstalowanie odpowiednio długich pionów jest utrudnione, do określenia kąta przechyłu można użyć naczyń połączonych. W tym celu, po obu burtach w płaszczyźnie wręgowej okrętu ustawia się pionowo, na jednakowej wysokości, dwie rurki szklane, których dolne końce połączone są węzłem gumowym. Połączone naczynia napełniane są wodą do połowy wysokości szkieł rurek, należy przy tym zwrócić uwagę, aby przy napełnianiu wodą w węźle nie pozostały pęcherze powietrza. Wzdłuż rurek umieszcza się listwy z podziałką. Pozioma odległość między rurkami odpowiada długości pionu  $l$ , zaś suma przesunięć poziomów wody w obu rurkach - wychyleniu pionu  $w$ .

### 3.6 Pomiar zanurzenia i obliczenie wyporności

Zanurzenie statku należy dokładnie zmierzyć na początku próby, na podstawie znaków zanurzenia przy pomocy łódki. W czasie pomiarów zanurzenia małych statków (holowniki, kutry itp.) należy uważać, aby na statku znajdowała się taka sama liczba ludzi, jaka będzie na nim podczas próby. Dla ułatwienia pomiaru zanurzenia podczas lekkiego falowania zaleca się stosować rurkę szklaną otwartą z obydwu końców, z których jeden należy zanurzyć w wodzie. Oprócz pomiaru wg znaków zanurzenia należy zmierzyć wolną burtę statku na śródookręciu.

Pomiaru zanurzenia wg znaków zanurzenia i wolnej burty należy dokonywać po obydwu burtach statku i przyjmować wartości średnie, aby wyeliminować wpływ (ewentualnego) przechyłu statku.

Przy obliczaniu wyporności należy mieć na uwadze, że znaki zanurzenia umieszcza się na tylnicy i dziobnicy odmierzając je od dolnej krawędzi stępki, podczas gdy zanurzenie dla określenia wyporności odczytuje się z arkusza krzywych hydrostatycznych lub ze skali Bonjeana od płaszczyzny podstawowej kadłuba zwykle nie pokrywającej się z dolną krawędzią stępki.

Dla kontroli prawidłowości pomiarów zanurzenia należy na rysunek linii teoretycznych nanieść wodnicę wynikającą ze znaków zanurzenia oraz z wielkości wolnej burty. Przy dokładnych pomiarach obie wodnice powinny pokrywać się ze sobą. W przypadku nieznacznej rozbieżności w położeniu wodnic należy albo

przyjąć wyniki tego pomiaru, który w czasie mierzenia był bardziej dokładny, lub też przyjąć średnie położenie wodnicy. Przy większych rozbieżnościach pomiar zanurzeń należy powtórzyć.

Na statku powinien znajdować się dokument potwierdzający prawidłowość naniesienia znaków zanurzenia.

Należy również mieć na uwadze, że niektóre kadłuby mogą być wygięte; wygięcie to należy uwzględnić przy obliczaniu wyporności statku. Obliczanie wyporności należy wykonywać na podstawie skali Bonjeana, a dla statku bez przeglębienia - z arkusza krzywych hydrostatycznych. Przy nanoszeniu wodnicy na skalę Bonjeana należy również uwzględnić fakt, że znaki zanurzenia nie leżą na teoretycznych pionach kadłuba statku.

Wypór okrętu (który jest równy ciężarowi okrętu w czasie próby) oblicza się ze wzoru:

$$D = g \cdot \rho \cdot k \cdot V = M \cdot g \quad (3)$$

$\rho$ -masa właściwa wody [ $\frac{t}{m^3}$ ]

$g$ - przyspieszenie ziemskie

$k$ - współczynnik uwzględniający objętość części wystających i poszycia:

$$k=1,005+1,010$$

$V$ -wyporność kadłuba [ $m^3$ ]

$M$ -masa okrętu (modelu) [kg]

Ciężar właściwy wody należy mierzyć za pomocą areometru, pobierając próbkę wody w pobliżu burty okrętu.

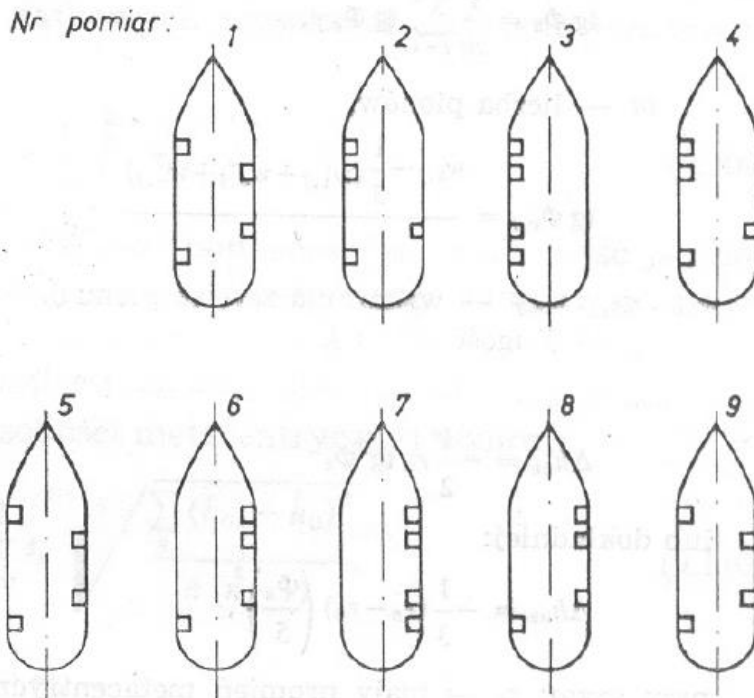
### 3.7 Wykonanie próby przechyłów

Przenoszenia ciężarów przechyłowych należy dokonywać zgodnie z rys. 1.

Każdorazowa obserwacja położenia pionów wykonywana jest na sygnał podany przez kierującego próbą, po uprzednim zajęciu przez wszystkich uczestników próby wyznaczonych miejsc i ustaleniu się położenia pionów (wahań).

Po każdym przechyle należy upewnić się, że nie działają żadne przyczyny zakłócające swobodę przechyłów, statku. Po zakończeniu danej obserwacji, do protokołów próby przechyłów należy wpisać absolutne wartości odchylenia pionów, ciężar przenoszonych ciężarów oraz ramię przeniesienia.

Po wykonaniu całej próby przechyłów, następuje opracowanie rezultatów próby, z którego otrzymuje się położenie środka ciężkości Okrętu w danym stanie obciążenia, a następnie, po uwzględnieniu ciężarów brakujących i zbędnych - w stanie pustym wyposażonym.



Rys.1

### 3.8 Opracowanie wyników próby przechyłów

Z wykonanej próby przechyłów spisywany jest protokół, którego odpis powinien być przechowywany w aktach okrętu. Do protokołu załączane są: wykaz ciężarów zbędnych i brakujących, wykazy wskazań pionów, obliczenia momentów przechylających, kątów przechyłu jak i końcowe obliczenie wysokości metacentrycznej w warunkach próby oraz położenie środka ciężkości okrętu pustego, wyposażonego.

## 4. Obliczenie wysokości metacentrycznej

Wysokość metacentryczną oblicza się dla każdego przechyłu oddzielnie zależności (4) lub (5)



$$p_i \cdot e_i \cos \phi_i = D(h_1 + \frac{1}{2}r_0 \cdot \tan^2(\phi_i)) \quad (4)$$

$$p_i \cdot e_i \cos \phi_i = Dh_1 \sin(\phi_i) \quad (5)$$

Wzór (4) uwzględnia dodatkową stateczność kształtu, wzór (5) - nie uwzględnia.

$p_i$  – przeniesiony ciężar =  $m_i \cdot g$

$m_i$  – masa przeniesionego ciężaru [kg]

$e_i$  – ramię przeniesienia

$D$  – ciężar okrętu (modelu) w czasie próby równy  $M \cdot g$

$M$  – masa okrętu (modelu) [kg]

$m_i e_i = Q_i$  – moment przeniesienia ciężaru.

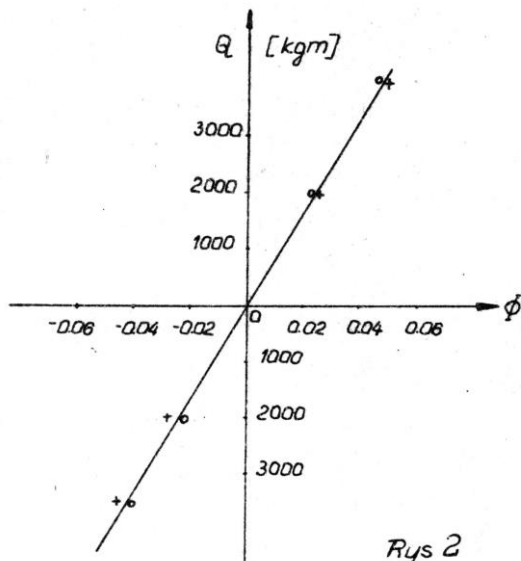
Z powyższych wzorów otrzymuje się:

$$h_i = \frac{Q_i}{M \cdot \tan \phi_i} - \frac{1}{2} r_0 \tan^2 \phi_i \quad (6)$$

$$h_i = \frac{Q_i}{M \cdot \tan \phi_i} \quad (7)$$

Obliczeń takich wykonuje się tyle, ile jest obserwacji w stanie wychylonym okrętu, czyli 6. Z reguły, z każdego obliczenia otrzyma się inną wartość wysokości metacentrycznej. W jaki sposób obliczyć wartość  $h_0$  najbardziej prawdopodobną?

W trakcie przeprowadzania próby niektóre odczyty mogą, z różnych powodów, okazać się nieprawidłowe; przy opracowywaniu wyników próby odczyty takie należy pominąć. Tego rodzaju nieprawidłowe odczyty można wyjąć drogą wykonania wykresu kontrolnego (rys. 2).



Rys 2

Wykres kontrolny należy zrobić dla każdego pionu osobno, naniesione punkty powinny leżeć na prostej przechodzącej przez początek układu. Punkty leżące daleko od prostej wskazują na nieprawidłowy pomiar.

Najbardziej prawdopodobna wysokość metacentryczna jest średnią arytmetyczną z poszczególnych obserwacji.

$$h_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (8)$$

Przepisy PRS wymagają, aby wysokość metacentryczną obliczać wg (8), tzn. przyjmować równą średniej arytmetycznej z jej wartości otrzymanych dla poszczególnych przechyłów, czyli:

$$h_0 = \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_i}{\tan \phi_i} \right) - \frac{1}{2} r_0 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tan^2 \phi_i \quad (9)$$

$$h_0 = \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_i}{\tan \phi_i} \right) \quad (10)$$

Przy wykonywaniu obliczeń  $h_0$  wystarczy jeśli  $\tan \phi_i$  obliczany jest z dokładnością do 3 miejsc znaczących. W przypadku wykonywania próby przechyłów dla modelu, stosuje się tylko jeden pion. Wówczas w powyższych wzorach za  $\tan \phi_i$  przyjmuje się  $\frac{W_i}{l}$

$W_i$  – wychylenie pionu

$l$  – długość pionu

#### 4.1 Określenie położenia środka ciężkości okrętu

Dla okrętu nie przegłębionego:

$$X_G = X_F \quad (11)$$

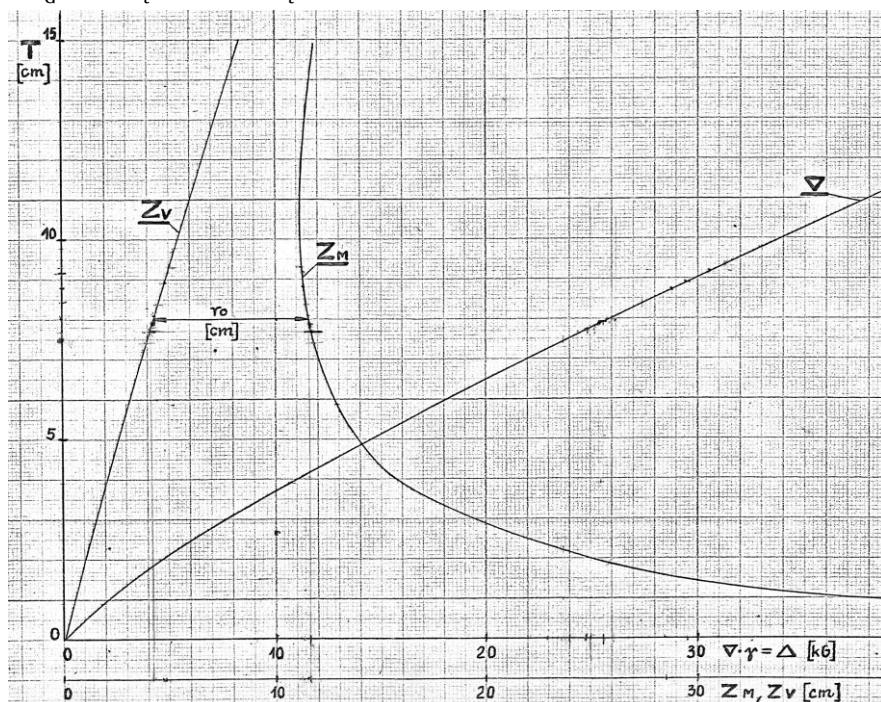
$$Z_G = Z_M - (h_0 - \Delta h_0) \quad (12)$$

$\Delta h_0$  – błąd w określeniu wysokości metacentrycznej (wzór 23 lub 24)

$X_F$  – odcięta środka wyporu

$Z_M$  – rzędna metacentryczna

$X_G$  – odcięta środka ciężkości



Rys.3. Przykładowe krzywe hydrostatyczne.

Powyższe wielkości odczytuje się z krzywych hydrostatycznych (rys.3), dla danego zanurzenia statku w chwili doświadczenia.

Określone wartości  $X_G$  i  $Z_G$  dotyczą statku (modelu) w chwili doświadczenia. Dla znalezienia położenia środka ciężkości okrętu w stanie normalnie wyposażonym lecz pustym, należy przeprowadzić korektę na zbędne oraz na brakujące na okręcie ciężary, w oparciu o dane zawarte w wykazie ciężarów brakujących i zbytecznych.

$$Z_{G0} = \frac{M \cdot Z_G + \sum m_i Z_i}{M + \sum m_i} \quad (13)$$

$$X_{G0} = \frac{M \cdot X_G + \sum m_i X_i}{M + \sum m_i} \quad (13a)$$

$M$  – masa statku w chwili próby [kg]

$X_G, Z_G$  – współrzędne środka ciężkości statku w chwili próby obliczone wg (11) i (12)

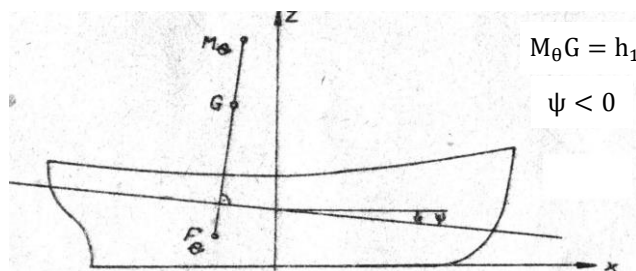
$m_i$  – masa ciężaru brakującego (+) lub zbytecznego (brana ze znakiem "-")

$X_i, Z_i$  – współrzędne środka ciężkości ciężaru  $p_i$

W przypadku modelu występują jedynie ciężary zbyteczne w postaci ciężarków przechyłowych.

#### 4.2 Uwzględnienie wpływu przegłębienia

Jeśli podczas próby przechyłów przegłębienie statku różni się o więcej niż 0,005  $L_{pp}$  od tego przegłębienia dla którego obliczono krzywe hydrostatyczne, to krzywe te nie mogą być stosowane przy opracowywaniu wyników próby przechyłów.



$M_\theta F_\theta = r_\theta = \frac{J_{x_\theta}}{V}$  – promień metacentryczny dla okrętu przegłębionego o kąt  $\theta$

$J_{x_\theta}$  – moment bezwładności przegłębionej wodnicy pywania

$V$  – wyporność statku w czasie próby

Z rysunku widać, że w przypadku okrętu przegłębionego, współrzędne środka ciężkości statku  $G$  w układzie osi  $XZ$  związanych ze statkiem należy dla warunków próby określić ze wzorów:

$$X_G = X_{F\theta} - (r_\theta - h_1)\sin\theta \quad (14)$$

$$Z_G = Z_{F\theta} - (r_\theta - h_1)\cos\theta \quad (15)$$

$X_{F\theta}, Z_{F\theta}$  – współrzędne środka wyporu okrętu przegiębionego.

Współrzędne  $X_{F\theta}$  i  $Z_{F\theta}$  oraz wyporność  $V$  należy obliczyć przy pomocy skali Bonjeana, na której wkreśla się wodnicę pływania statku podczas próby.

Promień metacentryczny  $r_\theta$  należy obliczyć przy pomocy rysunku linii teoretycznych kadłuba, na którym należy nanieść wodnicę pływania statku podczas próby. W obliczeniu należy stosować wzory:

$$J_x = \frac{4}{9} d \sum y_i^3 c_{si} \quad J_{x\theta} = \frac{J_x}{\cos\theta} = \frac{J_x}{1 - \frac{1}{2}\theta^2} \quad (16)$$

$d$  – odstęp wręgów teoretycznych

$y_i$  – rzędne wodnicy

$c_{si}$  – współczynniki Simpsona

$h_1$  – wysokość metacentryczna statku w czasie próby pomniejszona o błąd

$\Delta h_0 \rightarrow h_1 = h_0 - \Delta h_0$

$\theta$  – kąt jaki tworzy wodnica pływania z osią  $X$

### 4.3 Błąd wysokości metacentrycznej

$$h = \frac{m \cdot e \cdot l}{M \cdot w} - \frac{1}{2} \frac{J_x}{V} (\tan \phi)^2 \quad (17)$$

Systematyczny błąd przy określaniu wysokości metacentrycznej w każdej obserwacji jest równy różniczce zupełnej, przy czym różniczkowaniu podlegają jedynie wielkości, które są stałe w każdej obserwacji.

$$dh = \frac{\delta h}{\delta m} dm + \frac{\delta h}{\delta e} de + \frac{\delta h}{\delta l} dl + \frac{\delta h}{\delta M} dM + \frac{\delta h}{\delta J} dJ + \frac{\delta h}{\delta V} dV$$

Po wykonaniu działań i przyjęciu skończonych przyrostów otrzymuje się:

$$\Delta h = \frac{m \cdot e \cdot l}{M \cdot w} \left( \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) + h \frac{\Delta V}{V} + r_0 \tan^2 \phi \left( \frac{\Delta l}{l} + \frac{1}{2} \frac{\Delta J}{J} \right) \quad (18)$$

Każdą grupę ciężarów przechyłowych waży się osobno i błąd w określaniu ciężaru  $\frac{\Delta m}{m}$  zależy od czułości wagi i liczby ważeń. W niesprzyjających warunkach błąd może dochodzić do 1%.

Odległość przenoszenia ciężarów przechyłowych może być zmierzona z

dokładnością do kilku centymetrów w zależności od warunków pomiaru. Względny błąd pomiaru może wynosić

$$\frac{\Delta e}{e} = 0,5 - 1,0\%$$

Względny błąd pomiaru długości pionu  $\frac{\Delta l}{l}$  jest niewielki i można go pominąć.

$\frac{\Delta \rho}{\rho}$  - względny błąd określenia masy właściwej wody.

Względny błąd określenia wyporności wynosi:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{S \cdot \Delta T}{V}$$

S - powierzchnia wodnicy

$\Delta T$  - błąd pomiaru zanurzenia; nie powinien przekraczać 0,5 cm w przypadku statku rzeczywistego.

Jeśli obliczony błąd jest mniejszy od 0,4% należy jednak przyjąć  $\frac{\Delta V}{V} = 0,4\%$  gdzie jest to dokładność, z jaką można określić wyporność z rysunku teoretycznego.

$\Delta J$  - błąd określenia momentu bezwładności wodnicy - przyjmujemy go równy zero.

Ostatecznie wzór (17) ma postać następującą:

$$\Delta h_i = \frac{1}{M} \frac{Q_i}{\tan \phi_i} \left( \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) + h_i \frac{\Delta V}{V} \quad (19)$$

Wzór (19) określa błąd dla jednej obserwacji. Błąd wysokości metacentrycznej określonej wzorem (8) jest średnią arytmetyczną poszczególnych błędów. Stąd

$$\Delta h_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i$$

$$\Delta h_0 = \frac{1}{M} \left( \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{\tan \phi_i} + h_0 \frac{\Delta V}{V} \quad (20)$$

W przypadku nieuwzględnienia dodatkowej stateczności kształtu błąd  $\Delta h_0$  wynosi:

$$h_0 = \left( \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{1}{2} \frac{r_0}{h_0} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tan^2 \phi_i \right) \cdot h_0 \quad (21)$$

Ostatni człon we wzorze (21) jest tzw. błędem wzoru metacentrycznego.

W przypadku wykonywania próby przechyłów dla modelu, ciężar modelu

określa się zwykle nie poprzez pomiar zanurzenia modelu lecz przez bezpośrednie ważenie modelu na wadze. W tym przypadku jest:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 0 \quad \frac{\Delta M}{M} = \frac{\Delta V}{V} \quad \Delta e = 1 \text{ mm}$$

$\Delta M = 0.2 \text{ kg}$  - dokładność ważenia na dużej wadze uchylniej do 200 kg

$\frac{\Delta m}{m}$  - błąd względny ważenia wszystkich ciężarków balastowych  $\Delta m = 2 \text{ g}$ .

Ze względu na niemożliwość zastosowania długiego pionu na modelu (zwykle długość masztu do zawieszenia pionu nie przekracza 1 m) wskazane jest, aby kąty przechyłu modelu podczas próby były 2-3 krotnie większe niż na statku, aby wychylenia pionu  $w_i$  nie były przesadnie małe, gdyż wówczas jest mała dokładność w określaniu wychyleń pionu. Oczywiście w takim przypadku koniecznie trzeba uwzględniać w obliczeniach dodatkową stateczność kształtu.

Każda wielkość określona doświadczalnie jest wielkością losową, czyli zmienną losową. Oznacza to, że przy powtarzaniu doświadczenia uzyskuje się inne wyniki, mniej lub bardziej różniące się między sobą, mimo że określana jest ta sama wielkość, która nie ulega zmianie. Powodem jest wpływ /losowy/ zakłóceń, od których nigdy nie można całkowicie odizolować doświadczenia. Jednakże uzyskiwane wyniki będą oscylowały wokół pewnej wartości średniej (dokładnej) z większym lub mniejszym rozrzutem. Im doświadczenie jest staranniej przeprowadzane tym coraz bardziej uzyskiwane wyniki są skupione wokół wartości średniej (rozrzut wyników jest coraz mniejszy).

Wysokość metacentryczna obliczana jako średnia arytmetyczna poszczególnych oscyluje wokół nieznannej wartości dokładnej wg rozkładu normalnego o odchyleniu standardowym

$$\sigma_{\bar{h}_0} \equiv \varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_0)^2}{n(n-1)}} \quad (22)$$

Przy obliczaniu błędu  $\Delta h_0$  wielkość  $\varepsilon$  obliczoną wg (22) należy dodać do wartości  $\Delta h_0$  obliczonej wg wzoru (20) lub (21). Ostatecznie otrzymuje się:

$$\Delta h_0 = \frac{1}{M} \left( \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{\tan \phi_i} + h_0 \frac{\Delta V}{V} + \varepsilon \quad (23)$$

$$\Delta h_0 = \left( \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{1}{2} \frac{r_0}{h_0} \overline{\phi^2} \right) h_0 + \varepsilon \quad (24)$$

Do obliczeń położenia środka ciężkości należy przyjąć wysokość metacentryczną  $h_1 = h_0 - \Delta h_0$ .

#### 4.4 Określenie okresu poprzecznego kołysania statku

Określenie okresu poprzecznego kołysania statku zaleca się wykonywać przy każdej próbie przechyłów, a dla statków, które w warunkach próby przechyłów mają wyporność mniejszą niż 300 ton, określenie okresu kołysania jest obowiązkowe.

Podstawowym środkiem do określania okresu kołysania jest zapis wygasających kołysań statku dokonywany za pomocą żyroskopowych przechyłomierzy lub inklinometrów wyposażonych w podstawę czasową. W przypadku braku tych przyrządów czas kołysań można mierzyć sekundomierzami w liczbie nie mniejszej niż 3 okresy. Statek należy rozkołysać przy pomocy załogi, przebiegającej z burty na burtę, lub też przez gwałtowne postawienie ciężaru na burcie.

Jako okres kołysania należy przyjąć średnią arytmetyczną z możliwie dużej liczby kołysań statku.

Przy określaniu okresu kołysania zaleca się odprowadzić statek od brzegu lub choćby postawić go prostopadle do niego, w miarę możliwości na głębokiej wodzie i w pewnej odległości od innych statków.

Okres kołysań własnych wyraża się wzorem:

$$T_\phi = 2\pi \sqrt{\frac{J_x(1+k_{xx})}{D \cdot h_0}} \quad (25)$$

Z pomiaru tego można wyznaczyć moment bezwładności masy okrętu (modelu) względem osi wzdłużnej wraz z masą wody towarzyszącej.

W przypadku modelu, pomiar należy wykonać bez ciężarków przechylających. Moment bezwładności można wyrazić przy pomocy promienia bezwładności masy  $\varrho_\phi$

$$J_x(1+k_{xx}) = \frac{D}{g} \varrho_\phi^2 \quad (26)$$



Stosując to wyrażenie we wzorze (25) otrzymamy, że

$$T_{\phi} = 2\pi \frac{\rho_{\phi}}{\sqrt{gh_0}} \Rightarrow \rho_{\phi} = \frac{1}{2\pi} T_{\phi} \sqrt{gh_0} \quad (27)$$

#### 4.5 Określenie nośności statku

Ostatecznym wynikiem próby przechyłów jest określenie:

- ciężaru statku pustego  $D_0$ ;
- współrzędnych środka ciężkości okrętu pustego  $X_C$  i  $Z_C$

Dane te umożliwiają określenie stateczności statku w dowolnym stanie załadowania a ponadto także określenie nośności statku, które ma moc prawną tzn. stanowi podstawę ewentualnych roszczeń armatora w stosunku do stoczni, w przypadku nie dotrzymania planowanej nośności statku.

$$P_N = D_{max} - D_0 \quad (28)$$

$P_N$  – nośność statku;

$D_{max}$  – wypór statku przy zanurzeniu konstrukcyjnym;

$D_0$  – ciężar statku pustego.

#### 4.6 Określenie ilości ciężarów przechylających (przykład)

Statek w czasie próby ma wyporność  $M = 5000$  ton. Długości pionów wynoszą  $l_1 = 4$  m,  $l_2 = 5$  m i  $l_3 = 6$  m. Szerokość statku  $B = 15,0$  m, promień metacentryczny  $r_0 = 5,0$  m, przybliżona wartość wysokości metacentrycznej statku pustego określona na podstawie projektu  $h_0 \approx 0,9$  m. Określić orientacyjną ilość ciężarów balastowych  $p$  potrzebnych do próby przechyłów powyższego statku.

Maksymalny kąt przechyłu statku  $\phi_2$  w czasie próby powinien spełniać następującą relację:

$$\phi_2 min \leq \phi_2 \leq \phi_2 max$$

$$\frac{w_2 min}{l} \leq \frac{p \cdot e}{2 \cdot D \cdot h_0} \leq 2 \sqrt{\varepsilon_1 \frac{h_0}{r_0}}$$

Zaleca się, aby:

$$w_{2\min} = 150 \text{ mm}$$

$$e \approx B$$

$\varepsilon_1$  - błąd wzoru metacentrycznego

$l$  – umowna długość pionu

$$\frac{300 \text{ mm}}{l} \frac{h_0}{B} \leq \frac{p}{D} \leq 4 \sqrt{\varepsilon_1 \frac{h_0}{r_0} \cdot \frac{h_0}{B}} \quad (29)$$

Wskazane jest, aby lewa strona nierówności (29) była zawsze spełniona, natomiast jeśli prawa strona powyższej nierówności nie zachodzi przy założonym błędzie  $\varepsilon_1$ , wówczas w obliczeniach wysokości metacentrycznej  $h_0$  trzeba uwzględnić dodatkową stateczność kształtu. Z nierówności (29) wynika, że ze wzrostem wielkości statku iloraz  $p/D$  maleje.

Umowna długość pionów  $l$  jest to taka jednakowa długość wszystkich pionów, które dają taką samą dokładność pomiaru  $\tan\Phi$  jak piony o różnych długościach. Łatwo jest wykazać, że długość umowna  $l$  pionów jest średnią harmoniczną długości pionów

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{l_i} \quad (30)$$

W mniej dokładnych obliczeniach można przyjmować za  $l$  długość najkrótszego pionu.

$$l = \min l_i$$

W powyższym przykładzie mamy:

$$\frac{3}{l} = \frac{\frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6}}{0,6}$$

stąd  $l = 4,87 \text{ m}$

Przyjmując błąd wzoru metacentrycznego  $\varepsilon_1 = 1\%$  otrzymuje się z nierówności (29)

$$\frac{300}{4870} \cdot \frac{0,9}{15} \leq \frac{p}{D} \leq 4 \sqrt{0,01 \cdot \frac{0,9}{5} \cdot \frac{0,9}{15}}$$

$$0,37\% \leq \frac{p}{D} \leq 1,02\% \quad \frac{p}{D} = \frac{m}{M}$$

---

$$18,5 \leq m \leq 50$$

Do próby przechyłów powinny być użyte ciężary balastowe o sumarycznej masie od 19 do 50 ton.

## 5. Wykonanie ćwiczenia i opracowanie wyników

Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy zanotować:

- wymiary główne modelu: L, B, H;
- dane o ciężarkach przechylających (wymiar, masę oraz ich ilość);
- długość pionu,

oraz określić wyporność M modelu poprzez jego zważenie. Następnie model ustawiamy na wodzie i sprawdzamy czy pływa na równej stępce i bez przechyłu. Jeśli nie pływa - wówczas ciężary balastowe należy przesunąć i zlikwidować zarówno przechył jak i przegłębienie.

Dla każdej obserwacji jak na rys. 1 należy zanotować wychylenie pionu " $w_i$ " i masę ciężarków przechylających rozumianą jako różnica mas ciężarków z obu burt modelu. W położeniu nr 1, 5 i 9 wychylenie pionu powinno być równe zero a przechyły na lewą i prawą burtę powinny być jednakowe. Jeśli nie są - oznacza to, że wewnątrz modelu jest woda.

Po wykonaniu pomiarów przechyłów należy następnie zmierzyć okres własny kołysań bocznych, przez pomiar możliwie dużej ilości okresów kołysań modelu bez ciężarków przechylających.

Przed przystąpieniem do opracowania wyników należy:

- wykonać wykres  $Q = f(\tan\phi)$  jak na rys.2;
- z krzywych hydrostatycznych odczytać promień metacentryczny  $r_0$ , rzędną metacentrum  $Z_M$ , następnie należy obliczyć:
- wysokość metacentryczną  $h_0$  (tabelarycznie) z uwzględnieniem dodatkowej stateczności kształtu wg wzoru (6) i (8).
- błąd  $\Delta h_0$  wg wzoru (23);
- współrzędne środka ciężkości modelu bez ciężarków przechylających;
- bezwymiarowy promień bezwładności masy modelu  $\rho_\phi$  bez ciężarków przechylających.

## Wzór tabelki

Lp.	$e_i$	$m_i$	$Q_i = e_i \cdot m_i$	$\tan\phi_i = w_i/l$	$Q_i/\tan\phi_i$	$\tan\phi_i^2$	$h_i$	$(h_i-h_0)^2$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
					$\sum \frac{Q_i}{\tan\phi_i}$		$\sum h_i$	$\sum (h_i - h_0)^2$

**6. Pytania sprawdzające**

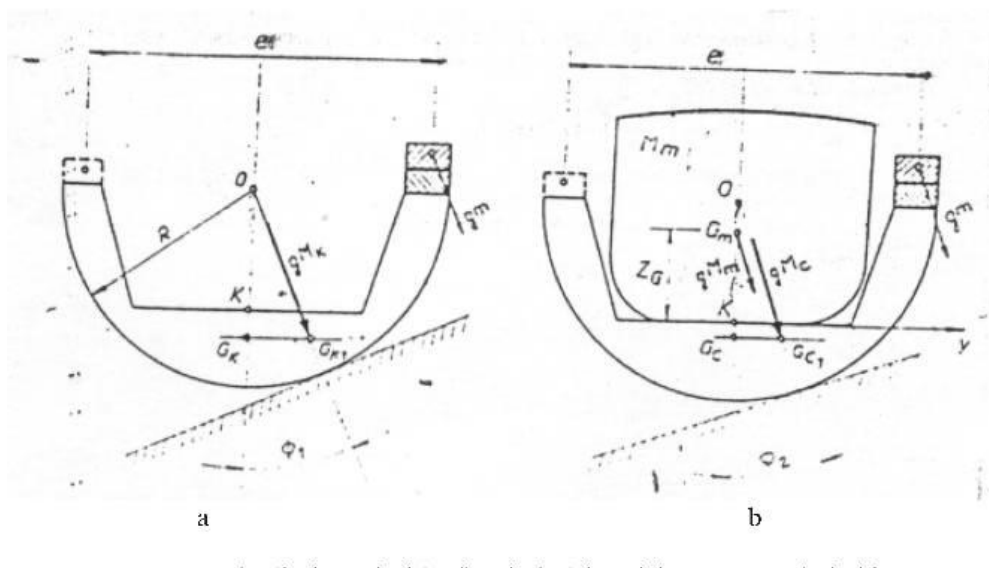
- 1) Jakie są cele próby przechyłów i na czym ona polega. Wyjaśnić podstawy teoretyczne.
- 2) Kto i kiedy przeprowadza próbo przechyłów?
- 3) W jaki sposób określa się dokładnie nośność wybudowanego statku?
- 4) Jakie dokumenty statku potrzebne są w czasie próby przechyłów?
- 5) W jaki sposób określa się kąty przechyłu statku w czasie próby przechyłów?
- 6) W jaki sposób określa się ciężar okrętu pustego a jak ciężar modelu?
- 7) W jaki sposób określa się współrzędne środka ciężkości okrętu pustego?
- 8) Dlaczego nie wystarczy wykonanie jednego pomiaru okrętu przechylonego do określenia wysokości metacentrycznej lecz trzeba wykonywać kilka pomiarów.

**7. Literatura**

- 1) "Zbiór zadań z teorii okrętu" - oz. I PWH 1962.
- 2) J. Staliński - "Teoria okrętu" Wyd. Morskie, Gdynia 1961.
- 3) J. Kaźmierczak - "Pływerność i stateczność okrętu" Wyd. Komunikacyjne, Warszawa 1954.
- 4) PRS - "Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich Gdańsk 1970.

## 8. Doświadczalne określenie położenia środka ciężkości modelu - próba przy użyciu kołyski kołowej

Metoda ta polega na przechylaniu modelu na równym i twardym podłożu za specjalnej kołysce i pomiarze kąta przechyłu wywołanego znanym momentem. Schemat postępowania wyjaśnia rys. 5.



Rys. 5. Określanie rzędnej środka ciężkości modelu za pomocą kołyski.

Płozy kołyski stanowią łuk koła o środku w punkcie  $O$ . Kołyska wyposażona jest w przechyłomierz i dwa ciężarki przechylające o jednostkowej masie. W położeniu początkowym ( $\Phi = 0$ ) ciężarki umieszczone są symetrycznie po obu stronach - środek masy leży w płaszczyźnie symetrii.

W pierwszym etapie pochyla się samą kołyskę, przenosząc jeden z ciężarków na drugą stronę i mierzy kąt  $\Phi_1$ , w położeniu równowagi. Zgodnie ze schematem rys. 5a środek masy kołyski przesunie się o odcinek:

$$\overline{G_K G_{K_1}} = \frac{m \cdot e}{M_K} \quad (8.1)$$

czyli odległość środka masy od punktu 0 wyniesie:

$$\overline{OG_K} = \frac{m \cdot e}{M_K} \frac{1}{\tan \Phi_1} \quad (8.2)$$

gdzie:

$m$  – masa pojedynczego ciężarka;

$M_K$  – masa kołyski wraz z ciężarkami;

$e$  – odległość przemieszczenia ciężarka.

Następnie umieszcza się model na kołysce i powtarza operacje (rys.5b), uzyskując w analogiczny sposób odległość środka masy układu od punktu 0:

$$\overline{OG_C} = \frac{m \cdot e}{M_C} \frac{1}{\tan \Phi_2} \quad (8.3)$$

gdzie:

$M_C = M_K + M_m$  – masa modelu wraz z kołyską;

$G_C$  – środek masy układu.

Z równania momentów względem dowolnego bieguna, np.0, można znaleźć odcinek  $\overline{OG_m}$  :

$$\overline{OG_m} = \frac{\overline{OG_C} \cdot M_C - \overline{OG_K} \cdot M_K}{M_m} \quad (8.4)$$

a po podstawieniu (8.2) i (8.3) do (8.4) otrzymujemy:

$$\overline{OG_m} = \frac{m \cdot e}{M_m} \left( \frac{1}{\tan \Phi_2} - \frac{1}{\tan \Phi_1} \right) \quad (8.5)$$

Ostatecznie, szukana rzędna środka masy modelu wynosi:

$$z_G = \overline{OK} - \overline{OG_m} = \overline{OK} - \frac{m \cdot e}{M_m} \left( \frac{1}{\tan \Phi_2} - \frac{1}{\tan \Phi_1} \right) \quad (8.6)$$

gdzie:

$\overline{OK}$  ,  $e$ ,  $m$  – dane kołyski