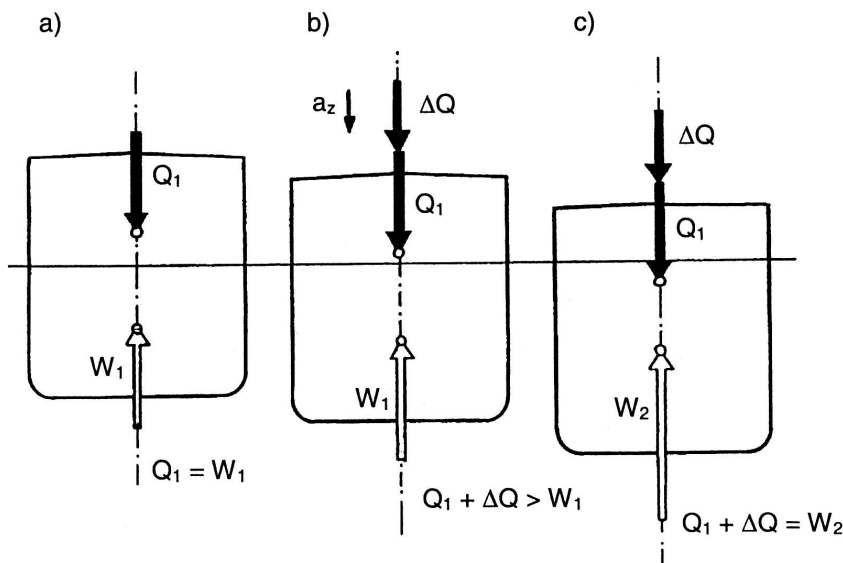


natomiast wypór jednostki podzielony przez to samo przyspieszenie daje wyporność, czyli masę wody wypartej przez podwodną część kadłuba:

$$D[t] = \frac{W[N]}{g \left[ \frac{m}{s^2} \right]}.$$

Z równania równowagi sił wynika więc równość wyporności i masy statku w każdym jego stanie:

$$D(T) = m_{ST}.$$



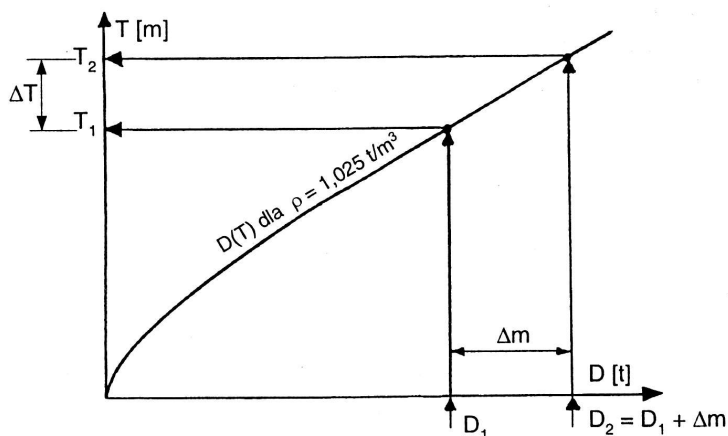
**Rys. 47.** Równowaga stała statku nawodnego w kierunku pionowym: a) stan początkowy, b) chwilowa nierównowaga po przyłożeniu dodatkowej pionowej siły, c) nowy stan równowagi;  $a_z$  – przyspieszenie pionowe

Przyrost (spadek) zanurzenia statku  $\Delta T$  wywołany niewielkim wzrostem (lub zmniejszeniem) jego masy można szybko określić na podstawie danych hydrostatycznych. Dla początkowego zanurzenia jednostki odczytuje się z tych danych (tabel lub krzywych) przyrost wyporności na jednostkę zanurzenia (najczęściej na 1 cm – **TPC**). Wzrost zanurzenia wylicza się z zależności:

$$\Delta T [m] = T_2 - T_1 = \frac{\Delta m [t]}{100 \left[ \frac{cm}{m} \right] \cdot TPC \left[ \frac{t}{cm} \right]},$$

gdzie  $\Delta m [t]$  – zmiana masy statku.

Duże zmiany masy jednostki, gdy użycie TPC wyznaczonego dla początkowego zanurzenia może skutkować dużymi błędami, należy uwzględnić w następujący sposób: początkowa masa statku  $m_1$  i jego masa po zmianie  $m_2 = m_1 + \Delta m$  równe są odpowiednio początkowej i końcowej wyporności jednostki:  $D_1$  i  $D_2$ . Z danych hydrostatycznych dla tych wyporności należy odczytać odpowiadające im zanurzenia  $T_1$  i  $T_2$ . Taki sposób wyznaczania zmiany zanurzenia statku przy dużych zmianach jego masy jest pokazany na rysunku 48.



Rys. 48. Wyznaczanie zmiany zanurzenia statku po przyjęciu dodatkowej masy:  $\Delta m$  – zmiana masy statku wywołana przyjęciem dodatkowej masy,  $\Delta T$  – zmiana zanurzenia statku

### 10.3. Zapas pływalności i przepisy wolnej burty

W warunkach awaryjnych (np. uszkodzenie poszycia statku i zalanie wodą zaburtową części jego przedziałów) całkowita masa jednostki może znacznie wzrosnąć, dlatego powinna dysponować **zapasem pływalności**. Miarą tego zapasu jest wysokość burty kadłuba wystająca ponad wodę w eksploatacyjnych stanach statku. Tę wysokość nazywa się **wolną burtą**.

W celu podwyższenia bezpieczeństwa statków Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO – *International Maritime Organization*) wymaga, by każda jednostka morska o długości powyżej 24 m, oprócz okrętów wojennych i rybackich, w czasie całego rejsu miała określoną przepisami minimalną wolną burtę [14].

Wymagania dotyczące: wielkości wolnej burty, konstrukcji statków, otworów w ich kadłubach i pokładach, zamknięć tych otworów, oznaczania dopuszczalnych zanurzeń na burtach statków, certyfikatów wolnej burty oraz okresowych kontroli stanu statków pod względem zabezpieczenia ich zapasów pływalności, podane są w przepisach Międzynarodowej Konwencji o Liniach

Ładunkowych (ICLL – *International Convention on Load Lines*) z 1966 roku [14]. Według tych przepisów minimalna wolna burta zależy od: typu statku, jego długości  $L$  (zdefiniowanej w przepisach Konwencji) oraz od kształtu kadłuba i wielkości nadbudowy. Wzmiankowane przepisy, popularnie zwane przepisami wolnej burty, rozróżniają dwa typy statków:

- **A** – statki przeznaczone do przewozu ładunków płynnych, o ciągłym, wytrzymałym i szczelnym pokładzie górnym, z małymi otworami w pokładzie, które są zaopatrzone w zrębnice o wymaganej wysokości i zamykane wytrzymałymi, szczelnymi pokrywami, zaopatrzonymi w uszczelki i dociskany mechanicznie do kołnierzy zrębnic,
  - **B** – pozostałe statki, niespełniające wymagań stawianych statkom typu **A**.
- Dla statków typu **A** wolna burta jest mniejsza niż dla jednostek typu **B**.

Wyciąg z tabeli wyznaczania wielkości wolnej burty, w zależności od typu i długości statku, zawartej w przepisach Konwencji, podany jest w załączniku 5.

Definicję długości statku –  $L$ , według przepisów Konwencji, przytoczono w rozdziale 5 skryptu.

**Minimalną wolną burtą** statku nazywa się odległość mierzoną w pionie, w połowie długości statku, od **linii pokładu wolnej burty** do wodnicy dopuszczalnego zanurzenia jednostki latem w wodzie morskiej, zwanej **letnią linią ładunkową**. Ze względu na występujące w warunkach rzeczywistych różnice w gęstościach wody na różnych akwenach i w różnych porach roku, zależne od jej temperatury i zasolenia, wprowadzono **dotatkowe linie ładunkowe**, umożliwiające kontrolę stanów załadowania statku w innych warunkach niż latem w wodzie morskiej: zimą, zimą na Północnym Atlantyku, w tropikach oraz w słodkiej wodzie.

**Pokładem wolnej burty** jest szczelny, ciągły pokład, do którego doprowadzone są wszystkie grodzie wodoszczelne statku. Gdy na jednostce jest kilka pokładów spełniających te wymagania, jako pokład wolnej burty przyjmowany jest najwyższy z nich, ale na wniosek armatora statku może nim być jeden z niższych pokładów.

Minimalna wolna burta rośnie wraz z długością statku. Wyznaczoną z tabeli wolną burtę statku koryguje się poprzez wprowadzenie poprawek, zależnych między innymi od:

- współczynnika pełnotliwości kadłuba –  $\delta$ ,
- dziobowego i rufowego wzniosu górnego pokładu,
- wypukłości górnego pokładu,
- długości i szerokości szczelnej nadbudowy na kadłubie.

Wolną burtę po takiej korekcie, jako **rzeczywistą minimalną wolną burtę** danej jednostki, nanosi się w sposób trwały, na obu burtach statku w połowie jego długości. Oznaczenie wolnej burty jednostki składa się z trzech elementów: linii pokładu, koła Plimsola i dodatkowych linii ładunkowych.

**Linia pokładu wolnej burty** jest to gruba (minimum 25 mm), trwale naniesiona na burcie linia o minimalnej długości 300 mm, której górna krawędź pokrywa się z punktem przecięcia się górnej powierzchni poszycia pokładu wraz z ewentualnym jego pokryciem z wewnętrzną powierzchnią poszycia burty, wyznaczonym w połowie długości statku.

**Koło Plimsola** składa się z okręgu o zewnętrznej średnicy minimum 300 mm, wykreślonego linią o grubości nie mniejszej niż 25 mm i poziomej linii (o długości i grubości nie mniejszych niż odpowiednio 450 mm i 25 mm). Górna krawędź tej linii przechodzi przez środek okręgu i oznacza dopuszczalne zanurzenie statku latem w wodzie morskiej.

**Dodatkowe linie ładunkowe** oznaczają linie dopuszczalnych zanurzeń statku w wodzie morskiej: zimą, zimą na północnym Atlantyku (dla statków o długości do 70 m), w tropiku oraz w wodzie słodkiej i w wodzie słodkiej w tropiku, a także dopuszczalne zanurzenie statku latem w wodzie morskiej.

Po bokach koła Plimsola umieszczone są litery oznaczające instytucję wyznaczającą i kontrolującą wolną burtę, zwykle jest to towarzystwo klasyfikacyjne nadzorujące budowę i eksploatację statku. Przykładowe symbole takich towarzystw przedstawiono niżej:

- **L/R** – Lloyd Register of Shipping (W. Brytania),
- **B/V** – Bureau Veritas (Francja),
- **G/L** – Germanischer Lloyd (RFN),
- **N/V** – Det Norske Veritas (Norwegia),
- **A/S** – American Bureau of Shipping (USA),
- **M/R** – Morskoj Registr (Rosja),
- **P/R** – Polski Rejestr Statków (Polska).

Przy dodatkowych liniach ładunkowych naniesione są ich oznaczenia:

- **S (L)** – *summer* (lato) – woda morska,
- **W (Z)** – *winter* (zima) – woda morska,
- **WNA (ZAP)** – *winter North Atlantic* (zima Atlantyk Północny) – woda morska,
- **T (T)** – *tropic* (tropik) – woda morska,
- **F (S)** – *fresh* (słodka) – woda słodka,
- **FT (TS)** – *fresh tropic* (słodka tropik) – woda słodka.

Symbole w nawiasach nanoszone są na statkach nadzorowanych przez PRS.

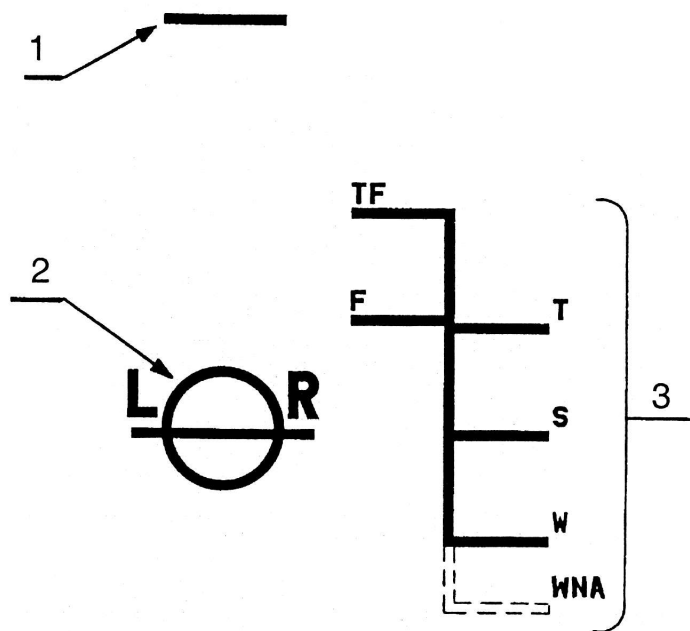
Komplet znaków wolnej burty przedstawia rysunek 49.

Każdy statek morski, podlegający Konwencji o Liniach Ładunkowych, musi mieć aktualny **certyfikat** (świadcstwo) **wolnej burty**, wystawiony przez wyznaczającego wolną burtę uprawnionego inspektora instytucji nadzorującej (towarzystwa klasyfikacyjnego). Jest on ważny pięć lat, ale co roku przeprowadzana jest **inspekcja wolnej burty**, odnotowywana na certyfikacie.

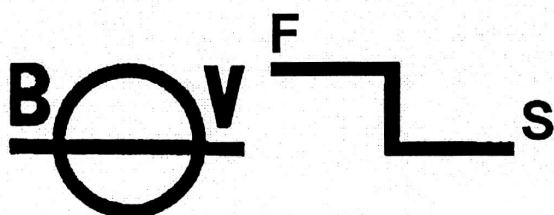


Certyfikat wolnej burty statku towarowego prezentowany jest w załączniku 6.

Na podstawie wniosku armatora, na statku o kilku pokładach wolna burta może być wyznaczona względem niższego pokładu niż najwyższy, o ile jest on ciągły i szczelny. Określa się takie jednostki jako statki z **powiększoną wolną burtą**, a ich dopuszczalne zanurzenie jest mniejsze, niż gdyby wyznaczono je względem górnego pokładu. Taką zwiększoną wolną burtę stosuje się na statkach wożących lekkie ładunki, wypełniające przestrzeń ładunkową, ale mające sumarycznie małą masę. Ogranicza to dopuszczalną nośność jednostki (i tak niewykorzystywaną przy transporcie lekkich ładunków), lecz zarazem wpływa na obniżenie pojemności rejestrowej netto, od której pobierane są niektóre opłaty. Powiększoną wolną burtę powinny mieć w myśl przepisów Konwencji statki pasażerskie i żaglowce. Statki z powiększoną wolną burtą mają odmienne oznakowanie niż prezentowane na rysunku 49, oprócz linii pokładu wolnej burty i koła Plimsola mają bowiem naniesioną wyłącznie linię ładunkową dla wody słodkiej (rys. 50). Na wspomnianych statkach można zmniejszyć wielkość wolnej burty aż do minimalnej dla danego typu i długości, ale trzeba uzyskać nowy certyfikat i nanieść nowe oznakowania na burtach. Możliwa jest też operacja odwrotna – przejście z normalnej na powiększoną wolną burtę. Przepisy Konwencji ograniczają możliwość częstych zmian wolnej burty, można to czynić nie wcześniej niż po upływie roku od poprzedniej zmiany.



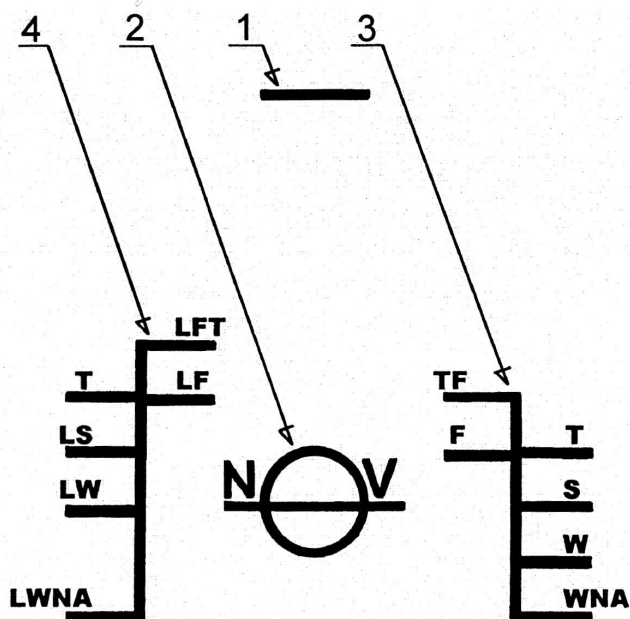
**Rys. 49.** Znaki wolnej burty; 1 – linia pokładu wolnej burty, 2 – koło Plimsola, 3 – dodatkowe linie ładunkowe



Rys. 50. Oznakowanie statku z powiększoną wolną burką

Drewnowce, na czas podróży z pokładowym ładunkiem drewna, mogą zanurzać się głębiej niż inne jednostki typu **B** o takich samych długościach. Na burtach drewnowców naniesione są dodatkowe linie ładunkowe, ważne podczas podróży z drewnem na pokładzie. Na tych statkach w trakcie podróży bez pokładowego ładunku drewna obowiązują zwykłe linie ładunkowe.

Oznakowanie wolnej burty drewnowca prezentuje rysunek 51.



Rys. 51. Oznakowanie wolnej burty dla drewnowca: 1 – linia pokładu wolnej burty, 2 – koło Plimsola, 3 – dodatkowe linie ładunkowe, obowiązujące na statku bez pokładowego ładunku drewna, 4 – dodatkowe linie ładunkowe („drzewne”) dla statku z pokładowym ładunkiem drewna. Oznaczenia „drzewnych” linii ładunkowych: **LFT** – *lumber, tropic, fresh* (drewno, tropik, woda słodka), **LF** – *lumber, fresh* (drewno, woda słodka), **LT** – *lumber, tropic* (drewno, tropik, woda morska), **LS** – *lumber, summer* (drewno, lato, woda morska), **LW** – *lumber, winter* (drewno, zima, woda morska), **LWNA** – *lumber, winter North Atlantic* (drewno, zima Północny Atlantyk)

Oprócz zapewnienia zapasu pływalności przepisy wolnej burty zawierają szereg wymagań dotyczących:

- rozmieszczenia i zamknięć otworów w kadłubach, pokładach i grodziach,
- wysokości zrębnic otworów lukowych,
- wysokości umieszczenia wylotów i zamknięć rurociągów wentylacyjnych i odpowietrzających wnętrze statku oraz rurociągów poboru powietrza,
- usytuowania i konstrukcji drzwi prowadzących do nadbudowy (do nadbudówek i pokładówek) oraz wysokości ich progów.

## **11. WYZNACZANIE WYPORNOŚCI STATKU I MASY ŁADUNKU NA PODSTAWIE ZANURZEŃ**

Znajomość praw rządzących pływalnością statków pozwala na eksperymentalne wyznaczenie takich parametrów statku, jak na przykład jego wyporności lub masy ładunku załadowanego na statek, ewentualnie wyładowanego ze statku. Czyni się to na podstawie obserwacji zanurzeń rzeczywistych statku, odczytywanych na jego znakach zanurzeń, oraz wykorzystania jego danych hydrostatycznych.

W celu uzyskania zadowalającej dokładności takiego eksperymentalnego określania parametrów statku czy ładunku konieczne jest spełnienie wielu wymogów dotyczących: dokładności operacji pomiarowych i obliczeniowych, odpowiedniego przygotowania jednostki i stosowania dobrej jakości przyrządów pomiarowych. Wymienione wymagania są szczegółowo opisane w publikacji Komitetu Ekonomicznego ONZ [2, 22]. Wyporność jednostki wyznacza się na podstawie danych hydrostatycznych statku nieprzeglębionego, czyli dokumentu, który zawsze jest dostępny na statkach morskich.

Poniżej opisano kolejno procedury (czynności i obliczenia) pozwalające na dokładne wyznaczenie wyporności jednostki na podstawie odczytanych zanurzeń na znakach.

I. Obliczenie średnich arytmetycznych z zanurzeń dziobu, śródokręcia i rufy odczytanych na znakach, na lewej i prawej burcie –  $T_{DZ}$ ,  $T_{OZ}$ ,  $T_{RZ}$ .

II. Wyznaczenie zanurzeń na pionach dziobowym, rufowym i na owrężu, za pomocą dostępnej na statku metody przejścia z zanurzeń na znakach na zanurzenia na pionach.

III. Obliczenie średniej ważonej z zanurzeń statku na pionach i owrężu –  $T_{SS}$ . Ta średnia nazywana jest również zanurzeniem średnim ze średnich.

Zwykle stosowany jest następujący wzór:

$$T_{SS} = \frac{T_D + 6 \cdot T_O + T_R}{8}.$$

Duży udział zanurzenia na śródkręciu w średniej ważonej z zanurzeń statku pozwala uwzględnić odkształcenie jego kadłuba.

IV. Z danych hydrostatycznych statku nieprzegłębionego (z tabel lub krzywych) dla  $T_{SS}$  odczytuje się pierwsze przybliżenie wyporności jednostki  $D_1$  oraz:

- odcietą środka powierzchni wodnicy –  $x_{SO}$ ,
- przyrost wyporności na 1 cm wzrostu zanurzenia – TPC (lub na 1 m czy 1 cal),
- jednostkowy moment przegłębiający dla zanurzenia mniejszego i większego o  $0,5 \cdot \Delta T$  od zanurzenia  $T_{SS}$  –

$$M_J(T_{SS} - 0,5 \cdot \Delta T) \text{ i } M_J(T_{SS} + 0,5 \cdot \Delta T),$$

(gdy jest to możliwe, przyjmuje się  $\Delta T = 1 \text{ m}$ ) –

$$M_J(T_{SS} - 0,5 \text{ m}) \text{ i } M_J(T_{SS} + 0,5 \text{ m}).$$

V. Oblicza się przegłębienie jednostki:

$$t = 0,5 \cdot (T_D + T_R).$$

VI. Według poniżej przedstawionych formuł obliczane są: pierwsza poprawka wyporności na przegłębienie jednostki

$$\Delta D_1 = 100 \cdot \text{TPC} \cdot x_{SO} \cdot \frac{t}{L_{PP}},$$

oraz druga poprawka wyporności na przegłębienie

$$\Delta D_2 = 0,5 \cdot \frac{t^2}{L_{PP}} \cdot \frac{M_J(T_{SS} + 0,5 \cdot \Delta T) - M_J(T_{SS} - 0,5 \cdot \Delta T)}{\Delta T}$$

$$\text{lub} \quad \Delta D_2 = 0,5 \cdot \frac{t^2}{L_{PP}} \cdot \frac{M_J(T_{SS} + 0,5 \text{ m}) - M_J(T_{SS} - 0,5 \text{ m})}{1 \text{ m}} \quad \text{gdy } \Delta T = 1 \text{ m}.$$

VII. Drugie przybliżenie wyporności równe jest sumie pierwszego przybliżenia i dwóch poprawek na przegłębienie:

$$D_2 = D_1 + \Delta D_1 + \Delta D_2.$$

VIII. Na podstawie pomierzonej gęstościomierzem (aerometrem) gęstości wody zaburtowej –  $\rho$  oblicza się ostateczną wyporność statku:

$$D = D_2 \cdot \frac{\rho}{\rho_N},$$

gdzie  $\rho_n$  – gęstość wody, dla której wyznaczona jest wyporność w danych hydrostatycznych statku.

Zasadniczo masę ładunku załadowanego na jednostkę (lub wyładowanego z niej) wyznacza się na podstawie zanurzeń odczytanych najpierw przed operacją przeładunkową, a następnie po jej zakończeniu. Odczytane zanurzenia w obu wypadkach służą do wyznaczania wyporności jednostki. Z wyporności statku bez ładunku, po odjęciu od niej mas: pustego statku, zapasów, balastów i ścieków, wyznacza się tzw. **stałą statkową** (zwaną również **konstantą**). Obejmuje ona inne grupy mas, jak na przykład masę załogi i jej bagażu, masę prowiantu, oraz uwzględnia zmiany masy pustego statku, zachodzące w trakcie jego eksploatacji. Stałą statkową **C** wylicza się następująco:

$$C = D_0 - m_P - m_{S0} - m_{B0} - m_{C0},$$

gdzie:

- $D_0$  – wyporność statku bez ładunku,
- $m_P$  – masa pustego statku, podana w jego dokumentacji,
- $m_{S0}$  – masa zapasów na statku bez ładunku,
- $m_{B0}$  – masa balastów na statku bez ładunku,
- $m_{C0}$  – masa ścieków na statku bez ładunku.

Z kolei na podstawie wyporności załadowanej jednostki wyznacza się masę ładunku jako wynik odejmowania od wyporności: masy pustego statku, aktualnych mas zapasów, balastu i ścieków i stałej statkowej wyznaczonej z pomiaru wyporności jednostki bez ładunku:

$$m_C = D_C - m_P - m_{SC} - m_{BC} - m_{UC} - C,$$

gdzie:

- $m_C$  – masa ładunku,
- $D_C$  – wyporność statku z ładunkiem,
- $m_{SC}$  – masa zapasów na statku z ładunkiem,
- $m_{BC}$  – masa balastów na statku z ładunkiem,
- $m_{SC}$  – masa ścieków na statku z ładunkiem.

W wypadkach gdy nie było możliwości wyznaczenia wyporności statku bez ładunku, masę ładunków załadowanych lub wyładowanych wyznacza się na podstawie pojedynczego odczytu zanurzeń, na jednostce z ładunkiem. Konieczną do obliczenia masy ładunku stałą statkową **C** bierze się z obliczeń masy ładunku w poprzednich rejsach.

Obliczenia wyporności i masy ładunku na statku przeprowadza się za pomocą programu komputerowego lub odręcznie przy użyciu specjalnych formularzy.

Jeden z nich prezentowany jest w załączniku 7.

## 12. PODSTAWY STATECZNOŚCI STATKU

### 12.1. Warunki pływerności statku bez przechyłu i przegłębienia

Z fizycznego punktu widzenia statek może w stanie równowagi statycznej znajdować się w każdym dowolnym położeniu, natomiast ze względów bezpieczeństwa i eksploatacyjnych pewne jego położenia są preferowane, inne mogą być niedogodne, niektóre zaś są wykluczone. Z punktu widzenia bezpieczeństwa statek nie powinien mieć przechyłu oraz przegłębienia na dziób. Na statkach handlowych ze względów eksploatacyjnych najlepszy jest stan pływania jednostki bez przegłębienia, ale dopuszcza się stany z niewielkimi przegłębieniami na rufę. Za niedogodne w eksploatacji, ale dopuszczalne pod względem bezpieczeństwa, uważa się stany równowagi statku ze znacznymi przegłębieniami na rufę. Jednak jako niebezpieczny określa się stan z przegłębieniem jednostki na rufę, zbliżającym się do wartości, przy której na sfalowanym morzu dziób statku wychodzi okresowo ponad powierzchnię wody.

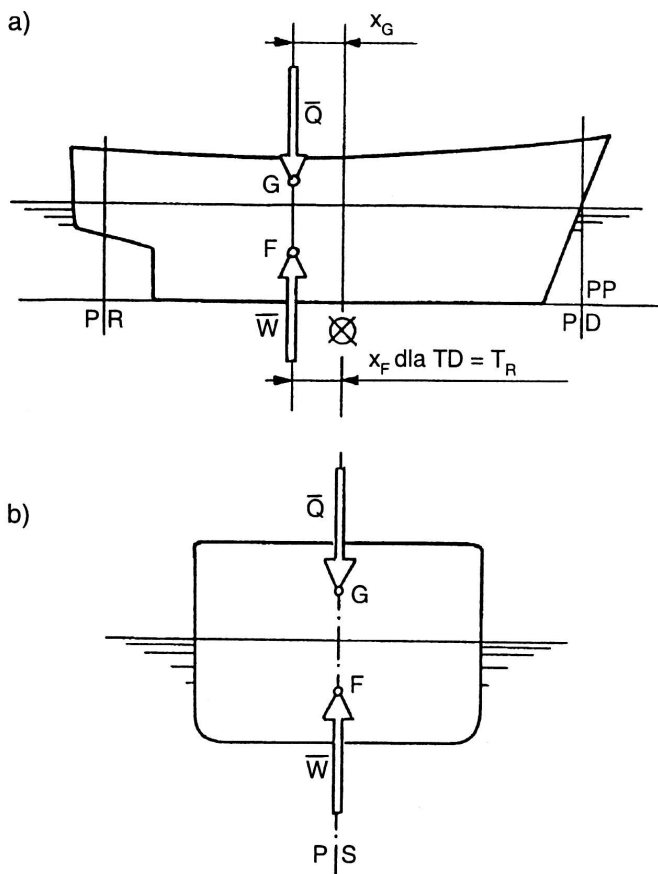
Odpowiedzi na pytanie, jak powinien być załadowany statek, by pływał bez przechyłu i bez przegłębienia, udziela analiza równań równowagi statku nawodnego. W związku z tym, że w każdym położeniu równowagi jednostki nawodnej linia działania siły wyporu pokrywa się z linią działania siły ciężkości, należy po pierwsze: znaleźć położenie środka wyporu jednostki dla stanu pływania bez przechyłu i bez przegłębienia, a po drugie – tak rozmieścić masy wzdłuż i w poprzek kadłuba, by linia działania siły ciężkości przechodziła przez ten środek wyporu. Na statku o symetrycznym względem płaszczyzny symetrii kadłubie środek objętości zanurzonej części kadłuba (a zarazem środek jego wyporu) leży na płaszczyźnie symetrii, dlatego też warunek pływania jednostki bez przechyłu sprowadza się do uzyskania takiego poprzecznego rozkładu mas, by środek masy statku leżał również na płaszczyźnie symetrii. Współrzędna poprzeczna środka masy jednostki musi więc być równa zero:

$$y_G = 0.$$

Statek będzie pływał bez przegłębienia, gdy wektor siły ciężkości będzie leżał na tej samej linii, co wektor wyporu na statku nieprzegłębionym. Należy zatem z dokumentacji jednostki (z danych hydrostatycznych statku nieprzegłębionego) odczytać odciętą środka wyporu  $x_F$  i tak rozłożyć masy wzdłuż statku, aby taka sama była odcięta jego środka masy:

$$x_G = x_F \text{ (dla } T_D = T_R).$$

Graficzna prezentacja stanu równowagi statku pływającego bez przegłębienia i bez przechyłu zawarta jest na rysunku 52.



**Rys. 52.** Warunki pływania statku nawodnego bez przegłębienia i bez przechyłu: a) odcięta środka masy statku równa odciętej środka wyporu statku nieprzegłębionego, b) współrzędna poprzeczna środka masy statku leżąca na płaszczyźnie symetrii

## 12.2. Równowaga statku i jego stateczność

Oprócz równowagi stałej w kierunku pionowym, opisanej w rozdziale 10, statek nawodny powinien mieć równowagę stałą również względem obrotów wokół osi wzdłużnej i poprzecznej, oznaczonych jako  $x-x$  i  $y-y$  na rysunku 11. Oznacza to, że pod wpływem momentu przechylającego lub przegłębającego statek obraca się (przechyla lub przegłębia) od początkowego położenia do statycznego kąta i wraca do poprzedniego położenia po zaniku tych momentów. Tak zachowuje się jednostka, której energia położenia (potencjalna) ma minimalną wartość w stanie spoczynku, a każda zmiana jej położenia wiąże się z wykonaniem pracy przez zewnętrzny moment, zamienianej na wzrost energii

potencjalnej jednostki wytrąconej z położenia równowagi. Ta nadwyżka energii, przy zaniku działania zewnętrznych zakłóceń (momentu przechylającego lub przegłębiającego), powoduje powrót statku do początkowego, spoczynkowego położenia. Odpowiedzi na pytanie, jakie warunki muszą być spełnione, aby statek miał równowagę stałą dla obrotu wokół osi  $x-x$ , dostarcza dział hydromechaniki o nazwie **stateczność poprzeczna okrętu**, natomiast zachowanie się statków w trakcie wymuszania ich obrotów wokół osi  $y-y$  opisuje **stateczność wzdłużna okrętu**. Za stateczny uważa się pływający obiekt (statek nawodny, okręt lub pojazd podwodny), który znajduje się wyłącznie w stanie równowagi stałej względem obrotów wokół obu wymienionych wyżej osi. Obiekty o równowadze obojętnej i chwiejnej traktowane są jako niestateczne.

### 12.3. Stateczność poprzeczna statku nawodnego

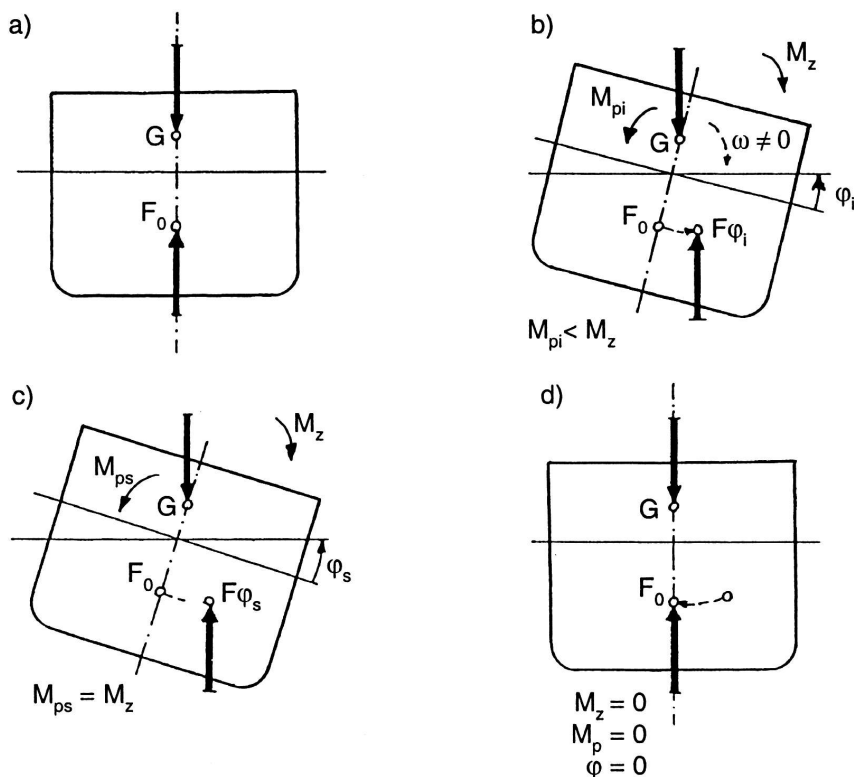
Statek nawodny uważany jest za stateczny względem obrotu wokół osi  $x-x$ , gdy pod wpływem momentu przechylającego odchyła się od początkowego położenia i pozostaje w trwałym przechyle, a powraca do początkowego położenia po zaniku działania wymienionego momentu. Takie zachowanie się statku zależy od: kształtu jego kadłuba, położenia względem siebie środków wyporu i masy jednostki oraz od tempa narastania momentu przechylającego. Inaczej będzie reagował ten sam statek na powolne i na szybko narastające w czasie wymuszenia, dlatego też oddzielnie analizuje się odpowiedź statku na quasi-statyczne i dynamiczne zmiany zewnętrznego momentu przechylającego. Stateczność poprzeczna dzieli się zatem na: **stateczność statyczną** (opisującą zachowanie statku przy bardzo wolnym narastaniu zewnętrznego momentu przechylającego) i **stateczność dynamiczną**, badającą reakcję statku na tak szybkie narastanie tego momentu, że odpowiedź statku zależy od jego bezwładności.

### 12.4. Stateczność poprzeczna statyczna

Na rysunku 53 przedstawiono zachowanie się statku pod wpływem przyłożonego do niego zakłócenia czyli momentu przechylającego, narastającego tak wolno, że bezwładność jednostki nie opóźnia jej reakcji. W położeniu początkowym (rys. 53a) wypadkowe sił i momentów tych sił są równe zeru. Przyłożenie zewnętrznego momentu przechylającego, zakłócającego początkowy stan równowagi, powoduje, zgodnie z drugim prawem Newtona, przyspieszony ruch statku, zgodny z kierunkiem działania tego momentu, czyli



obrót jednostki wokół osi  $x-x$ . Statek przechyla się na jedną z burt. Ten przechył sukcesywnie zmienia kształt podwodnej części kadłuba. Chociaż objętość tej części pozostaje stała, to przemieszcza się jej środek, a więc punkt przyłożenia siły wyporu (rys. 53b). Linia działania tej siły nie pokrywa się już z linią działania ciężaru statku i na jego kadłub działa **moment pary sił ciężar-wypór**. Ma on zwrot przeciwny niż moment zakłócający i redukuje jego wpływ na ruch statku. Nazywany jest **momentem prostującym**.



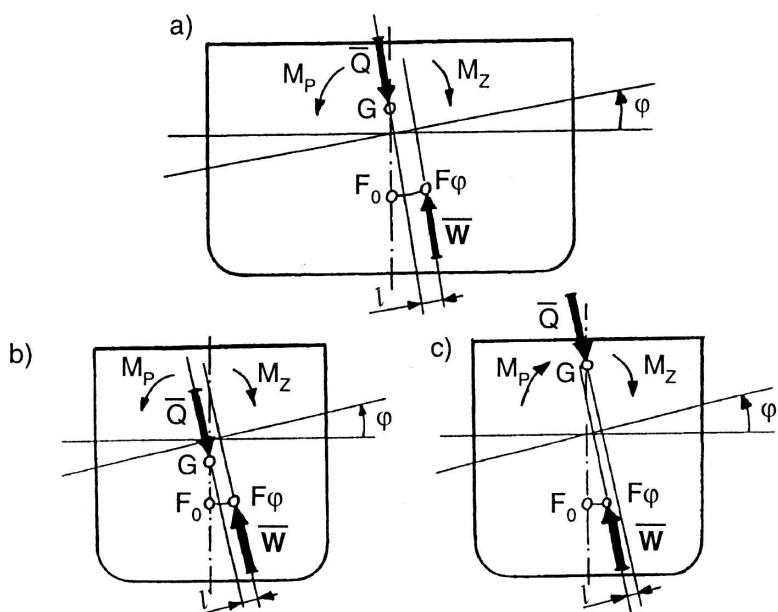
**Rys. 53.** Stateczność poprzeczna. Stany równowagi statku nawodnego: a) stan początkowy, b) obrót statku pod wpływem zewnętrznego momentu przechylającego, c) nowe położenie równowagi – trwały przechył jednostki, d) powrót do położenia początkowego po zaniku momentu zewnętrznego

W miarę wzrostu przechyłu jednostki zwiększa się odległość między wektorami wyporu i ciężaru, co skutkuje wzrostem momentu prostującego i w konsekwencji redukcją sumy momentów działających na statek. W związku z tym maleje tempo jego przechylania się, i gdy moment prostujący osiąga tę samą wartość co moment przechylający, statek zatrzymuje się w nowym położeniu, z trwałym przechylem na burtę (rys. 53c).

Gdy moment przechylający przestanie działać, nierównoważony nim moment prostujący pary sił ciężar-wypór powoduje prostowanie się jednostki (rys. 53d) aż do pierwotnego położenia, w którym ponownie pokrywają się linie sił ciężkości i wyporu.

Z prezentowanych na rysunku 53 kolejnych położań statku wynika ważny wniosek: aby statek był stateczny (miał równowagę stałą w odniesieniu do przechyłów), środek wyporu na statku przechylonym musi przemieszczać się w stronę zanurzonej burty tak daleko, żeby moment prostujący (pary sił ciężar–wypór) miał znak przeciwny niż moment przechylający. To zaś zachodzi, gdy statek jest dostatecznie szeroki lub środek masy jednostki leży nisko.

Oba te warunki pokazane są na rysunku 54, na którym prezentowane są trzy statki: szeroki (rys 54a), wąski, ale z nisko położonym środkiem masy (rys. 54b), oraz statek wąski z wysoko położonym środkiem masy (rys. 54c). Dwa pierwsze z wyżej wymienionych statków są stateczne, trzeci zaś nie ma stateczności poprzecznej. Przy takiej, jak na rysunku 54c, konfiguracji szerokości kadłuba i położenia środka masy, moment pary sił ciężar–wypór ma ten sam znak, co moment przechylający jednostkę.



**Rys. 54.** Geometryczne warunki stateczności poprzecznej: a) statek szeroki, b) statek wąski z nisko położonym środkiem masy, c) niestateczny wąski statek z wysoko położonym środkiem masy

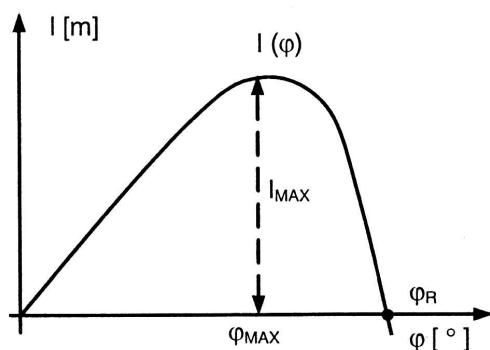
Za miarę stateczności przyjmuje się odległość między liniami działania siły ciężkości i wyporu, czyli ramię momentu prostującego, zwane dalej **ramieniem prostującym**. Zależy ono od: kąta przechyłu statku, geometrii jego kadłuba i wartości rzędnej środka masy. Oprócz bezwzględnej wartości ramienia prostującego ważne jest położenie względem siebie linii działania siły ciężkości i wyporu. Gdy linia działania wyporu leży bliżej zanurzonej burty statku niż linia działania jego ciężaru (jak na rys. 54a i 54b), ramię prostujące uważa się za dodatnie, a moment prostujący przeciwstawia się momentowi przechylającemu. Natomiast ramię prostujące uważa się za ujemne przy

odwrotnej relacji – bliżej zanurzonej burty leży linia działania ciężaru statku, moment prostujący ma wtedy ten sam zwrot co moment przechylający (rys. 54c). To ramię wyznacza się różnymi metodami w zakresie małych i dużych kątów przechyłu statku. Ze względu na wspomniane różnice wyznaczania poprzeczną stateczność statyczną dzieli się na stateczność początkową (opisującą zachowanie się statku do kąta przechyłu nieprzekraczającego  $7^\circ$ ) i na stateczność przy dużych kątach przechyłu.

Zależność ramienia prostującego od kąta przechyłu statku przedstawia się najczęściej w postaci graficznej, czyli wykresu zależności funkcyjnej:

$$l = f(\varphi).$$

Typowy kształt takiego wykresu dla statku handlowego pokazany jest na rysunku 55.



**Rys. 55.** Krzywa stateczności statycznej statku handlowego. Oznaczenia:  $l_{MAX}$  – maksymalna wartość ramienia prostującego,  $\varphi_{MAX}$  – kąt maksymalnego ramienia prostującego,  $\varphi_R$  – zakres krzywej – zakres dodatnich wartości ramienia prostującego

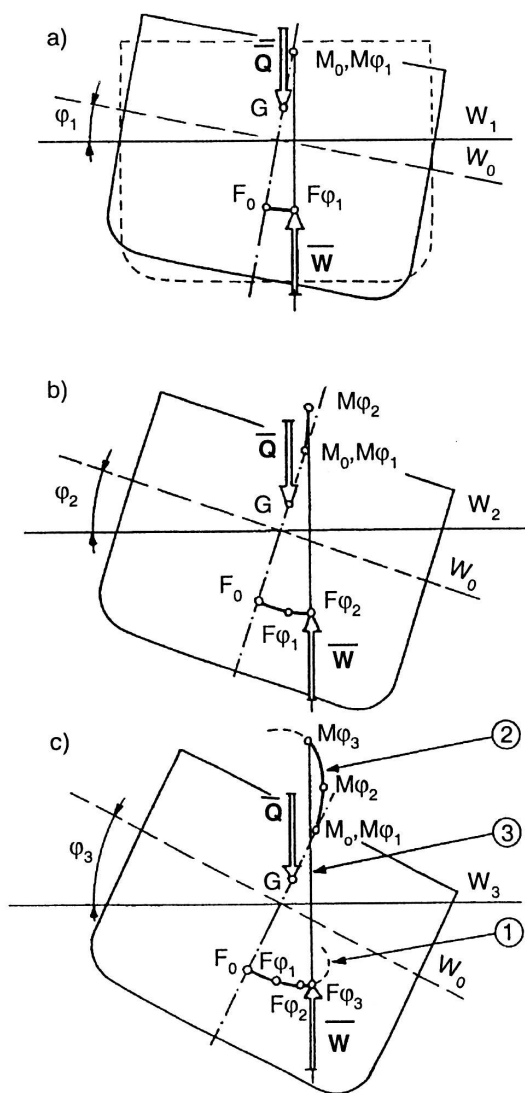
Tego typu wykres nosi nazwy: **krzywa stateczności statycznej**, **krzywa ramion prostujących** lub **krzywa Reeda** – (od nazwiska członka Admiralicji Brytyjskiej, który wykazał konieczność badania stateczności statków przy dużych kątach przechyłu [1, 21]).

Charakterystycznymi punktami na krzywej stateczności statycznej są:

- początek krzywej – zerowe ramię prostujące przy zerowym kącie przechyłu,
- maksimum wzniesienia krzywej – maksymalne ramię prostujące  $l_{MAX}$  i kąt maksymalnego ramienia  $\varphi_{MAX}$ ,
- zakres krzywej – kąt przechyłu statku, dla którego ramię prostujące maleje do zera  $\varphi_R$ .

## 12.5. Geometria przechyłu statku

Podczas przechylania się statku na jedną z burt objętość podwodnej części kadłuba nie ulega zmianie, natomiast zmienia się kształt tej części. Przechył jednostki można traktować jako przeniesienie części objętości (o kształcie klina) z jednej burty na drugą, co pokazano na rysunku 56. Skutkiem tego jest przemieszczenie się środka objętości podwodzia statku, równoległe do linii łączącej środka objętości klina przed i po jego przeniesieniu. Środek objętości podwodnej części kadłuba, będący jednocześnie miejscem przyłożenia siły wyporu statku (czyli środkiem wyporu), w miarę przechylania się statku porusza się po linii, zwanej **krzywą środków wyporu** (rys. 56).



**Rys. 56.** Geometria przechyłu statku: a), b), c) położenia kadłuba statku dla trzech kątów przechyłu; 1 – krzywa środków wyporu, 2 – ewoluta metacentryczna krzywej środków wyporu, 3 – promień metacentryczny krzywej środków wyporu dla jej odcinka w sąsiedztwie punktu  $F_{\phi_3}$

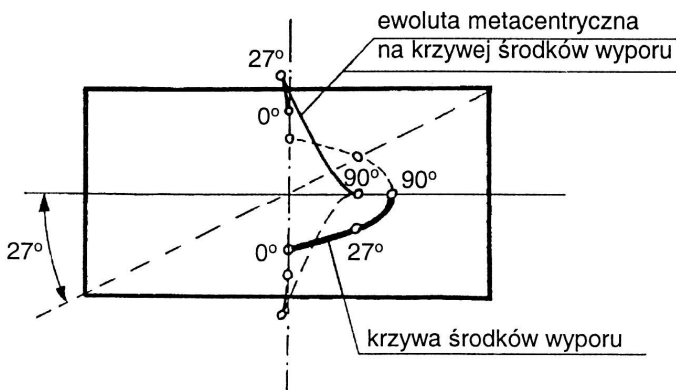
Krzywa ta w każdym swoim punkcie ma lokalną krzywiznę, której odwrotnością jest lokalny promień krzywizny, zwany **poprzecznym promieniem metacentrycznym**. Miejsce zaczepienia lokalnego promienia metacentrycznego krzywej środków wyporu określa się jako **lokalne metacentrum poprzeczne**. Dla różnych punktów krzywej środków wyporu jej lokalne metacentra leżą na krzywej zwanej **ewolutą metacentryczną**.

Lokalne promienie metacentryczne trzech skończenie krótkich odcinków krzywej środków wyporu, punkty zaczepienia tych promieni, czyli lokalne metacentra, i odcinek ewoluty metacentrycznej dla krzywej środków wyporu przedstawiono na rysunku 56.

Krzywą środków wyporu i jej ewolutę, dla kadłuba o kształcie prostopadłościennego pontonu, dla kątów przechyłu do  $180^\circ$  pokazuje rysunek 57.

Ponton jest zanurzony do połowy swojej wysokości, a stosunek szerokości pontonu do jego wysokości jest równy 2. Na tym rysunku widać charakterystyczny punkt załamania ewoluty metacentrycznej przy kącie przechyłu pontonu  $27^\circ$ . Przy tym kącie pokład pontonu wchodzi do wody, a jednocześnie wynurza się ponad wodę jego dno. Rosnący w zakresie kątów przechyłu  $0^\circ$ – $27^\circ$  lokalny promień metacentryczny zaczyna zmniejszać się po przekroczeniu kąta  $27^\circ$  równocześnie ze zmniejszaniem się szerokości pontonu na chwilowej wodnicy pływania. Pozwala to na wyciągnięcie wniosku, że lokalny promień metacentryczny jest silnie zależny od szerokości wodnicy, również dla kadłubów o kształtach typowych dla statków handlowych.

Ewoluta metacentryczna odgrywa dużą rolę w stateczności, przez leżące na niej lokalne metacentra przechodzi zawsze linia działania wyporu statku. Wynika to z faktu, że podobnie jak wektor lokalnego promienia metacentrycznego, również wektor wyporu jest prostopadłe skierowany do krzywej środków wyporu.



**Rys. 57.** Krzywa środków wyporu i jej ewoluta metacentryczna dla prostopadłościennego pontonu

## 13. STATECZNOŚĆ POCZĄTKOWA POPRZECZNA

### 13.1. Założenia stateczności początkowej

Stateczność początkowa dotyczy reakcji statków na działanie momentów przechylających wywołujących niewielkie przechyły.

W zakresie małych kątów przechyłu statku przyjęte zostało założenie, że krzywą środka wyporu można zastąpić łukiem okręgu. Jako graniczny kąt, dla którego to założenie nie daje znaczących błędów w ocenie stateczności, z reguły przyjmuje się kąt  $7^\circ$ . Jednak dla niektórych statków można przyjmować takie założenie dla kątów nie większych niż  $5^\circ$ . Konsekwencją takiego założenia jest stała wartość krzywizny początkowego odcinka krzywej środków wyporu. Oznacza to, że promień metacentryczny ma stałą wartość i jest zaczepiony w jednym punkcie, zwanym **metacentrum początkowym**. Ponieważ linia działania wyporu pokrywa się z wektorem promienia metacentrycznego, przechodzi ona również przez metacentrum początkowe.

Układ sił na statku, przechylonym o niewielki kąt za pomocą zewnętrznego momentu  $M_Z$ , pokazany jest na rysunku 58.

Moment prostujący  $M_P$  ma zwrot przeciwny do momentu przechylającego tylko wtedy, gdy metacentrum początkowe  $M_O$  leży wyżej (względem płaszczyzny podstawowej statku) niż środek masy  $G$ , w którym zaczepiony jest wektor ciężaru jednostki (rys. 58a). Jeżeli warunek ten nie jest spełniony, jak na rysunku 58b i 58c, (metacentrum początkowe  $M_O$  pokrywa się ze środkiem masy lub leży poniżej niego), moment prostujący  $M_P$  ma wartość zerową lub jego zwrot jest taki sam jak momentu przechylającego. Oznacza to, że jedynie dla warunku spełnionego na rysunku 58a statek jest stateczny. Warunkiem więc stateczności początkowej jest wyższa wartość rzędnej metacentrum początkowego niż rzędna środka masy statku. Różnica między wymienionymi rzędnymi zwana jest **wysokością metacentryczną  $GM$**  i stanowi, niezależną od kąta przechyłu jednostki, miarę stateczności początkowej statków.

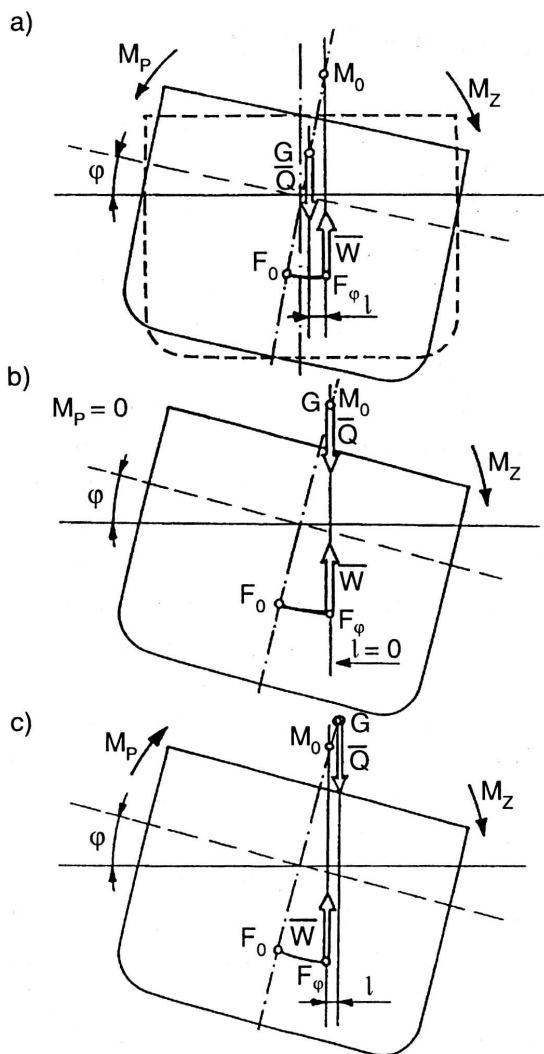
Ramię momentu prostującego statek, czyli odległość między liniami działania ciężaru i wyporu, może być wyrażone poprzez wysokość metacentryczną:

$$l = GM \cdot \sin \varphi,$$

gdzie  $\varphi$  – kąt przechyłu statku.

Ramiona prostujące dla dwóch różnych kątów przechyłu (przy założeniu, że są to kąty mieszczące się w zakresie tzw. małych kątów przechyłu, dla których są słuszne założenia stateczności początkowej) oraz ich relacje z wysokością metacentryczną, pokazane są na rysunku 59. W celu lepszej czytelności

rysunku wykreślono na nim kąty przechyłu statku znacznie przekraczające wspomniany zakres małych kątów.



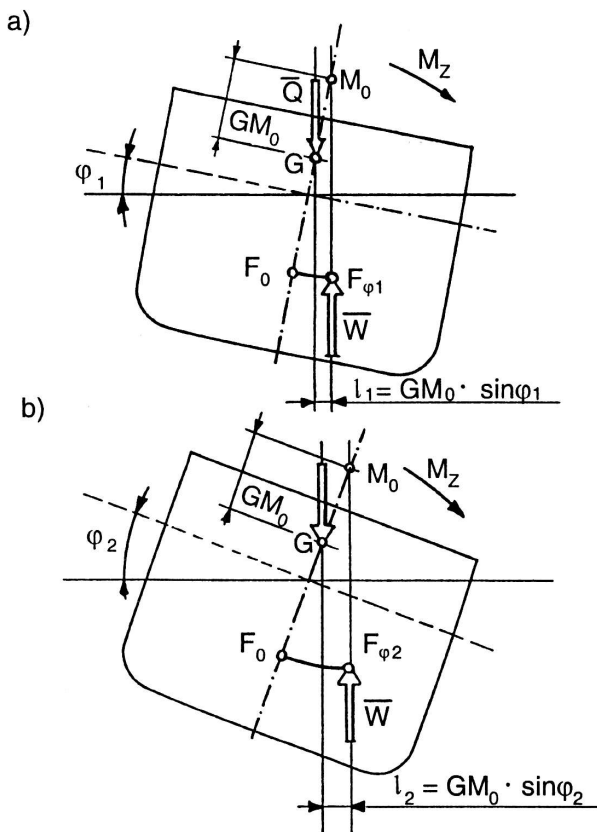
**Rys. 58.** Początkowa stateczność poprzeczna statku: a) metacentrum poprzeczne początkowe leży nad środkiem masy jednostki – statek stateczny w zakresie małych kątów przechyłu, b) metacentrum początkowe pokrywa się ze środkiem masy – statek niestateczny w zakresie małych kątów przechyłu, c) metacentrum początkowe leży poniżej środka masy – statek niestateczny w zakresie małych kątów przechyłu

Wysokość metacentryczną jednostki można też interpretować jako rzut ramienia prostującego na płaszczyznę symetrii statku, z uwzględnieniem faktu, że w zakresie małych kątów przechyłu ten rzut ma zawsze stałą wartość (rys. 59).

Zakres kątów przechyłu, w którym można stosować wysokość metacentryczną jako miarę stateczności statku, zależy od kształtu kadłuba i można go

wyznaczyć na podstawie tzw. **trójkąta metacentrycznego**. Jest to graficzna konstrukcja, oparta na założeniu, że dla małych kątów sinusy tych kątów pomijalnie mało różnią się od wartości kątów wyrażonych w radianach:

$$\sin \varphi \approx \varphi \text{ [rd]}.$$



**Rys. 59.** Zależność ramienia prostującego od wysokości metacentrycznej i kąta przechyłu statku: a) mały kąt przechyłu, b) maksymalny kąt przechyłu statku, dla którego można stosować jeszcze założenia stateczności początkowej

Sposób wykreślenia trójkąta metacentrycznego na wykresie ramion prostujących przedstawiony jest na rysunku 60.

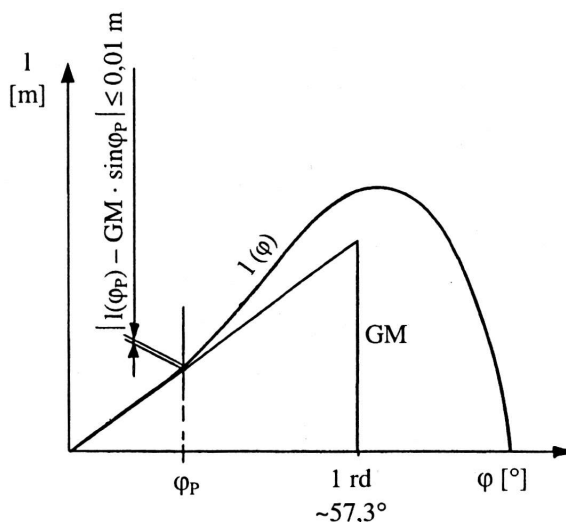
Dla kąta przechyłu równego jednemu radianowi (około  $57,3^\circ$ ) wykreśla się rzędną równą wysokości metacentrycznej statku **GM**. Wierzchołek tej rzędnej, połączony prostą z początkiem układu współrzędnych, tworzy przeciwprostokątną trójkąta o bokach: jeden radian i wysokość metacentryczna. Całość tej graficznej konstrukcji nosi nazwę trójkąta metacentrycznego. Krzywa ramion prostujących dla niewielkich kątów jest, jak widać na rysunku 60, styczna do przeciwprostokątnej tego trójkąta. Wartość granicznego kąta (oznaczonego na rysunku 60 jako  $\phi_p$ ), dla którego krzywa ramion prostujących



niewiele odchyła się od trójkąta metacentrycznego, czyli zakres stosowania założeń stateczności początkowej, można wyznaczyć graficznie dla warunku:

$$|l(\varphi_P) - GM \cdot \varphi_P [^\circ] / 57,3| \leq 0,01 \text{ m},$$

lub  $|l(\varphi_P) - GM \cdot \sin \varphi_P| \leq 0,01 \text{ m}.$



**Rys. 60.** Wyznaczanie granicznego kąta przechyłu statku –  $\varphi_P$ , dla którego ważne są założenia stateczności początkowej

Zgodnie z rysunkiem 61, wysokość metacentryczna statku wynosi:

$$GM = KM - KG = z_M - z_G,$$

gdzie:

**KM** =  $z_M$  – rzędna metacentrum, czyli odległość metacentrum początkowego od płaszczyzny podstawowej statku,

**KG** =  $z_G$  – rzędna środka masy statku.

Powyższa zależność nosi nazwę **wzoru metacentrycznego**.

Rzędna metacentrum można otrzymać poprzez sumowanie rzędnej środka wyporu (na statku nieprzechylonym) i promienia metacentrycznego dla początkowego odcinka krzywej środka wyporu (rys. 61):

$$KM = KF + FM \quad \text{lub} \quad z_M = z_F + r_B,$$

gdzie:

**KF** =  $z_F$  – rzędna środka wyporu,

**FM** =  $r_B$  – poprzeczny promień metacentryczny dla małych kątów przechyłu.

Poprzeczny promień metacentryczny związany jest z kształtem i wielkością wodnicy pływania statku oraz z objętością jego podwodnej części.

Oblicza się go z następującego wyrażenia:

$$r_B = I_B / V,$$

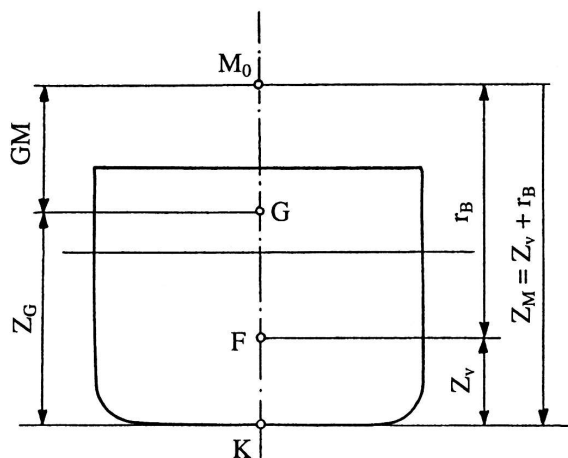
gdzie  $I_B$  – poprzeczny moment bezwładności pola powierzchni wodnicy pływania statku [ $m^4$ ].

Na wartość tego momentu najsilniej wpływa szerokość statku.

Po zastąpieniu we wzorze na wysokość metacentryczną rzędnej metacentrum  $z_M$  przez sumę rzędnej środka wyporu  $z_F$  i poprzecznego promienia metacentrycznego  $r_B$ , otrzymuje się drugą postać wzoru metacentrycznego:

$$GM = KF + FM - KG = z_F + r_B - z_G.$$

Rzędna metacentrum  $z_M$ , jako suma rzędnej środka wyporu  $z_F$  i poprzecznego promienia metacentrycznego  $r_B$ , jest podana w danych hydrostatycznych jednostki w funkcji jej zanurzenia wypornościowego  $T$ .



Rys. 61. Geometryczna prezentacja wzoru metacentrycznego

Obliczenie stateczności początkowej statku (wyznaczenie wysokości metacentrycznej) sprowadza się do wykonania kilku operacji obliczeniowych:

- w tabeli obliczeń masowych (ewentualnie za pomocą arkusza kalkulacyjnego) oblicza się, dla danego stanu załadowania, masę  $m_{ST}$  i współrzędne środka masy jednostki –  $x_G$  i  $z_G$ ,
- wyporność statku, równą jego masie ( $D = m_{ST}$ ), przelicza się na objętość podwodnej części kadłuba:

$$V \frac{D}{\rho \cdot k},$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość wody za burtą statku,

$k$  – współczynnik udziału poszycia w tworzeniu wyporności jednostki,

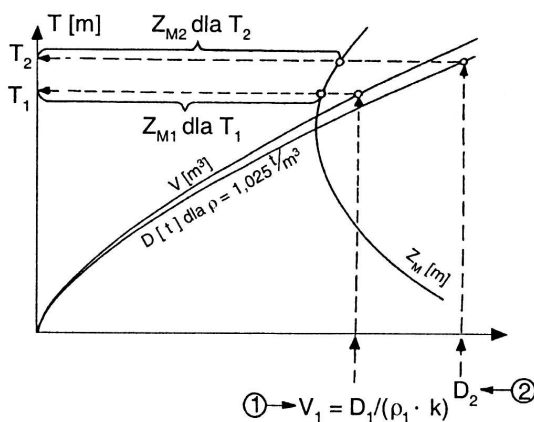
- z danych hydrostatycznych jednostki, z tabeli lub wykresu zależności  $V(T)$ , odczytuje się (dla obliczonej objętości  $V$ ) zanurzenie wypornościowe  $T$ ,
- dla zanurzenia  $T$  odczytuje się z danych hydrostatycznych (tabela lub wykres) rzędną metacentrum  $z_M$ ,
- oblicza się wysokość metacentryczną:

$$GM = z_M - z_G,$$

i przeprowadza się jej korektę, jeżeli jest to wymagane.

W wypadkach, gdy jednostka pływa w wodzie morskiej o gęstości  $\rho = 1,025 \text{ t/m}^3$ , można zanurzenie wypornościowe i związane z tym zanurzeniem inne parametry odczytywać z rubryki (tabele hydrostatyczne) lub z krzywej (krzywe hydrostatyczne) wyporności w wodzie morskiej  $D(T)$ .

Opisany wyżej sposób wyznaczania rzędnej metacentrum statku, przy korzystaniu z krzywych hydrostatycznych jednostki, prezentowany jest schematycznie na rysunku 62. Przedstawiono na nim oba warianty wyznaczania zanurzenia wypornościowego: na podstawie krzywej objętości podwodnej części kadłuba  $V(T)$  oraz na podstawie krzywej wyporności  $D(T)$ .



**Rys. 62.** Wyznaczanie rzędnej metacentrum z krzywych hydrostatycznych: 1 – na podstawie objętości podwodnej części kadłuba, dla dowolnej gęstości wody, 2 – na podstawie wyporności jednostki pływającej w wodzie o gęstości  $\rho = 1,025 \text{ t/m}^3$

## 13.2. Korekty wysokości metacentrycznej

Poniżej opisano wyznaczanie zmian wysokości metacentrycznej wywołane:

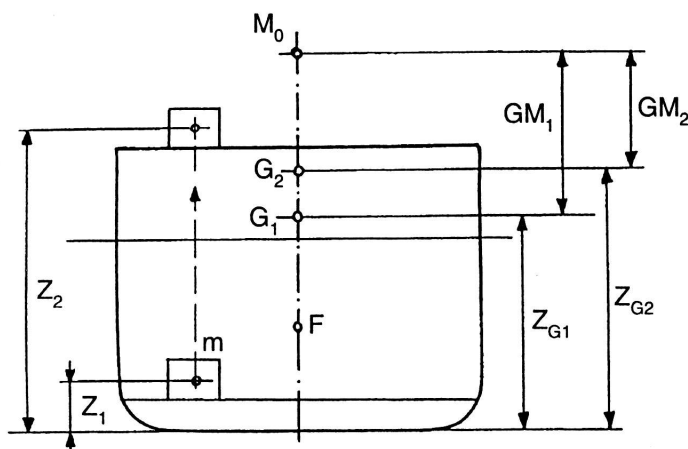
- pionowym przemieszczeniem mas na statku, skutkującym zmianą rzędnej jego środka masy,
- podwieszeniem ładunku na pokładowym urządzeniu przeładunkowym,
- swobodnymi powierzchniami cieczy w zbiornikach (i w innych przedziałach w czasie awarii jednostki).

**Pionowe przemieszczenie masy.** Na rysunku 63 przedstawiono wypadek przeniesienia, wyłącznie w kierunku pionowym, ładunku o masie  $m$  z dna ładowni na pokład jednostki. Początkowa i końcowa rzędna środka tej masy wynosi odpowiednio:  $z_1$  i  $z_2$ . W wyniku takiej operacji środek masy statku z punktu  $G_1$  przemieści się do  $G_2$  o odcinek:

$$G_1G_2 = \frac{m}{D} \cdot (z_2 - z_1).$$

O taką samą wielkość zmieni się wysokość metacentryczna statku. Jak to można zaobserwować na rysunku 63, podwyższenie rzędnej środka masy jednostki o określoną wartość powoduje obniżenie stateczności początkowej o tę samą wartość:

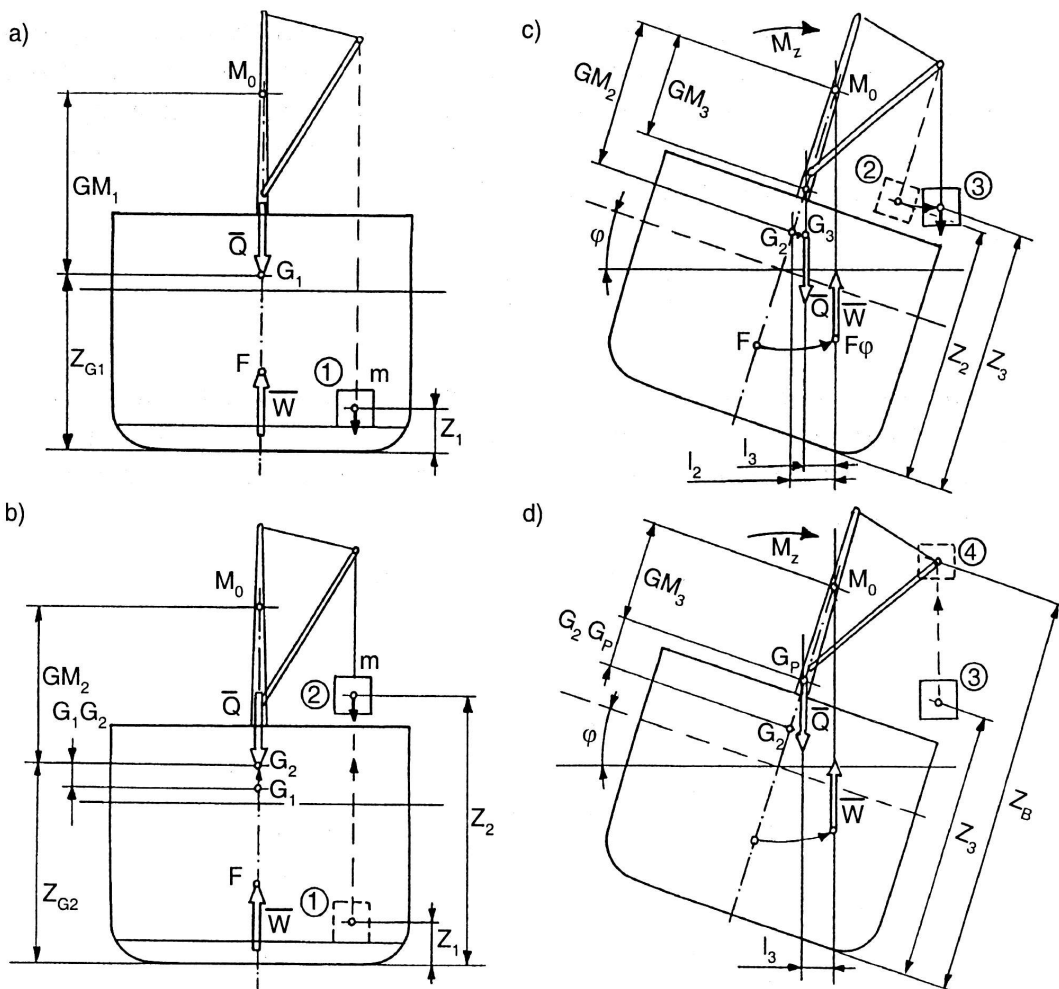
$$GM_2 = GM_1 - \frac{m}{D} \cdot (z_2 - z_1).$$



**Rys. 63.** Zmiana wysokości metacentrycznej statku wywołana pionowym przemieszczeniem masy na statku

**Swobodnie wiszący ładunek.** Ładunek podnoszony pokładowym urządzeniem przeładunkowym (żurawiem bomowym, żurawiem pokładowym lub suwnicą) również powoduje wędrówkę w górę środka masy jednostki, ale w wypadku, gdy ładunek ma możliwość swobodnego kołysania się, jego wpływ na stateczność statku jest znacznie większy niż wynika to z wysokości jego podniesienia ponad położenie początkowe.

Swobodnie wiszący na urządzeniu przeładunkowym ładunek o masie  $m$  i jego wpływ na wysokość metacentryczną jednostki pokazuje rysunek 64. Na rysunku 64a przedstawiony jest stan początkowy: ładunek spoczywa na dnie ładowni jednostki. Statek ma wysokość metacentryczną  $GM_1$ .



**Rys. 64.** Stateczność poprzeczna statku z ładunkiem podwieszonym do pokładowego urządzenia przeładunkowego: a) stan początkowy – ładunek na dnie ładowni, b) ładunek podwieszony pod urządzenie przeładunkowe, na wysokości  $z_2$ , c) przyłożenie do statku zewnętrznego momentu przechylającego, d) zastępcze położenie ładunku na wierzchołku bomu lub wysięgnika pokładowego urządzenia przeładunkowego

Z początkowego położenia 1 (rzędna  $z_1$ ) ładunek podwieszony na żurawiu bomowym został podniesiony do punktu 2, na wysokość  $z_2$  (rys. 64b). Środek masy statku przemieścił się z punktu  $G_1$  do punktu  $G_2$ , a wysokość metacentryczna w tym stanie jest równa  $GM_2$ . W celu sprawdzenia stateczności jednostki w takim stanie przyłożono do niej zewnętrzny moment przechylający  $M_z$ , który wywołał przechył statku do kąta  $\varphi$  (rys. 64c). Skutkiem tego przechyłu jest przemieszczenie się środka masy wiszącego ładunku z punktu 2 do punktu 3. To zaś powoduje przesunięcie się środka masy statku do punktu  $G_3$ . Linia działania siły ciężkości statku przechodzi przez ten punkt, dając ramię  $l_3$  momentu prostującego, równoważącego moment przechylający. To ramię jest mniejsze niż ramię  $l_2$ , występujące dla stanu, gdyby ładunek

podwieszony na żurawiu nie miał swobody ruchu, na przykład gdyby był przytrzymywany przez boczne prowadnice. Temu ramieniu  $l_3$  odpowiada wysokość metacentryczna  $GM_3$ , mniejsza niż dla podwieszonego ładunku pozbawionego swobody ruchu.

Aby wyeliminować konieczność dokładnego wyznaczania współrzędnych punktu  $G_3$ , zależnego od położenia środka masy wiszącego ładunku (punkt 3 na rysunku 64c), można skorzystać z tego, że niezależnie od kąta przechyłu statku, linia działania siły ciężkości swobodnie wiszącego ładunku przechodzi zawsze przez punkt zaczepienia renera (liny, na której wisi ładunek) na bomie lub wysięgniku żurawia. Zamiast więc rozpatrywać rzeczywiste położenie ładunku i uwzględniać jego przemieszczanie się w ślad za zmianą kąta przechyłu, można pozornie przenieść ładunek do opisanego punktu podczepienia renera pod wysięgnikiem lub bomem żurawia – punkt 4 o rzędnej  $z_B$  (rys. 64d). Odpowiada temu pozorne przemieszczenie środka masy statku do punktu  $G_P$ . Punkt ten leży na linii działania siły ciężkości jednostki, przechodzącej przez rzeczywisty środek masy statku  $G_3$ , toteż wysokość metacentryczna statku ma taką samą wartość, niezależnie czy była wyznaczana dla rzeczywistego czy dla pozornego położenia środka masy jednostki.

Odcinek  $G_1G_P$ , odpowiadający pozornemu przemieszczeniu środka masy statku w górę (wskutek przemieszczenia ładunku pozornie na wierzchołek bomu lub wysięgnika żurawia), można wyznaczyć z zależności:

$$G_1G_P = m / D \cdot (z_B - z_1),$$

gdzie  $z_B$  – rzędna wierzchołka bomu żurawia bomowego lub wysięgnika żurawia pokładowego.

Ostatecznie więc wysokość metacentryczna statku ze swobodnie wiszącym ładunkiem na pokładowym urządzeniu przeładunkowym jest mniejsza od początkowej (z ładunkiem na dnie ładowni) o odcinek  $G_1G_P$  i jest równa:

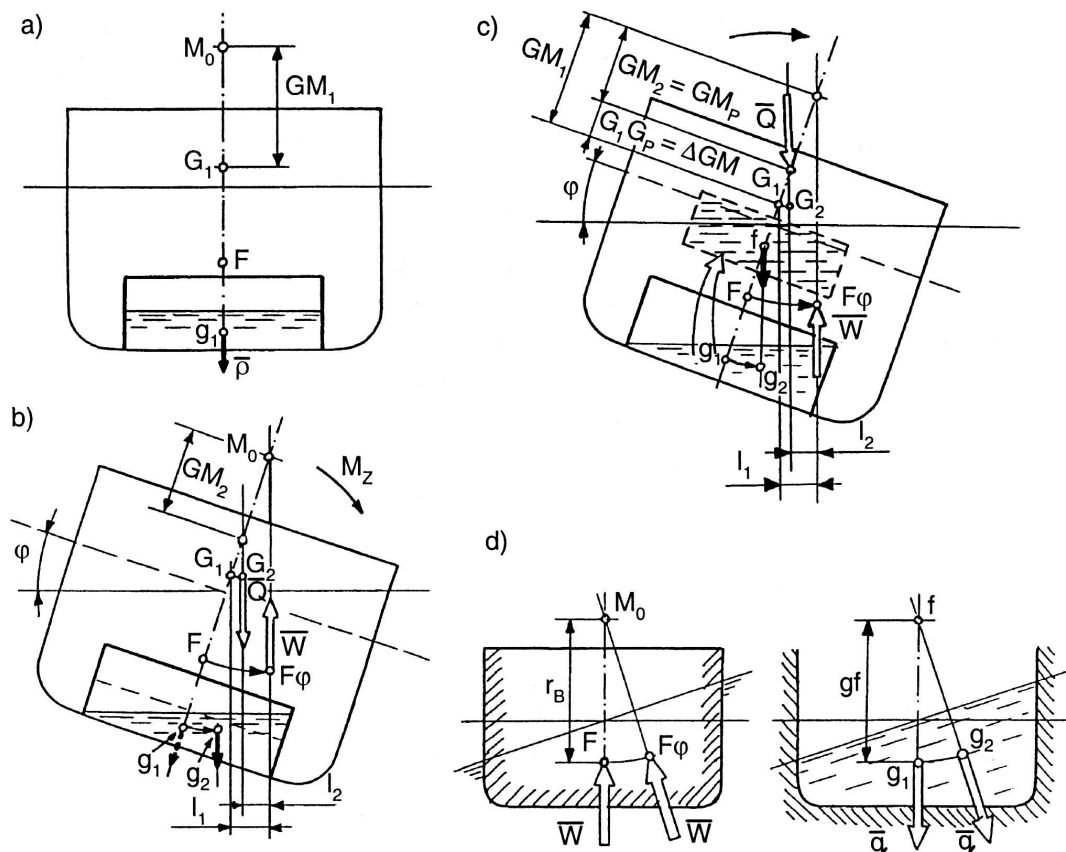
$$GM_2 = GM_1 - \frac{m}{D} \cdot (z_B - z_1).$$

Warto zwrócić uwagę na to, że we wzorze na wysokość metacentryczną statku ze swobodnie wiszącym ładunkiem nie występuje rzędna podniesienia ładunku ( $z_2$  na rysunku 64b). Jest to parametr nieistotny, gdyż w momencie oderwania ładunku od podłoża, na którym spoczywał na statku (dno ładowni, inny ładunek, pokład), statek odczuwa to tak, jakby w bardzo krótkim czasie ten ładunek znalazł się na wierzchołku bomu lub wysięgnika pokładowego urządzenia przeładunkowego, o rzędnej  $z_B$ .

### 13.3. Swobodne powierzchnie cieczy w zbiornikach

Podobny wpływ na stateczność początkową jak wiszący ładunek mają ciecze w zbiornikach, w wypadkach niecałkowitego ich napełnienia. Ciecze w takich zbiornikach mają możliwość przelewania się przy przechyle statku. Powoduje to zmniejszenie wysokości metacentrycznej jednostki.

Geneza tego zjawiska pokazana jest na rysunku 65, na którym przedstawiono poprzeczny przekrój kadłuba z prostopadłościennym zbiornikiem, wypełnionym do połowy cieczą.



**Rys. 65.** Wpływ cieczy w częściowo wypełnionym zbiorniku na stateczność poprzeczną statku: a) stan początkowy na statku nieprzechylonym, b) przelewanie się cieczy w zbiorniku na statku przechylonym zewnętrznym momentem, c) zastąpienie przelewania się cieczy jej pozornym przepompowaniem do wyżej położonego, całkowicie cieczą wypełnionego zbiornika bez swobodnej powierzchni, d) geometryczne podobieństwo między poprzecznym promieniem metacentrycznym statku –  $r_B$  a drogą pozornego przepompowania cieczy do wyżej leżącego zbiornika –  $gf$

Stateczność statku, wyznaczona z pominięciem wpływu swobodnych powierzchni cieczy w zbiorniku, jest równa  $GM_0$  (rys. 65a). Przyłożenie do jednostki momentu przechylającego  $M_Z$  powoduje przelanie się cieczy i przemieszczenie jej środka masy z początkowego położenia  $g_1$  do punktu  $g_2$ ,

czemu odpowiada przemieszczenie środka masy jednostki z punktu  $G_1$  do  $G_2$  (rys. 65b). Ramię momentu prostującego jest wówczas równe  $l_2$ , odpowiada temu wysokość metacentryczna  $GM_P$ , mniejsza, jak widać, od wysokości początkowej  $GM_O$ , jaką miałby statek, gdyby ciecz w zbiorniku nie zmieniła swego położenia, na przykład po zamrożeniu.

W celu uproszczenia analizy zmniejszenie wysokości metacentrycznej można traktować jako skutek pozornego pionowego przemieszczenia środka masy statku z punktu  $G_1$  do punktu  $G_P$ , zastępującego rzeczywiste przesunięcie tego środka do punktu  $G_2$  (rys. 65b). Ten pionowy ruch środka masy statku może być z kolei traktowany jako skutek pozornego przemieszczenia (przepompowania) cieczy ze zbiornika, w którym się ona znajduje, do zbiornika wyżej leżącego, ale całkowicie wypełnionego tą cieczą. Środek masy cieczy w tym „zastępczym” zbiorniku przyjmuje się w punkcie, w którym przecinają się linie wektora ciężaru cieczy w dolnym zbiorniku na statku nieprzechylonym i przechylonym. Na rysunku 65c ten punkt oznaczony jest jako  $f$ . Ponieważ ciecz w zbiorniku statkowym o sztywnych ścianach jest geometrycznie podobnym obiektem do sztywnego kadłuba statku, częściowo zanurzonego w wodzie (rys. 65d), drogę przemieszczenia cieczy  $gf$  można wyznaczyć podobnie jak wyznacza się poprzeczny promień metacentryczny:

$$gf = \frac{i_{YY}}{v_C},$$

gdzie:

- $gf$  – droga przemieszczenia środka masy cieczy, równa odległości od środka masy cieczy do punktu, przez który, niezależnie od kąta przechyłu, przechodzi zawsze wektor ciężaru cieczy w częściowo wypełnionym zbiorniku,
- $i_{YY}$  – poprzeczny moment bezwładności powierzchni cieczy w zbiorniku,
- $v_C$  – objętość cieczy w zbiorniku.

Odcinek  $gf$  można traktować jako pozorną drogę przemieszczenia środka masy cieczy ze zbiornika niecałkowicie nią wypełnionego do wyżej leżącego zbiornika bez swobodnej powierzchni cieczy. W konsekwencji tego, zamiast przesunięcia środka statku w bok, z punktu  $G_1$  do  $G_2$ , będącego skutkiem przelewania się cieczy pod wpływem przechyłu, można ten środek przemieścić pionowo w górę do punktu  $G_P$  o odcinek równy:

$$G_1G_P = \frac{m_C}{D} \cdot gf,$$

gdzie:

- $m_C = v_C \cdot \rho$  – masa cieczy w zbiorniku,
- $\rho_C$  – gęstość cieczy w zbiorniku,
- $D \approx V \cdot \rho$  – wyporność statku.



Po podstawieniu wyrażeń na masę cieczy w zbiorniku i wyporność statku otrzymuje się ostatecznie:

$$G_1 G_P = \frac{v_C \cdot \rho_C}{V \cdot \rho} \cdot \frac{i_{YY}}{v_C} = \frac{i_{YY}}{V} \cdot \frac{\rho_C}{\rho}.$$

Wysokość metacentryczna statku zmniejsza się o odcinek  $G_1 G_P$  w odniesieniu do wysokości metacentrycznej nieuwzględniającej przelewania się cieczy w zbiorniku, dlatego też jest on nazywany **poprawką wysokości metacentrycznej  $\Delta GM$**  na wpływ swobodnych powierzchni cieczy na statku.

**Poprawiona wysokość metacentryczna  $GM_P$** , uwzględniająca wpływ swobodnych powierzchni cieczy na statku, jest równa:

$$GM_P = GM_O - \Delta GM,$$

gdzie:

$\Delta GM = G_1 G_P = \frac{i_{YY}}{V} \cdot \frac{\rho_C}{\rho}$  – poprawka wysokości metacentrycznej na swobodną powierzchnię cieczy w zbiorniku,

$GM_O$  – **niepoprawiona wysokość metacentryczna**, obliczona na podstawie wzoru metacentrycznego.

Jeżeli na jednostce jest kilka zbiorników niecałkowicie wypełnionych cieczami, to poprawki od poszczególnych zbiorników sumuje się, najczęściej stosując następujący wzór:

$$\Delta GM = \frac{\sum_{i=1}^n (i_{YYi} \cdot \rho_i)}{D},$$

gdzie:

- $i_{YYi}$  – poprzeczny moment bezwładności powierzchni cieczy w zbiorniku  $i$ ,
- $\rho_i$  – gęstość cieczy w zbiorniku  $i$ ,
- indeks  $i$  – numer zbiornika niecałkowicie wypełnionego cieczą,
- indeks  $n$  – liczba zbiorników niecałkowicie wypełnionych cieczami.

Rzeczywiste gęstości cieczy w zbiornikach określonego przeznaczenia niewiele różnią się od siebie, toteż w celu ułatwienia obliczeń wprowadzono tzw. **momenty statyczne poprawek na swobodne powierzchnie cieczy –  $\Delta mGM$**  w zbiornikach statkowych:

$$\Delta mGM_i = i_{YYi} \cdot \rho_i,$$

gdzie:

- $i_{YYi}$  – poprzeczny moment bezwładności powierzchni cieczy w zbiorniku  $i$ , obliczony dla wypełnienia zbiornika w połowie jego objętości,
- $\rho_i$  – normatywna gęstość cieczy w zbiorniku  $i$ .

Poprawka wysokości metacentrycznej na wpływ swobodnych powierzchni cieczy jest wówczas liczona w następujący sposób:

$$\Delta GM = \Sigma(\Delta m GM_i) / D$$

gdzie:

- $\Delta m GM_i$  – moment statyczny poprawki na swobodną powierzchnię cieczy w zbiorniku  $i$ ,
- $i$  – kolejny numer zbiornika ze swobodną powierzchnią cieczy,
- $n$  – liczba zbiorników niecałkowicie wypełnionych cieczami.

W przepisach niektórych towarzystw klasyfikacyjnych, na przykład Polskiego Rejestru Statków [19], zagadnienie wpływu swobodnych powierzchni cieczy w przedziałach statkowych na stateczność traktowane jest w odmienny sposób. Pozorne podniesienie środka masy statku w górę  $G_1 G_P$  (prezentowane na rysunku 65b), zastępujące rzeczywiste przesunięcie tego środka w bok, jest dodawane do rzędnej środka masy statku. Otrzymuje się w ten sposób tzw. **poprawioną rzędną środka masy statku** –  $z_{GP}$ , uwzględniającą obecność na statku swobodnych powierzchni cieczy,

$$KG_P = KG + G_1 G_P,$$

lub w postaci zapisu według rzędnych,

$$z_{GP} = z_G + G_1 G_P,$$

gdzie  $G_1 G_P = \Delta GM$  – poprawka wysokości metacentrycznej na wpływ swobodnych cieczy na statku.

Poprawiona wysokość metacentryczna statku (uwzględniająca zmniejszenie stateczności początkowej statku w wyniku oddziaływania swobodnych powierzchni cieczy w przedziałach statkowych) jest wówczas równa:

$$GM_P = z_M - z_{GP}.$$

W dokumentacji eksploatacyjnej jednostki powinny być podane niezbędne dane do obliczenia poprawek wysokości metacentrycznej. Poprzeczne momenty bezwładności powierzchni cieczy z zbiornikach zawarte są z reguły w tablicach skalowania zbiorników statkowych.

Na wielu jednostkach podane są informacje dotyczące momentów statycznych poprawek od swobodnych powierzchni cieczy w zbiornikach statkowych.

Przykładowo w załączniku 8 prezentowana jest tabela takich momentów dla zbiorników na drobnicowcu uniwersalnym o nośności 13 600 t.

Wpływ swobodnych powierzchni cieczy na wysokość metacentryczną statków należy uwzględniać dla zapełnienia zbiorników od 0 do 98% ich objętości [12, 19].

Jeśli na statku wystąpią ciecze ze swobodnymi powierzchniami w innych przedziałach niż zbiorniki, na przykład woda w ładowniach czy w maszynowni przy uszkodzeniach poszycia kadłuba, wpływ tych cieczy na stateczność wyznacza się tak samo jak dla cieczy w zbiornikach. W związku z tym w tablicach skalowania ładowni i międzypokładów podane są, w funkcji wysokości ich zapełnienia, wartości poprzecznych momentów bezwładności powierzchni poziomych przekrojów tych przedziałów ładunkowych.

Swobodne powierzchnie cieczy zawsze obniżają stateczność statków, dlatego też dąży się do redukcji tego wpływu. Na etapie projektowania jednostki zbiorniki zapasów, ładunków płynnych, balastu wodnego dzielone są po szerokości szczelnymi przegrodami na dwie, trzy lub nawet cztery części. Podział zbiornika rozciągającego się na całą szerokość kadłuba, na lewą i prawą część, skutkuje czterokrotnym zmniejszeniem jego wpływu na stateczność, w wypadku jego niecałkowitego napełnienia. Podział po szerokości na trzy lub cztery części daje odpowiednio dziewięciokrotną i szesnastokrotną redukcję tego wpływu.

Natomiast w trakcie eksploatacji statku walka z obniżeniem stateczności polega na niedopuszczaniu do występowania w wielu zbiornikach statkowych swobodnych powierzchni cieczy. Obowiązuje tu zasada, by dla każdego rodzaju cieczy w nie więcej niż dwóch zbiornikach występowały swobodne powierzchnie.

### 13.4. Obliczanie małych kątów przechyłu

Małe kąty przechyłu, czyli do około  $7^\circ$ , lub kąty, dla których można stosować założenia stateczności początkowej, oblicza się na podstawie zależności pomiędzy wysokością metacentryczną i ramieniem prostującym:

$$l = GM_P \cdot \sin\varphi.$$

Poniżej opisano wyznaczanie przechyłu jednostki będącego skutkiem poprzecznego przemieszczenia masy.

Początkowy stan statku pokazuje rysunek 66a.

Jednostka ma poprawioną wysokość metacentryczną równą  $GM_P$ . Masę  $m$  przemieszczono poziomo, z początkowego jej położenia na lewej burcie (punkt 1 o współrzędnej poprzecznej  $y_1$ ) na prawą burtę do punktu 2 o współrzędnej  $y_2$ . Środek masy statku również zmieni swoje położenie: z punktu  $G_1$  leżącego na płaszczyźnie symetrii przejdzie do punktu  $G_2$  – rysunek 66b. W tym położeniu statek nie jest w równowadze, działa na niego niezerównoważony moment pary sił ciężar–wypór  $M_\varphi$ . Pod jego działaniem jednostka obraca się, w efekcie tego ruchu zmienia się położenie środka wyporu z punktu  $F$  do  $F_i$ , jak to widać na rysunku 66c. Obrót statku trwa tak

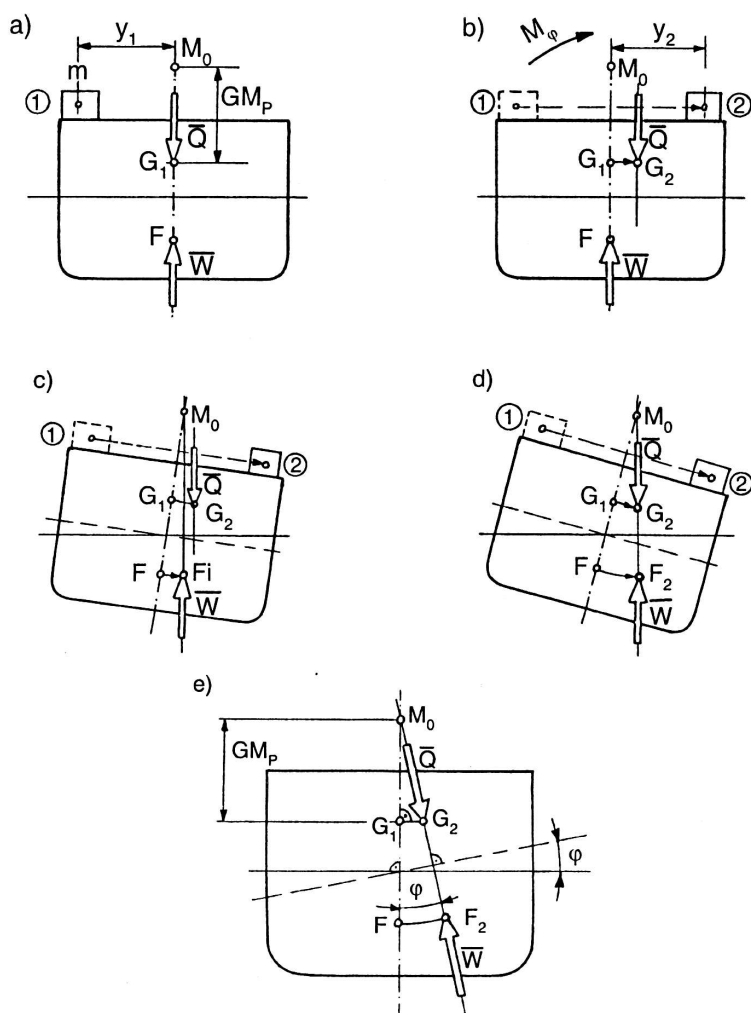
długo, aż linia działania siły wyporu pokryje się z linią wektora jego ciężaru – rysunek 66d. Jest to nowy stan równowagi statku – w przechyle wywołanym przemieszczeniem masy  $m$ . W tym stanie równowagi łatwo wyznaczyć linię działania wektora wyporu, łącząc linią prostą nowy środek masy statku  $G_2$  z metacentrum poprzecznym  $M_0$  – rysunek 66e. Kąt między początkowym i końcowym kierunkiem wektora wyporu, czyli poszukiwany kąt przechyłu statku, wyznacza się z zależności:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{G_1 G_2}{GM_P},$$

gdzie:

$G_1 G_2 = \frac{m}{D} \cdot (y_2 - y_1)$  – poziome przemieszczenie środka masy statku wynikające z przesunięcia masy  $m$  z punktu 1 do 2,

$GM_P$  – poprawiona wysokość metacentryczna statku przed przechylem.



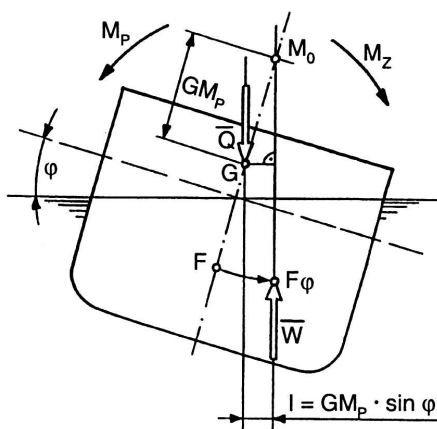
**Rys. 66.** Wyznaczanie małego kąta przechyłu przy poprzecznym przemieszczeniu masy na statku: a) stan początkowy, b) poprzeczne przemieszczenie masy i powstanie momentu przechylającego, c) obrót statku pod wpływem momentu przechylającego, d) nowy stan równowagi statku z trwałym przechylem, e) graficzna prezentacja kąta przechyłu statku

Końcowy wzór na kąt przechyłu wynikający z poprzecznego przesunięcia mas na statku jest następujący:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{m \cdot (y_2 - y_1)}{D \cdot GM_P}.$$

Inaczej wyznacza się kąt przechyłu statku, na który działa zewnętrzny moment przechylający  $M_Z$ , wywołany na przykład statycznym bocznym wiatrem. W takim wypadku wektor ciężaru nie zmienia swego położenia, natomiast w ślad za przechylającą się jednostką przemieszcza się wektor wyporu.

Przedstawia to rysunek 67.



Rys. 67. Wyznaczanie kąta przechyłu statku wywołanego zewnętrznym momentem przechylającym

Przechył statku rośnie aż do kąta, przy którym moment prostujący pary sił ciężar–wypór  $M_P$  całkowicie zrównoważy moment zewnętrzny:

$$M_P = Q \cdot l = M_Z,$$

Ramię prostujące  $l$  dla małych kątów przechyłu jest zależne od poprawionej wysokości metacentrycznej:

$$l = GM_P \cdot \sin \varphi,$$

więc zachodzi warunek, z którego wyznacza się wartość kąta przechyłu:

$$\sin \varphi = \frac{M_Z}{Q \cdot GM_P}.$$

Można również wyznaczyć ramię zewnętrznego momentu przechylającego  $l_z$  z zależności:

$$l_z = M_z / Q,$$

kąt przechyłu jest wówczas równy:

$$\sin \varphi = \frac{l_z}{GM_p}.$$

Jeżeli kąt przechyłu jednostki, wyznaczony z wyżej prezentowanych wzorów, jest większy od  $7^\circ$  (lub od kąta zakresu stosowania założeń stateczności początkowej dla danego statku), to należy spodziewać się błędu w jego określeniu. Trzeba wówczas zastosować inną metodę, właściwą dla wyznaczania dużych kątów przechyłu – jest ona przedstawiona w dalszej części książki.

### 13.5. Próba przechyłu i próba kołysania

Jeżeli w czasie eksploatacji statku zachodzi konieczność doświadczalnego sprawdzenia stateczności początkowej, to można tego dokonać za pomocą przeprowadzenia **próby przechyłu** lub **próby kołysania**.

**Próba przechyłu.** Polega ona na obliczeniu wysokości metacentrycznej na podstawie pomierzonego kąta przechyłu statku, przy wymuszeniu przechyłu za pomocą poziomego przemieszczenia znanej masy na znaną odległość. Najczęściej w tym celu przepompowuje się znaną masę balastu wodnego między zbiornikami prawej i lewej burty. Poprawioną wysokość metacentryczną jednostki, dla stanu załadowania w trakcie przeprowadzania próby, wylicza się z zależności:

$$GM_p = \frac{m_B \cdot (y_{PB} - y_{LB})}{D_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_p},$$

gdzie:

- $m_B$  – masa balastu wodnego przepompowanego między zbiornikami,
- $y_{PB}, y_{LB}$  – współrzędne poprzeczne środków zbiorników balastowych na prawej i lewej burcie,
- $D_p$  – wyporność statku w trakcie próby,
- $\varphi_p$  – pomierzony w trakcie próby kąt przechyłu statku.

**Stoczniowa próba przechyłu.** Przeprowadza się ją zawsze na nowo zbudowanym (lub przebudowanym) statku. Celem tej tzw. stoczniowej próby przechyłu jest wyznaczenie rzędnej środka masy pustego statku. Aby ją wyznaczyć z jak największą dokładnością, należy w trakcie przeprowadzania tej próby spełniać wymagania towarzystw klasyfikacyjnych, dotyczące:

warunków pogodowych, przygotowania jednostki, procedur przeprowadzania próby i procedur opracowania wyników pomiarów [12, 19]. Uogólniając, próba ta polega na wywołaniu przechyłu statku za pomocą znanego momentu przechylającego, powstającego wskutek poziomego przemieszczenia mas, pomiarzeniu kąta tego przechyłu, obliczeniu wysokości metacentrycznej statku w trakcie próby i wyznaczeniu rzędnej środka jego masy z wzoru:

$$z_{GP} = z_{MP} - GM,$$

gdzie:

- $z_{GP}$  – poszukiwana rzędna środka masy statku w trakcie próby,
- $z_{MP}$  – rzędna metacentrum statku podczas próby,
- $GM$  – wysokość metacentryczna statku w trakcie próby, bez uwzględniania swobodnych powierzchni cieczy w zbiornikach.

Jeżeli w trakcie przeprowadzania stoczniowej próby przechyłu na jednostce znajdują się zbiorniki niecałkowicie napełnione cieczami, to z próby wyznacza się poprawioną wysokość metacentryczną. Należy wówczas dokładnie wyznaczyć poprawkę wysokości metacentrycznej, uwzględniającą oddziaływanie swobodnych powierzchni cieczy w statkowych zbiornikach i obliczyć niepoprawioną wysokość metacentryczną statku:

$$GM = GM_p + \Delta GM.$$

W trakcie próby przechyłu statek nie jest całkowicie pusty (musi mieć niezbędną ilość zapasów, a niekiedy i balastu), toteż otrzymaną z próby rzędną jego środka masy przelicza się za pomocą równania momentów statycznych mas na rzeczywistą rzędną środka masy pustego statku. Stoczniową próbę przechyłu przeprowadza się co najmniej dwukrotnie.

**Próba kołysania statku.** Polega na wyznaczeniu poprawionej wysokości metacentrycznej na podstawie pomierzonego okresu kołysań własnych statku. Zależność między tymi parametrami ujmuje uproszczony wzór:

$$T_R [s] = \frac{2 \cdot C [-] \cdot B [m]}{\sqrt{GM_p [m]}},$$

gdzie:

- $T_R$  – pomierzony doświadczalnie okres kołysań własnych statku,
- $C$  – współczynnik rozkładu mas na statku względem osi kołysania, można go obliczyć z empirycznego wzoru zalecanego przez IMO [12]:

$$C = 0,373 + 0,023 \cdot \frac{B}{T} - 0,043 \cdot \frac{L_w}{100},$$

- $B$  – szerokość konstrukcyjna kadłuba statku.,
- $T$  – aktualne zanurzenie jednostki,
- $L_w$  – długość kadłuba statku na wodnicy pływania, można przyjmować, że:

$$L_w \approx L_{pp}.$$

Wyznaczona z powyżej przedstawionego wzoru wartość współczynnika rozkładu mas na jednostce **C** może znacznie różnić się od rzeczywistej jego wartości, dlatego też zaleca się, aby przynajmniej dla dwóch stanów załadowania statku (pełne załadowanie i stan balastowy) wyznaczyć doświadczalnie wartości tego współczynnika. Należy w tym celu, dla danego stanu załadowania statku i dla jego znanej wysokości metacentrycznej, przeprowadzić próbę kołysania i na podstawie podanej wyżej zależności między statecznością jednostki a okresem jej kołysań własnych obliczyć wartości współczynnika **C**.

Wysokość metacentryczna statku, uwzględniająca wpływ swobodnych powierzchni cieczy **GM<sub>P</sub>**, wyznaczona na podstawie próby kołysania, jest równa:

$$GM_P = \left( \frac{2 \cdot C \cdot B}{T_R} \right)^2.$$

Próbie kołysania należy przeprowadzić kilkakrotnie.

Największym problemem jest wzbudzenie kołysań własnych jednostki. Na okrętach wojennych i małych jednostkach handlowych z liczną załogą czyni się to przy pomocy załogi przebiegającej z burty na burtę, w rytmie zgodnym z okresem wzbudzanego kołysania statku, ewentualnie za pomocą rytmicznych wychyleń płetwy sterowej. Na dużych statkach istnieje tylko jedna możliwość ich rozkołysania – ustawienie jednostki bokiem do fali. Są to jednak kołysania wymuszone falowaniem, a nie własne, co powoduje, że dokładność tej metody wyznaczania wysokości metacentrycznej na dużych jednostkach jest niewielka.

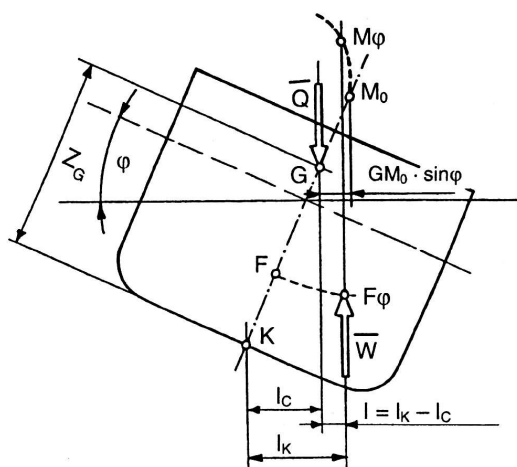
## 14. STATECZNOŚĆ PRZY DUŻYCH KĄTACH PRZECHYŁU

### 14.1. Wykres ramion prostujących

Przy przechyłach statku większych niż 7° (lub od zakresu kątów, dla których słuszne są założenia stateczności początkowej) krzywa środków wyporu odbiega kształtem od łuku okręgu o promieniu równym początkowemu promieniowi metacentrycznemu. Zmienia się wartość lokalnego promienia metacentrycznego (początkowo rośnie on, a po wejściu pokładu w wodę lub wyjściu obła z wody zaczyna maleć), a lokalne metacentrum wędruje po ewolucie metacentrycznej (rys. 56 i 57).



Położenie wektorów ciężaru i wyporu jednostki, przechylonej o duży kąt, prezentuje rysunek 68.



**Rys. 68.** Układ sił na statku przechylonym o duży kąt:  $M_0$  – metacentrum początkowe,  $M_\varphi$  – metacentrum przy dużym kącie przechyłu,  $l_K$  – ramię kształtu,  $l_C$  – ramię ciężaru,  $l$  – ramię prostujące,  $GM_0 \cdot \sin \varphi$  – ramię prostujące obliczone z początkowej wysokości metacentrycznej statku

Dla dużych kątów przechyłu miarą stateczności statku jest ramię prostujące  $l$ , czyli odległość między wektorami ciężaru i wyporu.

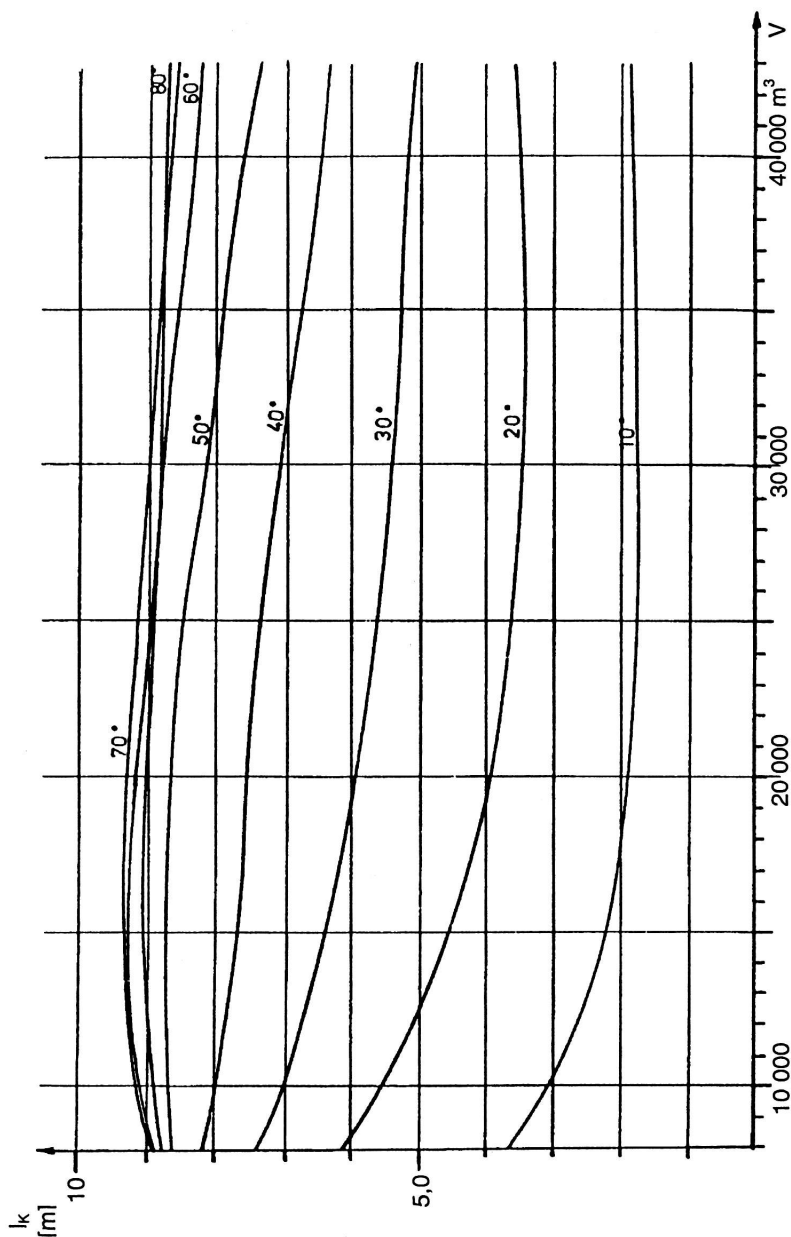
Wykres krzywej stateczności statycznej wyznacza się na podstawie ramion prostujących, obliczonych dla stałych wartości kątów od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ , co  $10^\circ$  lub co  $5^\circ$ . Najczęściej ramiona prostujące wyznacza się jako różnice między tzw. ramionami kształtu i ramionami ciężaru (rys. 68):

$$l = l_K - l_C,$$

Ramiona kształtu –  $l_K$ , dla różnych zanurzeń wypornościowych statku i dla różnych kątów jego przechyłu, wyznacza projektant jednostki na podstawie kształtu kadłuba.

W dokumentacji eksploatacyjnej statku dane te przedstawia się w postaci tabel lub wykresów. Często określane są terminem **pantokareny**.

Na rysunku 69 pokazane są przykładowe pantokareny w formie wykresu, natomiast załącznik 9 zawiera tabelę ramion kształtu dla drobnicowca uniwersalnego o nośności 13 600 t. Z obu typów dokumentów, dla wyznaczonej dla statku objętości podwodnej części kadłuba  $V$  odczytuje się ramiona kształtu  $l_K$ , dla kątów od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  co  $10^\circ$ .



**Rys. 69.** Wykres ramion kształtu (pantokareny) masowca uniwersalnego o maksymalnej nośności 23 900 t

Ramię ciężaru jednostki, zależne od rozkładu mas na statku, jest równe:

$$l_C = z_G \cdot \sin \varphi,$$

można je więc łatwo wyznaczyć na podstawie rzędnej środka masy statku, obliczonej dla jego stanu załadowania.

Ostatecznie, formuła na obliczanie ramienia prostującego jest następująca:

$$l(\varphi_j) = l_K - l_C = l_K(V, \varphi_j) - z_G \cdot \sin \varphi_j,$$

gdzie:

- $l_K(V, \varphi_j)$  – ramię kształtu, odczytane z dokumentacji statku dla objętości podwodnej części kadłuba odpowiadającej wyporności jednostki, dla kąta  $\varphi_j$ ,
- $\varphi_j$  – kąt przechyłu, od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  co  $5^\circ$  lub co  $10^\circ$ ,
- $z_G$  – rzędna środka masy statku, obliczona dla jego stanu załadowania.

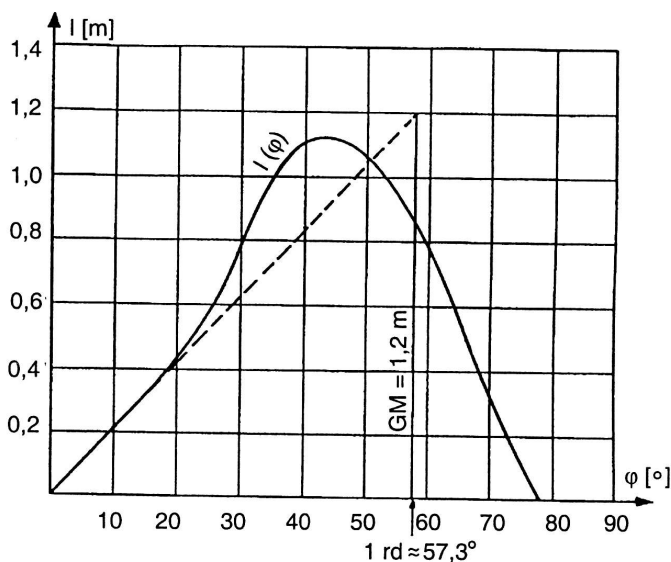
W wypadku obliczeń ręcznych (bez użycia komputera lub programowanego kalkulatora) wartości ramion prostujących wygodnie jest obliczać w tabeli. Wzór takich obliczeń zamieszcza tabela 13.

**Tabela 13**

Obliczanie ramion prostujących masowca uniwersalnego o maksymalnej nośności 23 900 t, dla objętości podwodnej części kadłuba  $V = 36\,000\text{ m}^3$  i rzędnej środka masy  $z_G = 9,00\text{ m}$ . Nieoprawiona wysokość metacentryczna wynosi  $GM = 1,20\text{ m}$

$\varphi$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$	$70^\circ$	$80^\circ$	$90^\circ$
$l_K$	0,00	1,75	3,45	5,28	6,78	7,90	8,60	8,85	8,82	8,10
$l_C = z_G \cdot \sin \varphi$	0,00	1,54	3,01	4,50	5,67	6,84	7,83	8,55	8,91	9,00
$l = l_K - l_C$	0,00	0,21	0,44	0,78	1,11	1,06	0,77	0,30	-0,09	-0,90

Krzywą ramion prostujących  $l(\varphi)$  dla danych z tabeli 13 przedstawia rysunek 70.



**Rys. 70.** Krzywa ramion prostujących masowca uniwersalnego o nośności 23 900 t, dla  $V = 36\,000\text{ m}^3$  i  $z_G = 8,20\text{ m}$

Ramię prostujące po przemieszczeniu środka masy jest wobec tego równe:

$$l_2(\varphi) = l_1(\varphi) - G_1 G_2 \cdot \sin \varphi,$$

gdzie:

$l_1(\varphi)$  – początkowe ramię prostujące (przed pionową zmianą położenia środka masy statku),

$l_2(\varphi)$  – końcowe ramię prostujące (po zmianie położenia środka masy statku).

Korektę krzywej ramion prostujących można wykonać wykreślnie. Na wykresie stateczności statycznej dla stanu początkowego  $l_1(\varphi)$  nanosi się krzywą zmiany ramienia prostującego  $\Delta l(\varphi)$  i dla każdego kąta dokonuje się graficznej korekty, odejmując od ramienia  $l_1(\varphi_i)$  poprawkę ramienia  $\Delta l(\varphi_i)$ .

Tego typu korekta prezentowana jest na rysunku 71c.

Poprzeczne przemieszczenie środka masy statku powoduje powstanie przechyłu jednostki oraz obniża krzywą ramion stateczności statycznej.

Skutki takiego ruchu środka masy pokazuje rysunek 72a. Ramię prostujące statku po przesunięciu środka masy z płaszczyzny symetrii w bok (na rysunku na prawą burtę) jest niższe niż w stanie początkowym jednostki o wartość:

$$\Delta l(\varphi) = G_1 G_2 \cdot \cos \varphi,$$

gdzie  $G_1 G_2$  – poziome przesunięcie środka masy statku.

To ramię jest wobec tego równe:

$$l_2(\varphi) = l_1(\varphi) - G_1 G_2 \cdot \cos \varphi,$$

gdzie:

$l_1(\varphi)$  – początkowe ramię prostujące (przed poprzecznym przemieszczeniem środka masy statku),

$l_2(\varphi)$  – końcowe ramię prostujące (po zmianie położenia środka masy statku).

Również i w tym wypadku można dokonać wykreślnej korekty krzywej ramion prostujących. Oblicza się funkcję zmniejszenia wartości ramienia prostującego:

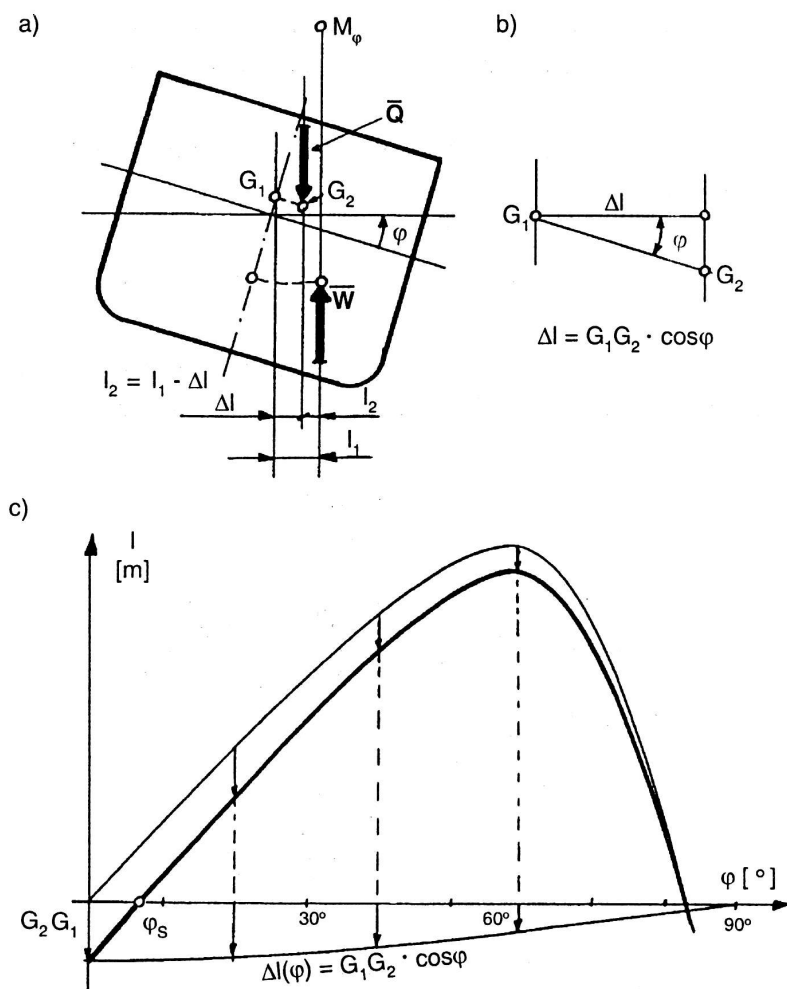
$$\Delta l(\varphi_i) = G_1 G_2 \cdot \cos(\varphi),$$

Przedstawia ją rysunek 72b.

Dla każdego kąta przechyłu dokonuje się graficznej korekty, odejmując od ramienia  $l_1(\varphi_i)$  poprawkę ramienia  $\Delta l(\varphi_i)$ .

Sposób wykonania tej korekty pokazany jest na rysunku 72c. Na podstawie tego rysunku można również wyznaczyć nowe położenie statku, czyli kąt jego

trwałego przechyłu. Jest to kąt, dla którego skorygowana krzywa stateczności statycznej  $l_2(\varphi_i)$  przecina poziomą oś układu współrzędnych wykresu.



**Rys. 72.** Korekta krzywej stateczności statycznej dla poprzecznego przemieszczenia masy na statku: a) układ sił na przechylonym statku i zmiana ramienia prostującego, b) wyznaczanie zmiany wartości ramienia prostującego  $\Delta l(\varphi)$ , c) graficzna korekta krzywej ramion prostujących

Swobodne powierzchnie cieczy w zbiornikach (a w stanach awaryjnych również i w innych przedziałach) powodują zmniejszenie ramion prostujących. Ciecz w zbiorniku pod wpływem przechyłu jednostki przelewa się w stronę zagłębiającej się w wodę burty, a jej środek masy i w ślad za nim również środek masy statku przemieszczają się w bok i do góry względem układu współrzędnych związanego ze statkiem.

Obrazuje to rysunek 73a.

Konsekwencją takiego przemieszczenia środka masy jednostki jest zmniejszenie ramienia prostującego o odcinek  $\Delta l_C(\varphi)$ . Wartość tego odcinka, dla pojedynczego zbiornika niecałkowicie zapełnionego cieczą, jest równa:

$$\Delta l_C(\varphi_i) = \Delta y_G \cdot \cos \varphi_i + \Delta z_G \cdot \sin \varphi_i,$$

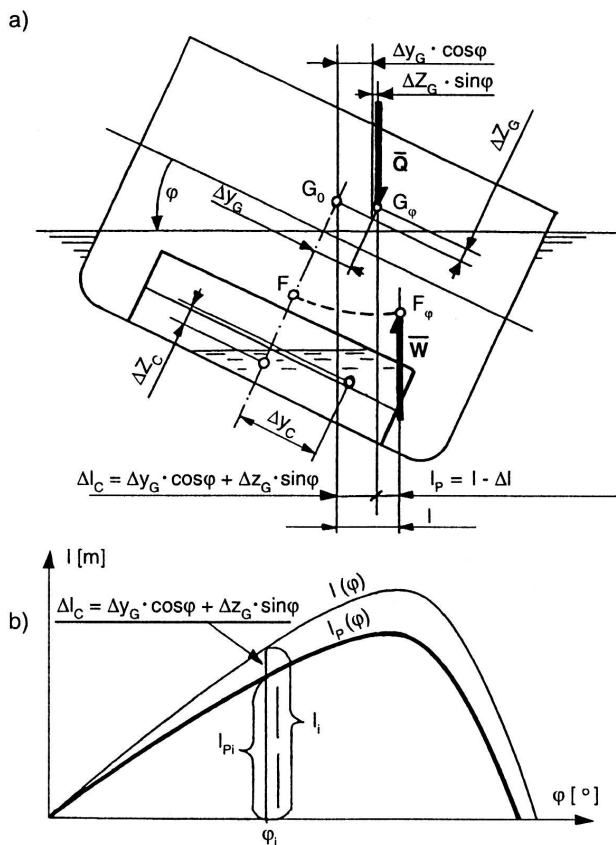
gdzie:

- $\Delta y_G$  – poprzeczne przemieszczenie środka masy statku, wynikające z poprzecznego przemieszczenia środka masy cieczy w zbiorniku –  $\Delta y_C$ ,
- $\Delta z_G$  – pionowe przemieszczenie środka masy statku, wynikające z pionowego przemieszczenia środka masy cieczy w zbiorniku –  $\Delta z_C$ .

Ramię prostujące, skorygowane o wpływ swobodnej powierzchni cieczy w zbiorniku, jest równe:

$$l_p(\varphi_i) = l(\varphi_i) - \Delta l_C(\varphi_i) = l(\varphi_i) - (\Delta y_G \cdot \cos \varphi_i + \Delta z_G \cdot \sin \varphi_i).$$

Graficzny sposób korekty krzywej ramion prostujących na wpływ swobodnej powierzchni cieczy w zbiorniku pokazuje rysunek 73b.



**Rys. 73.** Wpływ swobodnej powierzchni cieczy w zbiorniku na krzywą ramion stateczności statycznej: a) przemieszczenie środka masy statku wywołane przelaniem się cieczy w niecałkowicie napełnionym zbiorniku, b) graficzna korekta krzywej ramion prostujących

W wypadkach, gdy na jednostce jest kilka zbiorników niecałkowicie zapełnionych cieczami, dla każdego kąta przechyłu sumuje się poprawki ramion prostujących od poszczególnych zbiorników. Projektant statku dla każdego zbiornika jednostki oblicza redukcję ramienia prostującego, wywołaną

swobodnymi powierzchniami cieczy, dla przyjętych kątów przechyłu statku; najczęściej zmieniających się co 5 lub 10 stopni. Wyniki tych obliczeń, przeważnie w formie tabel znajdują się w eksploatacyjnej dokumentacji statku.

W załączniku 10 podane są wartości poprawek ramion prostujących od swobodnych powierzchni cieczy w zbiornikach drobnicowca uniwersalnego o nośności 13 600 t.

Poprawione (ze względu na wpływ swobodnych powierzchni cieczy w kilku zbiornikach) ramiona prostujące oblicza się według wzoru:

$$l_P(\varphi_i) = l(\varphi_j) - \sum_{i=1}^n \Delta l_j(\varphi_i),$$

gdzie:

$l_P(\varphi_i)$  – poprawione ramię prostujące dla kąta przechyłu  $\varphi_i$ ,

$l(\varphi_i)$  – ramię prostujące dla kąta przechyłu  $\varphi_i$ , obliczone jako:

$$l(\varphi_i) = l_K(\varphi_i) - z_G \cdot \sin \varphi_i,$$

$\Delta l_j(\varphi_i)$  – poprawka ramienia prostującego, dla zbiornika  $j$  i dla kąta przechyłu  $i$ ,

indeks  $j$  – numer zbiornika ze swobodną powierzchnią cieczy,

indeks  $n$  – liczba zbiorników ze swobodnymi powierzchniami cieczy.

Jeśli w dokumentacji statku nie ma danych umożliwiających korektę ramion prostujących w funkcji kąta przechyłu, stosuje się uproszczoną metodę wyznaczania poprawionych ramion prostujących. Polega ona na korekcie położenia środka masy jednostki; do rzędnej środka masy statku  $z_G$  dodaje się poprawkę wysokości metacentrycznej  $\Delta GM$ , a następnie wyznacza się poprawione ramię prostujące  $z_{GP}$  według zależności:

$$l_P(\varphi_i) = l(\varphi_i) - z_{GP} \cdot \sin \varphi_i,$$

gdzie  $z_{GP}$  – poprawiona (na wpływ swobodnych powierzchni cieczy w zbiornikach) rzędna środka masy statku, która może być obliczona np. na podstawie informacji w dokumentacji statku o momentach poprawek wysokości metacentrycznej:

$$z_{GP} = z_G + \Delta GM = z_G + \frac{\sum_{j=1}^n m \Delta GM_j}{D},$$

gdzie:

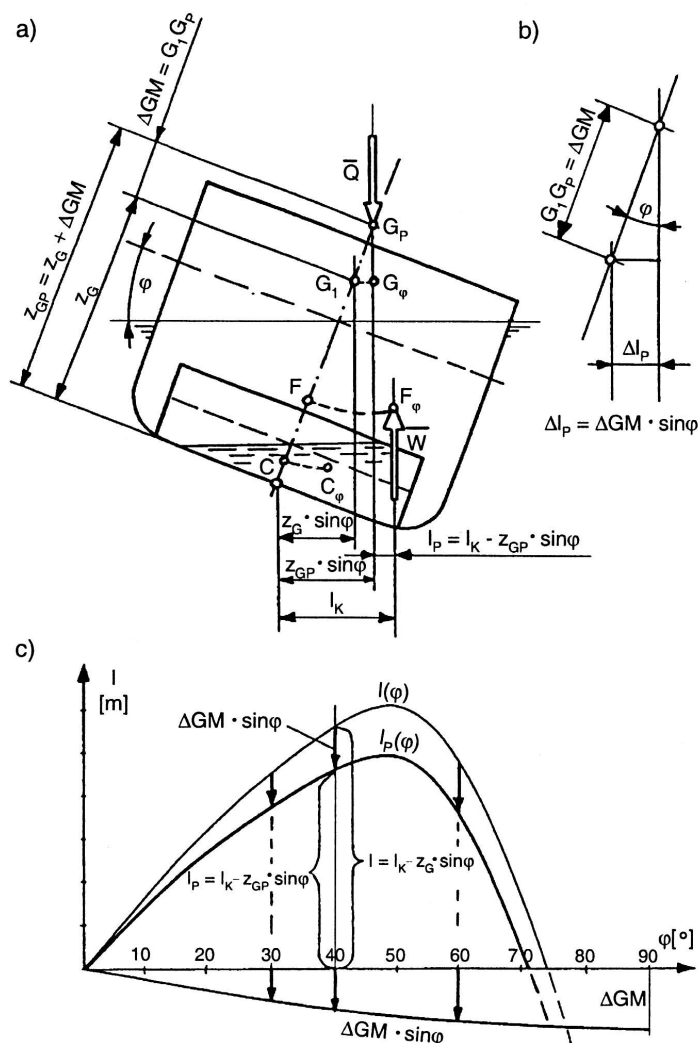
$\Delta GM = G_1 G_P$  – poprawka wysokości metacentrycznej równa pozornemu podniesieniu środka masy statku w górę, zastępującemu rzeczywiste przemieszczenie środka masy statku pod wpływem ruchu cieczy w zbiorniku niecałkowicie zapełnionym,

$m \Delta GM_j$  – moment poprawki wysokości metacentrycznej od swobodnej powierzchni cieczy w zbiorniku  $j$ .

Ten sposób korekty krzywej ramion prostujących na wpływ swobodnych powierzchni cieczy prezentowany jest na rysunku 74.

Jeżeli obliczenia stateczności statku wykonuje się bez pomocy komputera lub programowanego kalkulatora, poprawione ramiona prostujące wyznacza się w pomocniczej tabeli (jak tabela 13), wstawiając ramię ciężaru obliczone dla skorygowanej (powiększonej o poprawkę wysokości metacentrycznej) rzędnej środka masy jednostki:

$$l_P = z_{GP} \cdot \sin \varphi.$$



**Rys. 74.** Uproszczona metoda wyznaczania wpływu swobodnych powierzchni cieczy na stateczność przy dużych kątach przechyłu za pomocą korekty rzędnej środka masy statku: a) pozorne przemieszczenie środka masy statku w górę, wywołane przelaniem się cieczy w niecałkowicie napełnionym zbiorniku, b) wyznaczanie wielkości korekty ramienia prostującego dla dowolnego kąta przechyłu, c) graficzna korekta krzywej ramion prostujących



### 14.3. Wyznaczanie dużych kątów przechyłu

Na podstawie krzywej stateczności statycznej statku, dla określonego stanu jego załadowania, można wyznaczyć kąt przechyłu statku pod wpływem dużego momentu przechylającego, tzn. wywołującego przechył większy niż  $7^\circ$ . Należy w tym celu na krzywą stateczności statycznej nanieść wykres zależności ramienia momentu przechylającego od kąta. To ramię wylicza się z zależności

$$l_z(\varphi) = \frac{M_z(\varphi)}{Q},$$

gdzie:

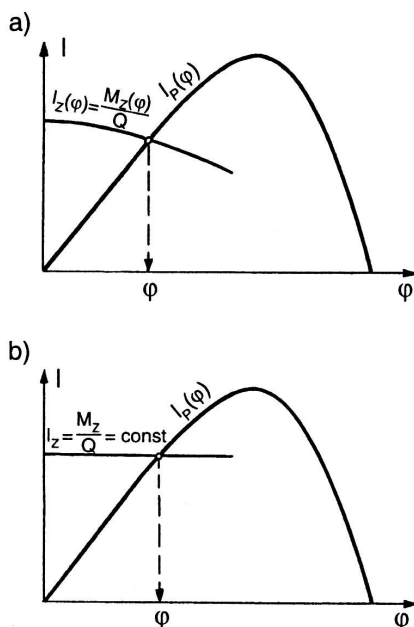
- $M_z(\varphi)$  – zależność zewnętrznego momentu przechylającego statek od kąta jego przechyłu [kNm],  
 $Q$  – ciężar statku [kN].

Graficzny obraz wyznaczania dużego kąta przechyłu pokazuje rysunek 75a. Jeżeli brakuje informacji o zmianie momentu przechylającego przy zmianie kąta przechyłu, stosuje się uproszczenie polegające na przyjęciu stałej, niezależnej od przechyłu jednostki, wartości momentu zewnętrznego:

$$l_z = M_z / Q,$$

gdzie  $M_z$  – zewnętrzny moment przechylający, niezależny od przechyłu statku.

Wyznaczanie kąta w takim wypadku prezentuje rysunek 75b.

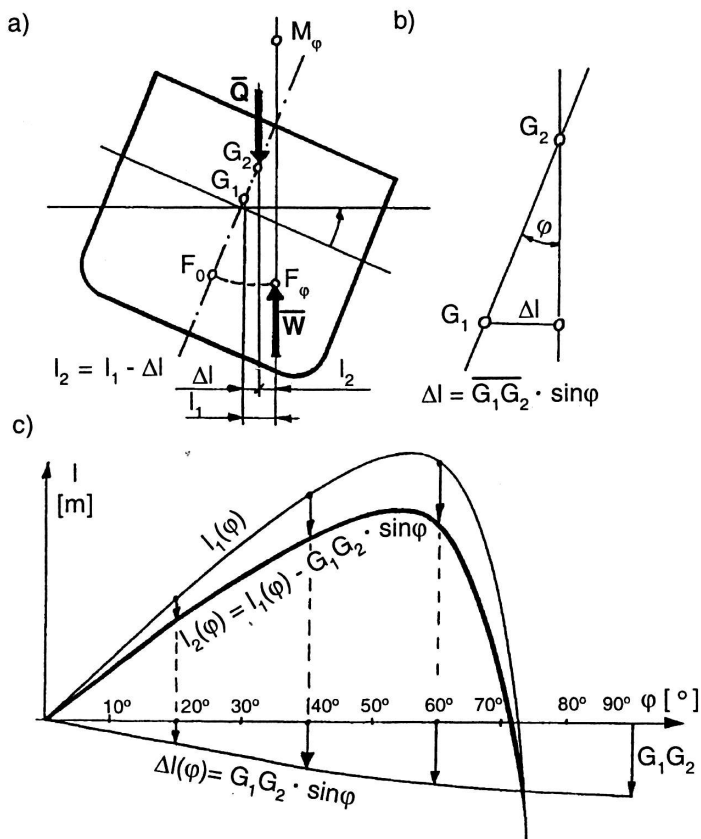


**Rys. 75.** Wyznaczanie dużego kąta przechyłu: a) dla momentu przechylającego zależnego od kąta przechyłu, b) dla stałego, niezależnego od przechyłu, momentu przechylającego

## 14.2. Korekty krzywej stateczności statycznej

Przemieszczenie na statku środka jego masy w kierunku poziomym lub pionowym powoduje zmianę krzywej ramion prostujących.

Pionowe przesunięcie środka masy jednostki i skutki tego ruchu na ramiona prostujące pokazuje rysunek 71a.



**Rys. 71.** Korekta krzywej stateczności statycznej dla pionowego przemieszczenia masy na statku; a) układ sił na przechylonej jednostce, b) wyznaczanie zmiany ramienia prostującego  $\Delta l(\varphi)$ , c) graficzna korekta krzywej ramion prostujących

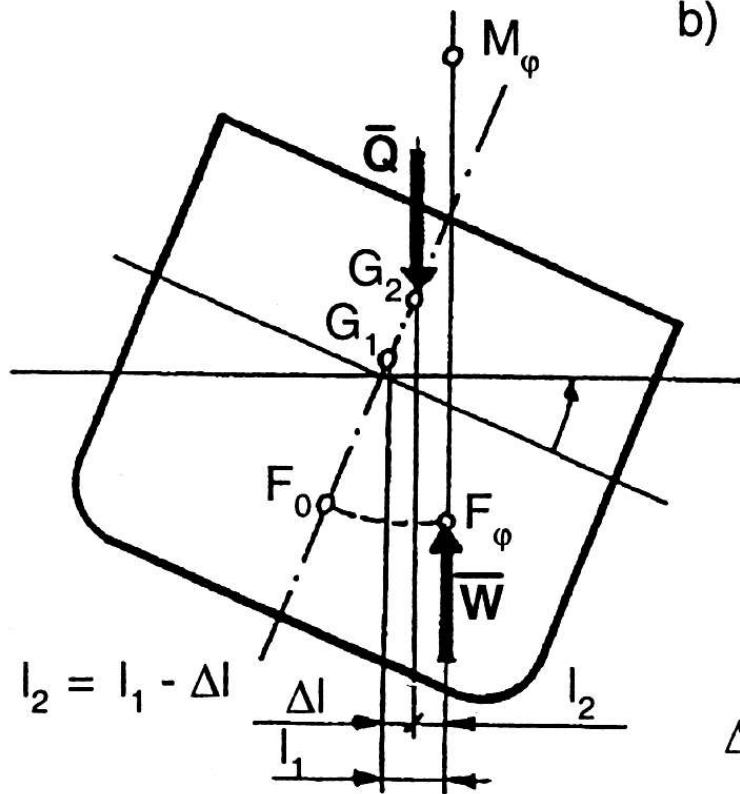
Podniesienie w górę środka masy jednostki, z punktu  $G_1$  do  $G_2$ , powoduje zmniejszenie ramion prostujących o odcinek równy:

$$\Delta l(\varphi) = G_1 G_2 \cdot \sin \varphi,$$

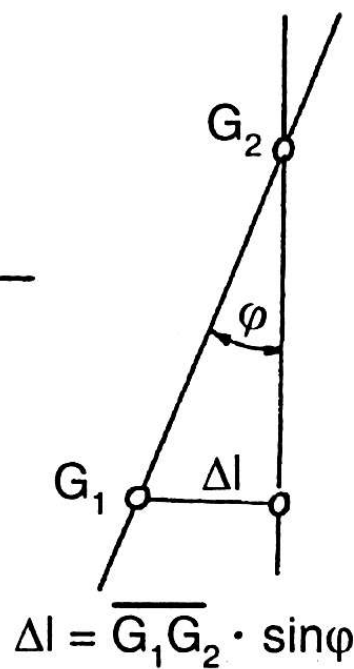
gdzie  $G_1 G_2$  – pionowe przesunięcie środka masy statku.

Zmiana ramienia prostującego, czyli odcinek  $\Delta l(\varphi)$ , przedstawiona jest na rysunku 71b.

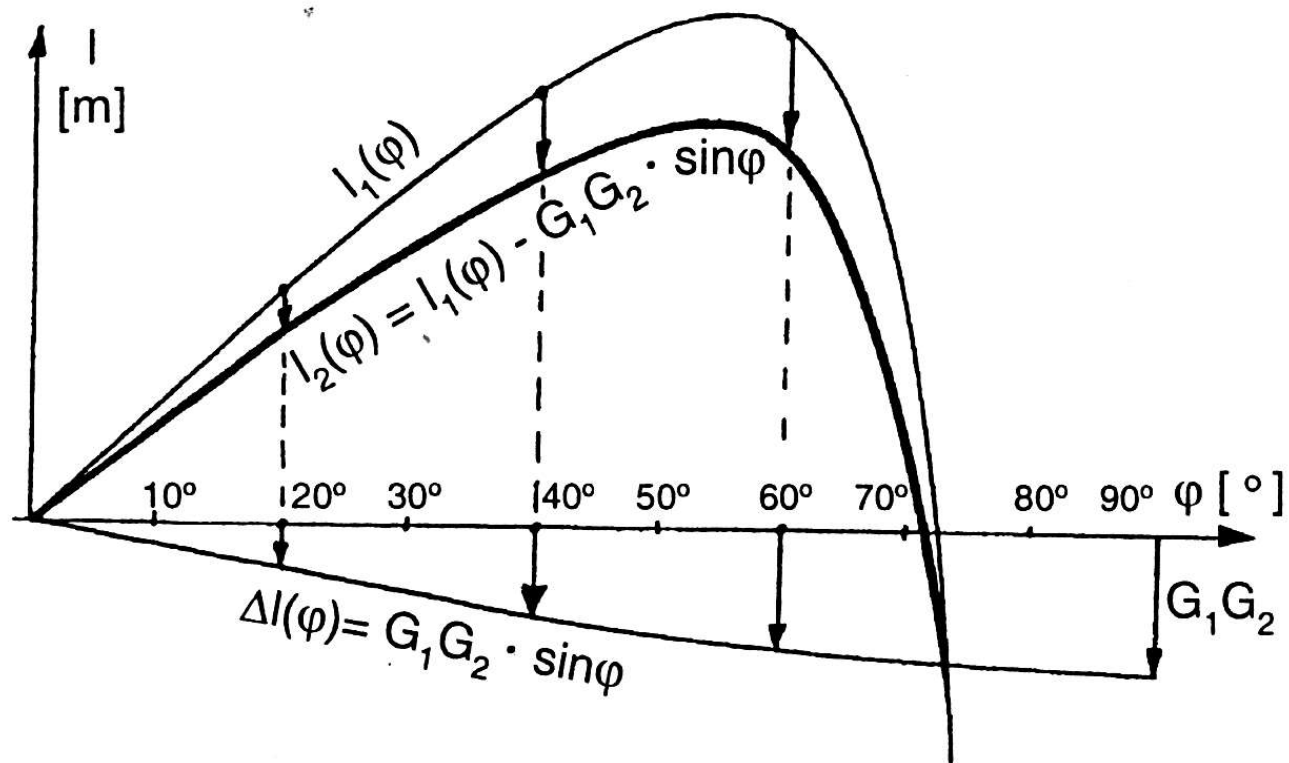
a)



b)



c)



## 15. STATECZNOŚĆ WZDŁUŻNA

### 15.1. Wzdłużna równowaga statku

Reakcję statku na przyłożone do niego wzdłużne momenty opisuje stateczność wzdłużna. W praktyce eksploatacyjnej jedynie momenty wzdłużne wynikające z falowania morza są na tyle duże, że silnie wpływają na zachowanie się statku. Są one zmienne w czasie, odpowiedzią statku na nie jest jego kiwanie się, będące jednym z oscylacyjnych ruchów wzbudzanych przez fale. Zagadnienie ruchów statku pod wpływem falowania (regularnego i nieregularnego) nie wchodzi jednak w zakres stateczności wzdłużnej – jest tematem rozważanym w ramach działu hydromechaniki okrętowej, zwanego właściwościami morskimi.

Podstawowym problemem w stateczności wzdłużnej jest wyznaczanie przegłębień lub zanurzeń na dziobach i rufach statków dla różnych wzdłużnych rozkładów mas. Rozkład masy wzdłuż kadłuba jednostki, wynikający z rozkładów mas: ładunków, zapasów, balastu i ze wzdłużnego rozkładu masy pustego statku, wpływa na wzdłużne usytuowanie środka masy, w którym zaczepiony jest wektor ciężaru statku. Zgodnie z prawami pływalności (rozdział 10) i w wyniku braku oddziaływania zewnętrznych wzdłużnych momentów na statek będącym w stanie równowagi na tej samej linii, co wektor siły ciężkości, musi leżeć wektor wyporu.

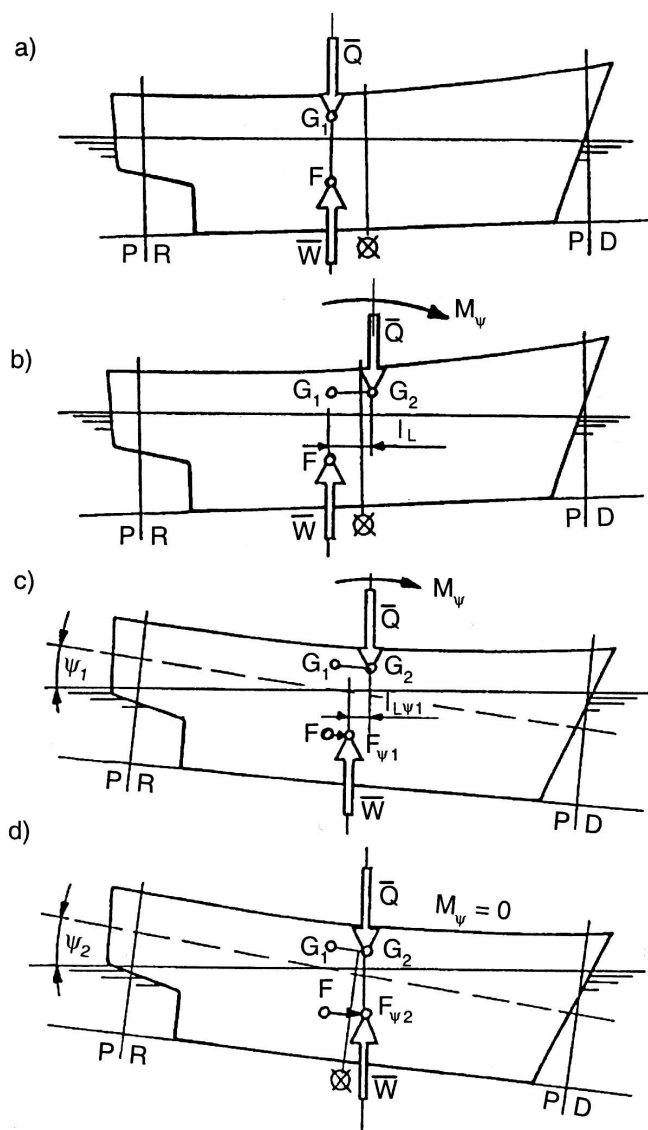
Każda zmiana wzdłużnego rozkładu mas na statku, która powoduje zmianę wartości odciętej środka masy, może być traktowana jako przyłożenie do statku wzdłużnego momentu przegłębiającego, którego wartość jest równa iloczynowi ciężaru statku i drogi przemieszczenia jego środka masy:

$$M_{\psi} = Q \cdot G_1 G_2 = Q \cdot (x_{G2} - x_{G1}),$$

gdzie  $G_1 G_2$  – wzdłużne przemieszczenie środka masy statku.

Zachowanie się jednostki pod wpływem momentu przegłębiającego, wytworzonego przesunięciem mas, przedstawiono na rysunku 76. Początkowo, w stanie równowagi, linie działania siły ciężkości i wyporu pokrywają się (rys. 76a). Przemieszczenie środka masy statku z punktu  $G_1$  do  $G_2$ , równoważne przyłożeniu do statku momentu –  $M_{\psi}$ , jak to pokazano na rysunku 76b, powoduje wytrącenie jednostki ze stanu równowagi. Obraca się ona zgodnie z kierunkiem działania momentu – dziób zanurza się w wodę, a wynurza się rufa. Zmienia się kształt podwodnej części kadłuba przy zachowanej stałej jej objętości. W wyniku tej zmiany środek objętości kadłuba, będący równocześnie

miejszem przyłożenia siły wyporu (czyli środkiem wyporu), przemieszcza się w stronę dziobu jednostki (rys. 76c). Obrót kadłuba statku i wynikająca z tego wędrówka środka wyporu w stronę dziobu trwa aż do osiągnięcia przez statek takiego kąta przegłębienia, przy którym linia działania wyporu w nowym położeniu pokryje się z linią działania siły ciężkości (rys. 76d). W porównaniu do stanu wyjściowego – statek z niewielkim przegłębieniem na rufę, po przemieszczeniu środka masy w stronę dziobu będzie miał duże przegłębienie na dziób. Odmienna wędrówka środka masy jednostki, w stronę rufy, spowoduje wzrost rufowego przegłębienia.



**Rys. 76.** Reakcja statku na wzdłużne przemieszczenie środka jego masy: a) stan początkowy – linie działania siły ciężkości i wyporu pokrywają się, b) przesunięcie środka masy statku w kierunku dziobu, równoważne przyłożeniu do statku momentu przegłębającego, c) obrót statku pod wpływem momentu przegłębającego, związany z przemieszczaniem się środka wyporu w stronę dziobu, d) nowy stan równowagi statku

Ze względu na niewielkie kąty przegłębienia, jakie mogą występować w eksploatacyjnych stanach jednostki, można do analizy zachowania się statku stosować te same założenia, co w stateczności początkowej poprzecznej. Oznacza to, że przy zmianie przegłębienia środek wyporu jednostki przemieszcza się po łuku okręgu. Stały promień krzywizny tego łuku, zwany **wzdłużnym promieniem metacentrycznym**  $R_L$ , jest zaczepiony w stałym punkcie określanym jako **metacentrum wzdłużne**  $M_L$  (rys. 77). Miarą stateczności wzdłużnej jest **wzdłużna wysokość metacentryczna**  $GM_L$ . Wyznacza się ją ze wzoru:

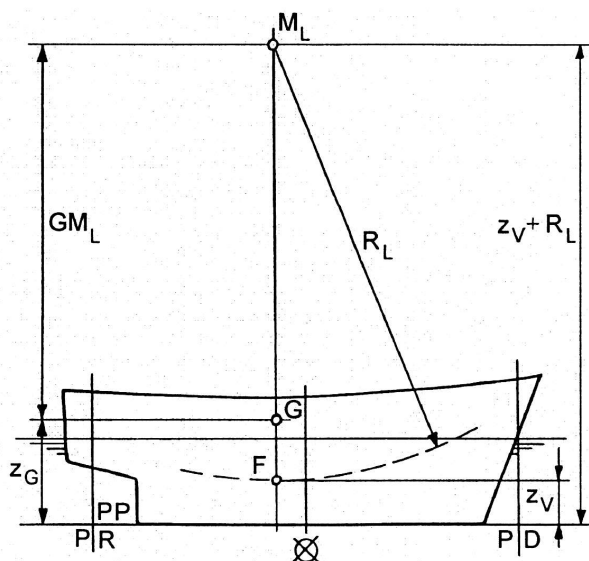
$$GM_L = z_F + R_L - z_G,$$

gdzie:

$R_L$  – wzdłużny promień metacentryczny, zależny (podobnie jak poprzeczny promień metacentryczny) od kształtu kadłuba statku;

$$R_L = \frac{I_L}{V},$$

$I_L$  – wzdłużny moment bezwładności powierzchni wodnicy pływania jednostki.



**Rys. 77.** Wzdłużny promień metacentryczny, metacentrum wzdłużne i wzdłużna wysokość metacentryczna

Wzdłużny promień metacentryczny jest wielokrotnie większy od różnicy pomiędzy rzędnymi środka wyporu i środka masy statku, stąd, bez popełniania znaczących błędów, przyjmuje się, że:

$$GM_L \approx R_L.$$