

orijskih formi na skoro mističan način postići smanjenje otpora broda. J. Nyström je 1860, prema prijedlogu Chapmana, sastavio brodske linije od paraboličnih lukova, i time mogao proračunati ovisnost istisnine i položaj njenog težišta od gaza broda, za neki odabrani koeficijent istisnine. I on je predlagao forme najpovoljnijeg otpora, zasnovane na izvjesnoj zakonitosti raspodjele površina rebara po dužini broda (areala rebara). Početkom XX st. D. W. Taylor je razvio matematičku metodu za brzo projektiranje brodske forme određenih karakteristika i primijenio je u svojim sistematičnim ispitivanjima modela brodova. Njegova namjera nije bila da matematičkim definiranjem linija polučni forme minimalnog otpora, nego samo da dobije linije željenog oblika. Time je znatno olakšano sistematično mijenjanje forme mnogobrojnih grupa modela, ne samo pri njihovom osnivanju nego i pri crtanju njihovih linija. Dok je Taylor dao posebne jednadžbe za vodne linije, a posebne za rebra, G. Weinblum je nastojao 15 godina kasnije da nađe općenitu formulu koja bi predočivala cjelokupnu brodsku formu. Taj rad on je nastavio u USA poslije Drugog svjetskoga rata u Taylorovu basenu za ispitivanje modela. Osim pri ispitivanju modela, matematičke forme igraju veliku ulogu u teorijskim proračunima, kao što su proračuni plovnosti, stabiliteta i otpora broda, a imaju i znatnu praktičnu vrijednost, jer čine suvišnim crtanje brodskih linija u naravnoj veličini u crtari brodogradilišta.

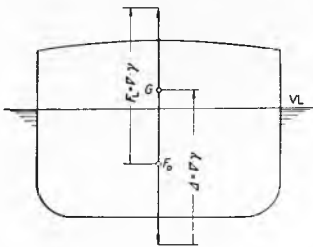
PLOVNOST BRODA

Uvjeti plovnosti. Brod pluta na vodi na osnovu Arhimedova zakona, po kojem na svako tijelo uronjeno u tekućinu djeluje sila uzgona koja je jednaka težini istisnute tekućine. Dakle, da bi brod plutao, umnožak volumena njegova podvodnog dijela sa svim privjescima (vanjskom oplatom čeličnih brodova, kormilom, propelerom, skrokovima, osovinskim nogavicama itd.) i specifične težine tekućine u kojoj brod plovi mora biti jednak ukupnoj težini broda i svih predmeta na njemu. To je prvi uvjet plovnosti, koji se može izraziti jednadžbom:

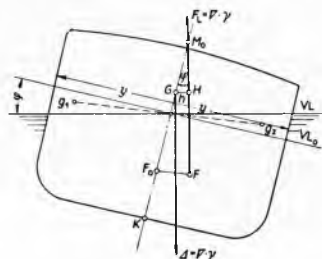
$$\Delta = F_L = \nabla \gamma,$$

gdje je Δ težina broda i svih predmeta na njemu, tzv. težina sistema, ili jednostavno težina broda, F_L sila uzgona, ∇ volumen podvodnog dijela broda s privjescima, γ specifična težina vode u kojoj brod plovi.

Sila uzgona, koja se može smatrati rezultantom svih vertikalnih komponenata pritiska tekućine, prolazi kroz težište istisnute tekućine (težište istisnine F_o), analogno kao što se uzima da ukupna težina broda djeluje iz jednog zajedničkog težišta (težišta sistema G). Budući da dvije sile mogu biti u ravnoteži samo ako djeluju u istom pravcu, a pravac sila težine i uzgona je vertikalna, moraju se težište istisnine F_o i težište sistema G nalaziti na istoj okomici na plovnu liniju (sl. 1). To je drugi uvjet plovnosti.



Sl. 1. Drugi uvjet plovnosti



Sl. 2. Treći uvjet plovnosti

Treći je uvjet da brod mora ploviti u stabilnom položaju. To znači: ako se uslijed djelovanja vanjskih sila (vjetra, valova itd.) brod nagne za neki mali kut, on se mora sam vratiti u prijašnji položaj kad te sile prestanu djelovati. Kad se brod nagne, mijenja se njegov podvodni dio i položaj težišta tog dijela, pa smjer uzgona djeluje na nagnutom brodu iz tačke F umjesto iz F_o , dok težina broda djeluje kao i ranije iz težišta sistema G , ukoliko za vrijeme nagibanja sve težine ostaju na svojim mjestima (sl. 2). Na brod djeluje prema tome par sila veličine $\Delta = \nabla \cdot \gamma$, koje pomnožene s njihovim razmakom $\overline{GH} = h$ daju moment početnog statičkog stabiliteta:

$$M_{st} = \Delta \cdot \overline{GH} = \Delta \cdot \overline{M_o G} \cdot \sin \varphi.$$

On se naziva početnim jer vrijedi samo za male nagibe, dakle u početku nagibanja broda. (Kad se brod nagne jače, smjer uzgona siječe simetralu broda u nekoj tački N , koja za normalne brodske forme obično leži iznad M_o .) Taj moment je pozitivan ako uspravlja brod (pa djeluje u smislu kako je nacrtan na sl. 2). Tačka M_o u kojoj smjer uzgona siječe simetralu broda, a koja se naziva početni metacentar, nalazi se iznad G , a početna metacentarska visina $\overline{M_o G}$ je pozitivna. Ako je metacentarska visina negativna,

tačka M_o leži ispod G , brod se neće vratiti u prijašnji položaj nego će se i dalje nagibati, pa se može prevrnuti.

Sva tri uvjeta plovnosti vrijede za tijelo koje slobodno pluta na vodi i na koje ne djeluju i hidrodinamičke sile uzgona (kao što su deplasmanski brodovi). Da se ispita da li je ispunjen treći uvjet plovnosti, treba odrediti matematički izraz za položaj početnog metacentra M_o . Za male nagibe $\delta\varphi$ vrijedi:

$$\overline{M_o F_o} = \frac{\overline{F F_o}}{\delta\varphi}.$$

Prema poučku o pomaku težišta:

$$\overline{F_o F} : \overline{g_1 g_2} = \nabla_k : \nabla, \text{ tj. } \overline{F_o F} = \frac{\nabla_k \cdot \overline{g_1 g_2}}{\nabla},$$

gdje je ∇_k volumen uronjenog odnosno izronjenog dijela broda (uronjenog ili izronjenog klina) između vodnih linija VL_o i VL , a $\overline{g_1 g_2}$ razmak njihovih težišta. Volumen uronjenog klina mora biti jednak volumenu izronjenog klina, jer se prema prvom uvjetu plovnosti veličina istisnine nakon nagibanja ne smije promijeniti. Moment klinova $\nabla_k \cdot \overline{g_1 g_2}$ dobiva se (sl. 2) iz jednadžbe:

$$\nabla_k \cdot \overline{g_1 g_2} = \nabla_{kl} \cdot \overline{g_1 O} + \nabla_{ku} \cdot \overline{g_2 O},$$

gdje je O ishodište koordinatnog sistema, a $d\nabla_k$ diferencijalni volumen klina. Volumen uronjenog klina jest:

$$\nabla_{ku} = \int_0^L d\nabla_{ku} = \int_0^L \frac{1}{2} y \cdot y \cdot \delta\varphi \cdot dx = \frac{\delta\varphi}{2} \int_0^L y^2 dx,$$

gdje je y ordinata vodne linije, a dx diferencijalni dio njene dužine. Moment uronjenog klina jest:

$$\nabla_{ku} \cdot \overline{g_2 O} = \int_0^L d\nabla_{ku} \cdot \frac{2}{3} y = \frac{\delta\varphi}{3} \int_0^L y^3 dx.$$

Analogno je moment izronjenog klina:

$$\nabla_{ki} \cdot \overline{g_1 O} = \frac{\delta\varphi}{3} \int_0^L y^3 dx.$$

Prema tome je

$$\nabla_k \cdot \overline{g_1 g_2} = \delta\varphi \cdot \frac{2}{3} \int_0^L y^3 dx.$$

Kako $\frac{2}{3} y^3 dx$ predstavlja moment tromosti površine pravokutnika visine y i baze dx s obzirom na osnovku, to je:

$$\frac{2}{3} \int_0^L y^3 dx = I_T,$$

moment tromosti površine plovne linije VL_o s obzirom na njenu simetralnu uzdužnu os, pa je moment klinova $\nabla_k \cdot \overline{g_1 g_2} = I_T \cdot \delta\varphi$. Dakle, pomak težišta istisnine je:

$$\overline{F_o F} = \frac{I_T \cdot \delta\varphi}{\nabla},$$

odnosno početni metacentarski radijus r_o :

$$\overline{M_o F_o} = \frac{I_T}{\nabla}.$$

Visina početnog metacentra iznad kobilice broda (osnovke), tj. udaljenost $\overline{KM_o}$, određuje se za poznati položaj težišta istisnine po visini $\overline{KF_o}$ iz jednadžbe:

$$\overline{KM_o} = \overline{KF_o} + \overline{M_o F_o} = \overline{KF_o} + \frac{I_T}{\nabla}.$$

Ako je poznat i položaj težišta broda po visini \overline{KG} , mogu se odrediti početna metacentarska visina i treći uvjet plovnosti iz jednadžbe:

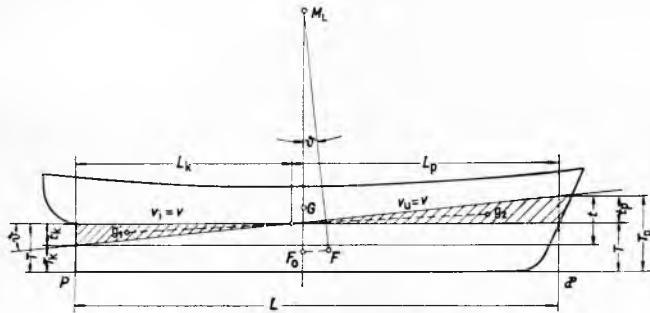
$$\overline{M_o G} = \overline{KM_o} - \overline{KG}.$$

Analogni odnosi vrijede i za nagib broda ϑ u uzdužnom smjeru.

Prema sl. 3 uzdužna metacentarska visina je $M_L G$. Uzdužni metacentarski radijus $\overline{M_L F_0}$ odredi se pomoću momenta tromosti I_L površine plovne linije za poprečnu os kroz njeno težište, prema formuli:

$$\overline{M_L F_0} = \frac{I_L}{V}$$

Kod uzdužnih nagiba nije toliko važan uzdužni stabilitet broda, jer je redovito dovoljan, koliko je važna promjena gaza na pramcu i krmi. Razlika gazova broda na krmi i pramcu, nastala uslijed uzdužnog nagiba broda, naziva se *trim* broda, a moment koji izaziva taj trim ili uzdužni nagib broda zove se *moment trima*.



Sl. 3. Nagibanje broda u uzdužnom smjeru. Trim.

Ako je gaz na pramcu veći, brod je *pretežan*, a ako je na krmi veći, brod je *zatežan*. Za moment trima M_t može se postaviti da je jednak momentu klinova (sl. 3):

$$M_t = \nabla_k \cdot g_1 g_2 = \nabla \cdot F_0 F = I_L \cdot \delta\theta$$

Kako je $\delta\theta = \frac{t_p + t_k}{L}$, to je $M_t = \frac{I_L}{L} (t_p + t_k)$.

Moment koji prouzrokuje ukupni trim $t = t_p + t_k = 1$ m, zove se *»jedinični moment«* trima $M_1 = I_L/L$. Ukupni trim određuje se kao kvocijent između brojčanih vrijednosti momenta M_t i »jediničnog momenta« M_1 :

$$t = \frac{M_t}{M_1}$$

Trim na pramcu i krmi određuje se iz formule:

$$t_p = t \frac{L_p}{L}, \quad t_k = t \frac{L_k}{L}$$

gdje su L_p i L_k udaljenosti težišta plovne linije od pramčanog i krmenog perpendikulara. Gazovi na pramcu i krmi iznose:

$$T_p = T \pm t_p, \quad T_k = T \mp t_k$$

gdje gornji predznak vrijedi za pretežan, a donji za zatežan brod.

Proračun plovnosti broda sastoji se u određivanju istisnine broda, položaja njezina težišta, položaja početnih metacentara M_0 i M_L (što se svodi na računanje momenta tromosti površine plovne linije I_T i I_L) i položaja težišta sistema G .

Određivanje položaja težišta sistema. Težište sistema se normalno nalazi na uzdužnoj simetralnoj ravnini broda, što znači da je položaj težišta određen sa svega dvije koordinate: po dužini i po visini broda. Pri projektiranju se te koordinate određuju metodom poznatom iz mehanike: izračunaju se momenti svih pojedinačnih težišta za dvije međusobno okomite osi, pa kvocijenti momenata i ukupne težine broda daju udaljenosti težišta od dotičnih osi. To je tzv. *proračun centracije*. Kao vertikalna os z obično se odabire krmeni perpendikular ili simetrala glavnog rebra, a kao horizontalna os x osnovka broda.

Cjelokupna težina broda dijeli se u pojedinačne grupe, od kojih se svaka dalje dijeli na niz podgrupa. Glavne grupe težina trgovačkog broda jesu: trup broda, oprema broda (brodski uređaji i pomoćni strojevi izvan strojarnice), pogonski uređaj (pogonski strojevi, kotlovi, osovinski vodovi, propeleri i pomoćni strojevi i uređaji unutar strojarnice), gorivo, mazivo i voda potrebni za pogonski uređaj, posada s efektivima (prtljaga, namirnice itd.

posade), teret, putnici, prtljaga i namirnice za putnike, balast (ako je potreban). Prve tri grupe čine vlastitu težinu broda, a ostale grupe ukupnu *nosivost* broda (*deadweight*). Grupe težine ratnih brodova jesu: trup broda, oklop, oprema trupa (samo oprema potrebna za plovidbu), pogonski uređaj, gorivo, mazivo i pojna voda, artiljerijsko naoružanje, torpedno naoružanje, ostali vidovi naoružanja (mine, podvodne bomb., avioni itd.), posada s efektivima, rezerva. Suma svih tih težina je tzv. *konstrukcijska istisnina*. Primjer proračuna centracije dan je u tablici 1.

Tablica 1

PRORAČUN CENTRACIJE

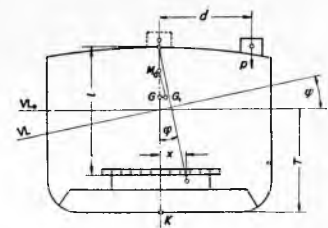
Stanje opterećenja: brod potpuno opremljen i natovaren

Broj	Grupa	Težina Mp	Udaljenost od osnove m	Uzdužni moment Mpm	Udaljenost od osnovke m	Vertikalni moment Mpm
1	Trup i oprema	844	-0,50	-422,0	5,00	420,0
2	Pogonski uređaj	417	-0,60	-250,0	5,85	2439,5
3	Gorivo i mazivo	90	+5,71	+514,0	3,24	292,0
4	Posada	13	-0,69	-9,0	9,75	126,8
5	Putnici	8	-0,20	-1,6	9,00	72,0
6	Teret	1408	+1,21	+1 700	4,35	6130,0

$$\Delta = \Sigma P = 2780 \text{ t} \quad \Sigma M_z = -682,6 + 2214,0 + 1531,4 \quad \Sigma M_x = 13 280,3$$

$$x_G = \frac{\Sigma M_z}{\Delta} = \frac{1531,4}{2780} = +0,5508 \text{ m} \quad z_G = \frac{\Sigma M_x}{\Delta} = \frac{13280,3}{2780} = 4,7770 \text{ m}$$

Kad je brod izgrađen, položaj se težišta istisnine po visini može odrediti eksperimentalno, pokusom nagiba ili pokusom ljuljanja broda. Položaj po dužini određuje se iz drugog uvjeta plovnosti, tj. uvjeta da se težište sistema i težište istisnine moraju nalaziti na istoj okomici na plovnu liniju. Dakle, ako je iz hidrostatičkih proračuna poznat položaj težišta istisnine po dužini, određen je ujedno i položaj težišta sistema po dužini. Položaj težišta sistema po visini određuje se pomoću pokusa nagiba tako da se poznate težine (obično željezni blokovi) premještaju iz simetrale broda na jedan od bokova broda i onda mjeri kut nagiba broda. Iz sl. 4 proizlazi:



Sl. 4. Pokus nagiba

$$\text{tg } \varphi = \frac{x}{l} = \frac{\overline{GG_1}}{M_0 G}$$

a kako je:

$$\overline{GG_1} : d = p : \Delta, \text{ ili } \overline{GG_1} = \frac{p d}{\Delta}$$

dobiva se:

$$\text{tg } \varphi = \frac{p d}{\Delta \cdot M_0 G}$$

pa je početna metacentarska visina:

$$\overline{M_0 G} = \frac{p d}{\text{tg } \varphi} = \frac{p d l}{\Delta \cdot x}$$

U ovoj formuli znači p ukupnu težinu tereta za nakretanje, d pomak tereta iz simetrale broda, Δ deplasman broda, l dužinu njihala pomoću kojeg se očitavaju kutovi nagiba, x očitavanje na mjernoj letvi. Položaj težišta sistema po visini odredi se iz jednadžbe:

$$\overline{KG} = \overline{K M_0} - \overline{M_0 G}$$

Udaljenost $\overline{K M_0}$ početnog metacentra od osnovke poznata je iz hidrostatičkog proračuna. Da bi rezultati bili dovoljno tačni, pokus nagiba treba izvoditi s najvećom pažnjom. Kutovi nagiba moraju biti mali (za brodove oštih formi do 1,5°, za brodove punijih formi najviše 3°), jer samo tada smjer uzgona nagnutog

broda prolazi kroz početni metacentar M_0 . Da se izbjegnu nepoznati utjecaji vjetrova, valova, strujanja vode i priveza na nagib broda, treba brod postaviti u zavjetrinu, a broj konopa za privez ograničiti na minimum. Sve pomične težine na brodu moraju biti poznate i popisane, po veličini i po položaju. Da se izbjegne utjecaj slobodnih površina, sve tankove treba prije pokusa nagiba isprazniti. Radi što veće tačnosti očitavanja kutova nagiba treba upotrijebiti više njihala (obično tri), i to veće dužine. Umjesto njihala mogu se upotrijebiti i drugi instrumenti za mjerenje nagiba (klinometri, sekstant ili spojene posude). Treba nastojati da trim i nagib broda prije samog pokusa budu što manji.

Položaj težišta sistema po visini može se odrediti i mjerenjem periode ljuľanja broda. Brod se zaniľe ili ritmićkim pretrćavanjem posade s jednog boka na drugi ili tako da se pomoću brodske dizalice podigne jedna veća težina iz vode (npr. plutaća), koja se naglo ispusti kad je brod dobio stanoviti nagib. Vrijeme potrebno da se brod vrati u položaj maksimalnog nagiba na isti bok zove se perioda ljuľanja i praktićki ne ovisi o veličini kuta nagiba. Zbog toga se može izmjeriti nekoliko perioda i uzeti srednja vrijednost. Početna metacentarska visina M_0G može se onda izračunati iz formule:

$$T_\varphi = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\Delta \cdot M_0G}},$$

u kojoj je T perioda jednog potpunog njihanja, a I moment tromosti mase broda i okolne vode, definiran kao:

$$I = m i^2 = \frac{\Delta}{g} i^2,$$

ako je m masa broda i okolne vode, a i radijus tromosti ($i = c \cdot B$, gdje je c koeficijent koji se određuje na osnovu pokusa za pojedine tipove brodova, a B širina broda). Skupivši sve konstantne vrijednosti u jedan koeficijent:

$$f = \frac{2\pi c}{\sqrt{g}},$$

dobiva se nakon jednostavne operacije

$$\overline{M_0G} = \left(\frac{fB}{T_\varphi}\right)^2.$$

Odredivši položaj početnog metacentra M_0 iz dijagramskog lista i vrijednost koeficijenta f iz tablice 2, pomoću gornje formule može se izračunati položaj težišta sistema G po visini.

Tablica 2

VRIJEDNOST KOEFICIJENTA f ZA FORMULU $\overline{M_0G} = \left(\frac{fB}{T_\varphi}\right)^2$

Veliki teretni i putnićki brodovi	0,85
Mali putnićki brodovi	0,77
Teretni brodovi natovareni	0,78
Brodovi za prevoz rude u balastu	0,81
Teglenice	0,76
Barkaće	0,79

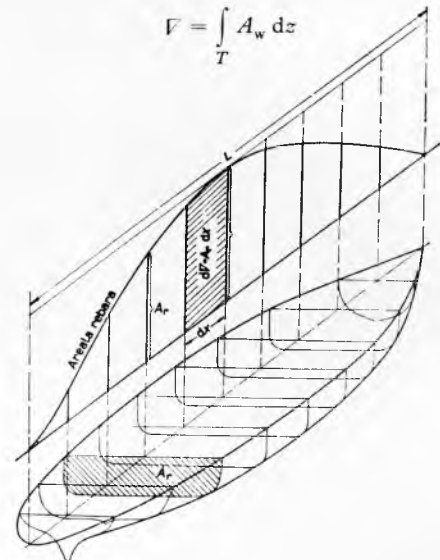
Koeficijent f mijenja se s gazom i s opterećenjem broda, pa ga je vrlo teško taćno ocijeniti. Zato ova metoda slući samo za priblićno određivanje položaja težišta sistema po visini i za usporedbu s drugim metodama.

Određivanje istisnine i njenog težišta. Za proraćun istisnine broda i njenog težišta sluće isti presjeci kao i za predoćivanje brodske forme. Dva neizmjereno bliza poprećna presjeka sijeku iz podvodnog volumena brodske forme diferencijalni volumen $dV = A_r dx$, gdje je A_r površina rebara, a dx diferencijalni razmak izmeću ta dva presjeka (sl. 5). Ukupni volumen, istisnina broda, dobiva se integracijom po dućini broda

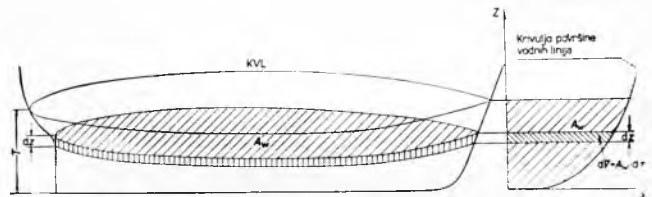
$$V = \int_L dV = \int_L A_r dx.$$

Integracija se obavlja grafićki: površine pojedinih rebara nanesu se u pravokutni koordinatni sistem u ovisnosti o dućini i odredi se površina ispod tako dobijene krivulje rebara (*areale rebara*). Umjesto poprećnih presjeka i integracije po dućini broda mogu

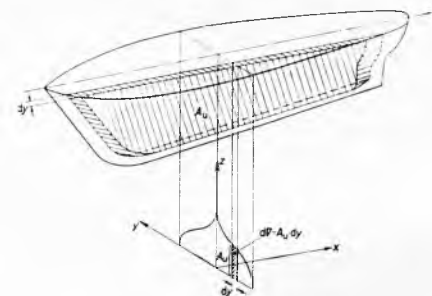
za određivanje istisnine poslućiti i horizontalni presjeci (*površine vodnih linija*) i integracija po visini broda (sl. 6):



Sl. 5. Određivanje istisnine pomoću površine rebara. Skala areale rebara.



Sl. 6. Određivanje istisnine pomoću površina vodnih linija



Sl. 7. Određivanje istisnine pomoću površina uzdućnica

ili vertikalni presjeci (*površine uzdućnica*) i integracija po širini broda (sl. 7):

$$V = \int_B A_u dy.$$

Momenti istisnine potrebni za određivanje njenog težišta dobivaju se integracijom momenata diferencijalne istisnine. Za poprećne presjeka je:

$$dM_x = dV \cdot z_r, \text{ odnosno } dM_x = dV \cdot x_r,$$

gdje su dM_x i dM_z momenti diferencijalnog volumena dV za osnovku, odnosno za glavno rebro, a z_r i x_r udaljenosti težišta tog volumena (koje se poklapa s težištem rebara, zbog diferencijalne debljine sloja dx) od koordinatnih osi. Iz jednadćbi:

$$dM_x = A_r z_r dx = M_{rx} dx \text{ i } dM_z = A_r x_r dx = M_{rz} dx$$

dobivaju se momenti istisnine broda integracijom momenata površina rebara (M_{rx} i M_{rz}) po dućini broda:

$$M_x = \int_L M_{rx} dx \text{ i } M_z = \int_L M_{rz} dx.$$

Ti integrali mogu se izračunati određivanjem površine ispod krivulje momenata rebara, nanesenih u ovisnosti o dužini broda. Koordinate težišta istisnine računaju se iz formula:

$$z_{F_0} = \frac{M_x}{V} = \frac{\int_L M_{rx} dx}{\int_L A_r dx}, \quad x_{F_0} = \frac{M_z}{V} = \frac{\int_L M_{rz} dx}{\int_L A_r dx}$$

U slučaju horizontalnih presjeka proizlazi analogno:

$$M_x = \int_T M_{V_Lx} dz \quad i \quad M_z = \int_T M_{V_Lz} dz,$$

gdje su M_{V_L} momenti površina vodnih linija za odnosne osi. Za vertikalne presjeka je:

$$M_x = \int_B M_{uz} dy \quad i \quad M_z = \int_B M_{ux} dy,$$

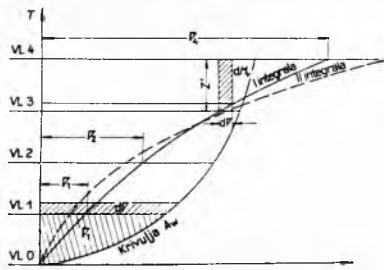
gdje su M_u momenti površine uzdužnica za koordinatne osi. Prema tome računanje istisnine i položaja njenog težišta svodi se na računanje površina karakterističnih presjeka broskog trupa i njihovih težišta. Za uspravan brod i položaj težišta istisnine u uzdužnoj simetralnoj ravnini broda, ako se računaju vertikalni momenti pomoću vodnih linija a horizontalni pomoću rebara, nije potrebno odrediti težišta površina. Vertikalni momenti su dati jednadžbom:

$$M_v = M_x = \int T A_w z dz,$$

gdje je z udaljenost dotične vodne linije od osnovke (osi x), a horizontalni momenti sa:

$$M_h = M_z = \int L A_r x dx,$$

gdje je x udaljenost dotičnog rebra od krmenog perpendikulara ili glavnog rebra (osi Z). Integrali u gornjim formulama mogu se egzaktno riješiti samo ako je poznat analitički izraz funkcije pod integralnim znakom (matematičke forme). Kako to obično nije slučaj, ti integrali se rješavaju približnim metodama, koje se svode na određivanje površine ispod neke grafički zadane krivulje. Ta površina se određuje ili numeričkom ili mehaničkom integracijom.



Sl. 8. Krivulja površina vodnih linija i njena prva i druga integrala

U brodogradnji je uobičajeno površine ispod neke krivulje do njenih pojedinih ordinata predočiti u vidu krivulje, koja se naziva *prva integrala*. Površine ispod prve integrale do pojedinih njenih ordinata (koje daju *drugu integralu*) jednake su statičkim momentima površina ispod izvorne krivulje. Npr. na sl. 8 konstruirana je krivulja površina vodnih linija kao funkcija gaza, pa površina između te krivulje, osi T i pojedinih vodnih linija daje istisninu broda do dotične vodne linije prema formuli:

$$V = \int_0^T dV = \int_0^T A_w dz.$$

Ako se na taj način odrede istisnine do pojedinih vodnih linija, nanesu na dotičnu vodnu liniju u nekom određenom mjerilu i dobivene tačke spoje, dobiva se prva integrala, iz koje se može očitati istisnina broda za bilo koji gaz T . Površina između prve

integrale, osi T i neke vodne linije daje statički moment istisnine broda za tu vodnu liniju, prema formuli:

$$M_v = \int_0^T z' dV.$$

Ako se ti statički momenti nanesu na odgovarajuće vodne linije, dobiva se druga integrala, pomoću koje se može za bilo koju vodnu liniju odrediti i statički moment istisnine te vodne linije, dakle i položaj težišta istisnine po visini. Na analogan način određuje se iz površine ispod prve integrale areale rebara horizontalni moment istisnine M_h i položaj težišta istisnine po dužini.

Svi navedeni hidrostatički proračuni broda provode se metodama numeričke integracije (trapeznim pravilom, Simpsonovim pravilom, Čebiševljevim pravilom) ili mehaničkim integriranjem pomoću planimetra ili integratora (v. članak *Numeričke, grafičke i instrumentalne metode računanja*).

Dijagramski list. Rezultati hidrostatičkih proračuna broda, tj. proračuni istisnine i položaja njenog težišta, površinâ rebara i njihovih momenata s obzirom na osnovku, površinâ, položajâ težišta i momenata tromosti vodnih linija, te položaja poprečnih i uzdužnih metacentara, prikazuju se grafički kao funkcije gaza broda u *dijagramskom listu* (sl. 9). U dijagramski list se površine rebara i njihovi momenti nanose od odgovarajućih rebara. Te krivulje, koje se nazivaju zajedničkim imenom *Bonjeanove krivulje*, omogućuju određivanje istisnine i položaja njenog težišta za bilo koju pravu, kosu ili valovitu liniju. Od krmenog perpendikulara P nanose se: istisnina broda na rebrima, istisnina broda s privjescima (oplatom, kormilom, ljuljnom koblicom, skrokovima propelera itd.), istisnina u morskoj vodi $\Delta = V \cdot \gamma$, položaj težišta istisnine po visini, površine vodnih linija i njihovi uzdužni i poprečni momenti tromosti I_L i I_T , uzdužni metacentarski radijus $M_1 F_0$, jedinični moment pretege $M_1 = I_L/L$, i tone po centimetru zagažaja $A_w \cdot \gamma$. Od glavnog rebra \otimes se nanose: položaj težišta istisnine po dužini i položaj težišta vodnih linija po dužini. Poprečni metacentarski radijus $\overline{M_0 F_0}$ nanosi se od krivulje težišta istisnine po visini, i to u istom mjerilu. U dijagramski list se unose i krivulje koeficijenta vodne linije α , koeficijenta glavnog rebra β , koeficijenta istisnine δ , uzdužnog prizmatičkog koeficijenta φ i vertikalnog prizmatičkog koeficijenta φ_v .

Osim za teorijske proračune, dijagramski list služi u praksi i za određivanje trima broda i njegovog početnog stabilneta pri premještanju ili ukrcavanju tereta. U tu svrhu treba prije premještanja tereta očitati gazove na pramcu i krmu, i ako razlika tih gazova nije prevelika, računa se sa srednjim gazom. Za srednji gaz određuje se iz dijagramskog lista veličina jediničnog momenta pretege M_1 , težište plovne linije i udaljenosti težišta plovne linije L_p i L_k od pramčanog i krmenog perpendikulara. Moment trima jednak je umnošku tereta p i njegova horizontalnog pomaka d : $M_t = p \cdot d$. Ukupni trim dobiva se pomoću formule: $t = M_t/M_1$, trim na pramcu: $t_p = t \cdot L_p/L$, trim na krmu: $t_k = t \cdot L_k/L$, a novi gazovi na pramcu: $T_{p1} = T_p \pm t_p$ i na krmu: $T_{k1} = T_k \mp t_k$. Za slučaj ukrcanja tereta zamišlja se da je teret najprije ukrcan iznad ili ispod težišta plovne linije. Time se po čitavoj dužini broda gaz jednako poveća (paralelni zagažaj), jer se hvatište dodatnog uzgona (težište paralelnog sloja) i dodatne težine (težište ukrcanog tereta) poklapaju, pa na brod ne djeluje nikakav prekretni moment. Iznos tog paralelnog povećanja gaza broda ΔT odredi se pomoću krivulje težine po centimetru zagažaja. Zatim se za teret pomaknut na odgovarajuće mjesto izračuna trim kao što je kasnije objašnjeno kod pomaka tereta. Gazovi nakon ukrcanja tereta jesu:

na pramcu: $T_{p1} = T_p + \Delta T \pm t_p$, na krmu: $T_{k1} = T_k + \Delta T \mp t_k$.

Za iskrcaj tereta postupa se analogno pomoću paralelnog izrona $-\Delta T$.

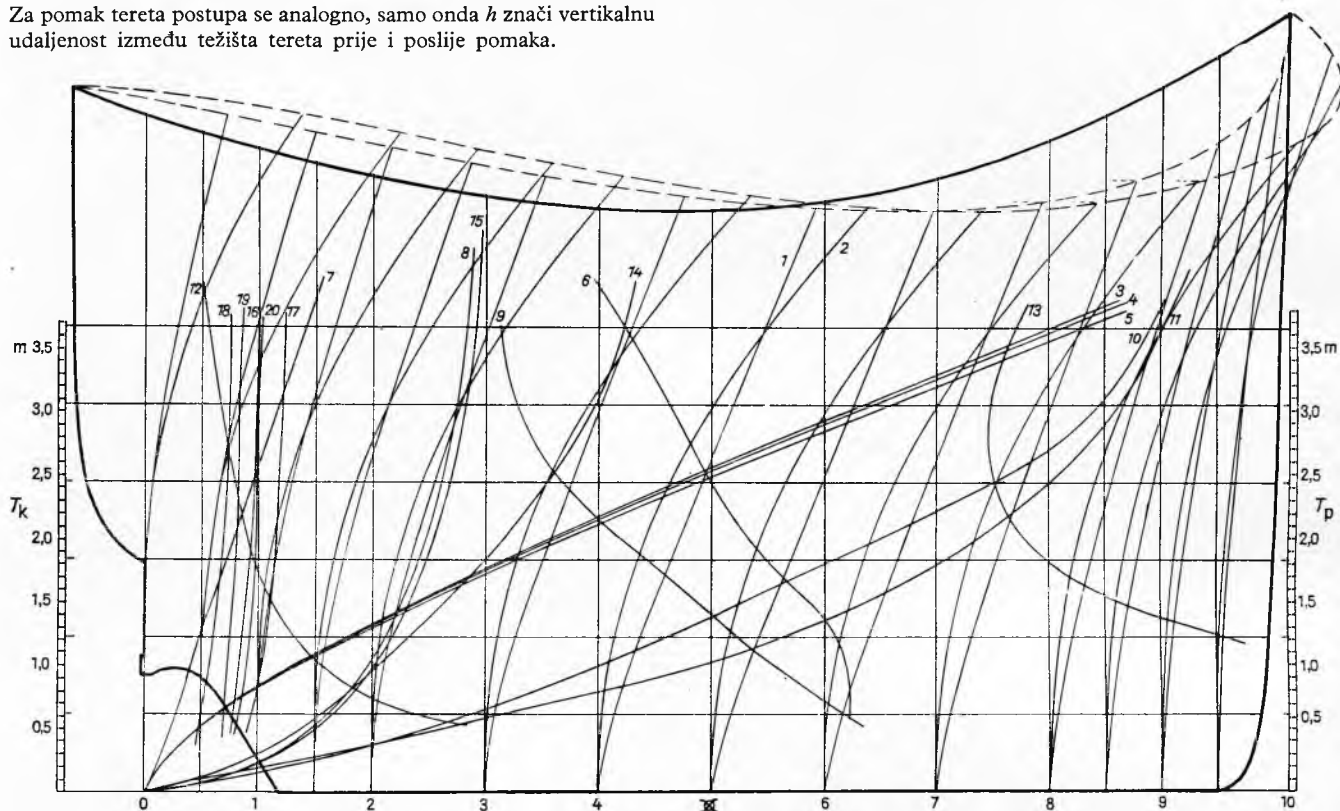
Početna metacentarska visina određuje se tako da se najprije izračuna pomak težišta $\overline{GG_1} = p \cdot h/(\Delta + p)$, gdje je p težina ukrcanog tereta (ako se teret iskrcava onda je p negativan), h udaljenost njegovog težišta od težišta sistema prije ukrcanja (iskrcanja) tereta, Δ prvotna istisnina broda. Zatim se odredi iz dijagramskog lista udaljenost početnog metacentra od osnovke $\overline{KM_0}$ za gaz

nakon ukrcaja (iskrcaja) tereta, pa se nova početna metacentarska visina dobiva prema formuli:

$$\overline{M_0 G_1} = \overline{K M_0} - (\overline{K G} + \overline{G G_1}).$$

Za pomak tereta postupa se analogno, samo onda h znači vertikalnu udaljenost između težišta tereta prije i poslije pomaka.

praktičnu upotrebu najzgodniji je Petersenov dijagram (sl. 10). Na apscisu os toga dijagrama nanese su uzdužni momenti težine broda (tj. umnožak težine broda Δ i udaljenosti težišta sistema



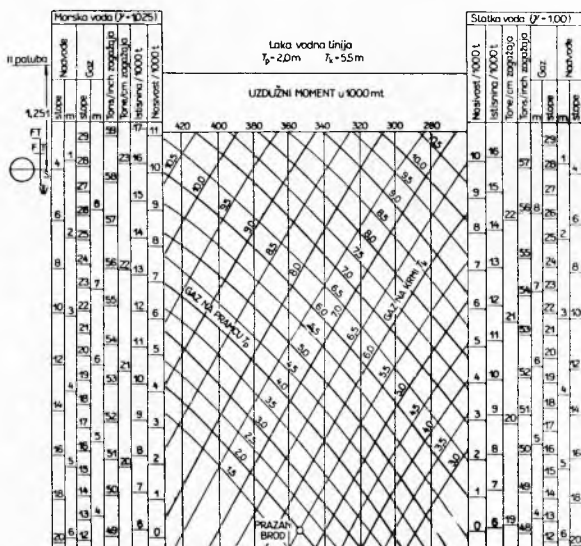
Sl. 9. Dijagramski list. Nanesene su krivulje: 1 površine rebara, 2 momenti površina rebara, 3 istisnina broda na rebrima (od rebra 0), 4 istisnina broda s privjescima (kormilo, ljuljina kobilica, oplata; od r. 0), 5 istisnina u morskoj vodi, 6 apscisa težišta istisnine (od glavnog rebra), 7 aplikata težišta istisnine (od r. 0), 8 površine vodnih linija (od r. 0), 9 apscise težišta vodnih linija (od glavnog rebra), 10 uzdužni moment tromosti vodne linije (od r. 0), 11 poprečni moment tromosti vodnih linija, 12 uzdužni metacentarski radijus, 13 poprečni metacentarski radijus (od krivulje aplikata težišta istisnine u istom mjerilu), 14 jedinični moment pretege (od r. 0), 15 tone po centimetru zagažaja (od r. 0), 16 koeficijent vodne linije α , 17 koeficijent glavnog rebra β , 18 koeficijent istisnine δ , 19 uzdužni prizmatički koeficijent φ , 20 vertikalni prizmatički koeficijent φ_v .

Za veće promjene trima, kao npr. brodova sa strojarnicom na krmi, dijagramski list, u kojemu se računa sa srednjim gazom, ne daje više tačne podatke. Zbog toga se za takve brodove konstruiraju dijagrami trima iz kojih se u ovisnosti od gaza na pramcu i krmi broda može odrediti istisnina i položaj njenog težišta, kao i položaj početnog metacentra. Ima više tipova takvih dijagrama, a za

G od glavnog rebra), a na ordinatnu os njegova istisnina, odnosno nosivost za različite vrijednosti gazova na pramcu i krmi broda (ukrižane linije u dijagramu). Prije ukrcaja tereta kapetan očita gazove na pramcu i krmi broda pa unese u sjecištu odgovarajućih linija jednu tačku u dijagram. Ona određuje nosivost i uzdužni moment prije ukrcaja (iskrcaja) tereta. Nosivost nakon ukrcaja tereta dobiva se tako da se zbroje ukrcani teret i nosivost prije ukrcaja tereta, a uzdužni moment tako da se umnožak težine tereta i njegove udaljenosti od glavnog rebra pribroji uzdužnom momentu prije ukrcaja tereta ako se težište tog tereta nalazi iza glavnog rebra, odnosno odbije od uzdužnog momenta ako je teret ispred glavnog rebra. S tako dobivenim vrijednostima za nosivost (istisninu) i uzdužni moment nalazi se nova tačka u dijagramu, pomoću koje se određuju novi gazovi na pramcu i krmi. Nedostatak je tog dijagrama da ne daje ujedno i položaje početnog metacentra, kao drugi dijagrami trima (npr. dijagram Russo).

STABILITET BRODA

Stabilitet je sposobnost broda da se odupire nagibanju izazvanom djelovanjem vanjskih sila ili pomakom masa na brodu, kao i sposobnost da se vrati u raniji položaj ravnoteže nakon što uzroci poremećenja prestanu djelovati. S obzirom na smier nagibanja razlikuje se *poprečni stabilitet* broda i *uzdužni stabilitet* broda. Stabilitet ovisi o formi trupa broda i rasporedu masa na brodu, pa se može podijeliti na *stabilitet forme* i *stabilitet težina*. *Statički stabilitet* je otpor broda protiv djelovanja prekretnih momenata koji nagibaju brod. *Dinamički stabilitet* je rad koji treba da vrše vanjske sile da bi izvele brod iz položaja uspravne ravnoteže. Da bi se mogao odrediti stabilitet nekog broda, treba poznavati prirodu i veličinu vanjskih sila koje na njega djeluju i unutarnje sile sistema koje im se odupiru. Brod mora uvijek ploviti u položaju



Sl. 10. Petersenov dijagram trima. (Lijevo oznaka najmanjeg nadvoda prema međunarodnim propisima: F slatka voda, T tropi, S ljeto, W zima)