

stabilnost

Atari Majdi

مستقیم

کیری

Ivo Buljan

MUHAJANAN

STABILNOST BRODA

Udžbenik za usmjereno obrazovanje
u pomorskom prometu

PRIRUČNIK ZA POMORCE



ŠKOLSKA KNJIGA
ZAGREB 1982

Urednik
ELIZABETA CURL

Recenzenti
RUDOLF BERNARDIĆ
PAVLE KOMADINA
ŽITOMIR LOZICA

Lektor
VINKO TOPIĆ

Odobrio Republički komitet za prosvjetu, kulturu, fizičku i tehničku kulturu SR
Hrvatske rješenjem broj 9997/1-1978. od 6. II 1979.

Izvjestitelj u ime Zavoda za prosvjetno-pedagošku službu — *m^r Elizabeta Curl.*

Tisak: GRO »M. Gembarovski«, Nova Gradiška

PREDGOVOR

Knjiga STABILNOST BRODA pisana je ponajprije kao udžbenik za usmjereno obrazovanje u pomorskom prometu pa je stoga usklađena s nastavnim planom i programom završne faze usmjerenog obrazovanja 4. stupnja kvalifikacijske ljestvice za potrebe pomorske privrede (zvanje: nautičar-kadet).

Sadržaj je proširen s nekoliko tema iz područja stabilnosti broda, na primjer temom o stabilnosti pri nasukanju i dokovanju broda, o stabilnosti pri prijevozu žitarica i o pregrađivanju trgovačkih brodova. Time je stabilnost broda obuhvaćena više-manje u cjelini.

Polazeći od stajališta da stabilnost ima izuzetnu važnost za školovana pomorca kojim se povjerava upravljanje brodom — čime mu se povjeravaju i životi posade i putnika, zatim sam brod i sva dobra koja on prevozi — udžbenik sadrži niz praktičnih primjera provjere stabilnosti u eksploataciji broda. Posebno valja istaknuti da je u udžbeniku temeljito obrađeno i potkrijepljeno praktičnim primjerima provjeravanje i izračunavanje uvjeta stabilnosti u pomorskom prijevozu žitarica, što je sve usklađeno s najnovijim odredbama Konvencije za zaštitu ljudskog života na moru iz 1974. godine.

Pripremajući udžbenik, uskladio sam rukopis s prijedlozima i zahtjevima recenzentata. Stoga najtoplije zahvaljujem recenzentu prof. Rudolfu Bernardiću koji je udžbenik pregledao s pedagoškog stajališta, a posebno stručnim recenzentima dipl. inž. Žitomiru Lozici i kapetanu duge plovidbe Pavlu Komadini na vrlo korisnim prijedlozima i sugestijama.

U Splitu, 12. listopada 1979.

Ivo Buljan

1. POJAM STABILNOSTI

G 20
h'

1.1. Definicija stabilnosti i uvjeti plovnosti. Stabilnost je svojstvo broda da se protivi silama koje ga nastoje nagnuti i svojstvo da se ponovo automatski vraća u ravan položaj kada prestanu djelovati te sile. Brod koji nema takvo svojstvo ne može uopće ploviti, a brod koji ga nema u dovoljnoj mjeri nije siguran u plovidbi.

Svako tijelo koje pliva na vodi, pa prema tome i brod, izloženo je djelovanju dviju sila: sile teže i uzgona.

Svako je tijelo sastavljeno od pojedinih materijalnih točaka ili čestica mase kojih zbroj daje masu cijelog tijela. Težine pojedinih materijalnih točaka paralelne su sile koje djeluju prema središtu Zemlje. Rezultanta svih tih sila je težina tijela, a hvatište te rezultante jest težište tijela.

Sve ovo vrijedi i za brod, pa se hvatište rezultante svih težina broda zove težište broskog sustava, a označuje se šlovom G (engl. *center of gravity*). Položaj težišta sustava uvjetovan je, prema tome, rasporedom težine broda, uključujući i teret. Položaj težišta sustava broda određen je dvjema koordinatama: njegovom udaljenošću od krmene okomice (engl. *Aft Perpendicular*, stoga kratica A.P.) i visinom iznad osnovke (engl. *base*), tj. unutrašnjeg lica kobilice broda.

Tlak vode u nekoj točki, uronjenoj u vodu, djeluje u svim smjerovima, a veličina mu ovisi o dubini vode, što je poznato iz hidrostatskog zakona o raspodjeli tlakova, prema kojem je tlak u nekoj uronjenoj točki $p = \gamma \cdot h$, a sila tlaka $P = p \cdot A$ (A — površina na koju djeluje hidrostatski tlak). Na brod koji pliva, također djeluje hidrostatski tlak. Sile hidrostatskog tlaka (tlak pomnožen površinom na koju djeluje) s obzirom na oblikovne značajke trupa broda (zakrivljenost u tri koordinatna smjera) mogu se rastaviti u tri komponente, od kojih su dvije horizontalne (jedna u smjeru duljine broda, druga u poprečnom smjeru broda) i jedna vertikalna. Rezultanta horizontalnih komponenata sila tlaka jednaka je ničici, a rezultanta vertikalnih komponenata sila tlaka ima konačnu vrijednost i zovemo je uzgonom pa djeluje vertikalno prema gore, što odgovara i Arhimedovu zakonu, koji govori da na svako tijelo uronjeno u tekućinu djeluje sila uzgona koja je jednaka težini tim tijelom istisnute tekućine. Iz te definicije proizlazi da uzgon djeluje u težištu istisnute tekućine, odnosno u težištu volumena podvodnog dijela broda, kad se radi o brodu, a time i njegov položaj ovisi o obliku podvodnog dijela broda. Prema tome, da bi brod mogao plivati, treba da uzgon (U) koji djeluje na brod u težištu istisnute tekućine (F), dakle u težištu podvodnog volumena broda, i to vertikalno prema gore, bude jednak ukupnoj težini broda (W). Napomenimo da se ovdje oznaka težine broda W uzima kao sila čija je mjerna jedinica njutn (N) odnosno kilonjutn (kN).

Ovdje upotrebljavamo mjerne jedinice za silu njutn (kilonjutn) kako bi se razlikovale od mjerne jedinice mase tereta (p) i deplasmana broda (D) koja se izražava u tonama (t).

U brodogradnji, a vrlo često i u praksi pomoraca (npr. kontrola stabilnosti broda) brojna računanja povezana su s momentima, tj. množenjem neke težinske sile s nekom udaljenošću (npr. poluge), sa svrhom da se odredi položaj težišta. Sama definicija težišta kao hvatišta ukupne gravitacijske sile zahtijevala bi da ova sila bude izražena u njutnima (N). Međutim, izraz »težište« možemo zamisliti i kao težište mase, u kojem slučaju izračunavamo momente mase kao umnožak mase i duljine ($t\ m$).

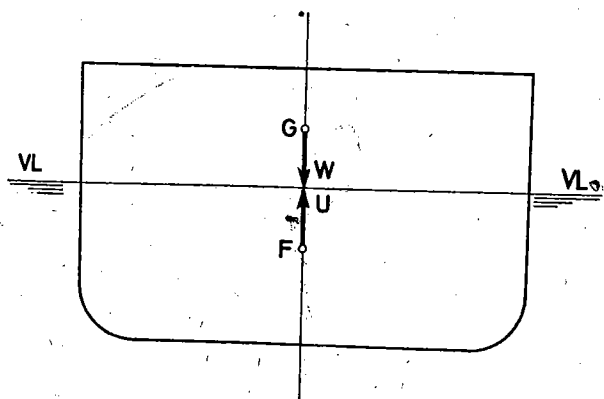
Na temelju toga možemo izvesti opći zaključak da će se, gdje god je to moguće, tereti i deplasman izraziti u tonama, a tamo gdje je nužna upotreba sila, koristit će se mjerna jedinica njutn.

Hvatište sile uzgona zovemo težište uzgona ili težište istisnine i ono se nalazi točno u geometrijskom središtu podvodnog dijela broda, što ujedno znači da položaj toga težišta ovisi o obliku podvodnog dijela broda. Označujemo ga obično slovom F .

Prvi uvjet plovnosti broda jest da mu sila težine i sila uzgona budu jednake:

$$U = W$$

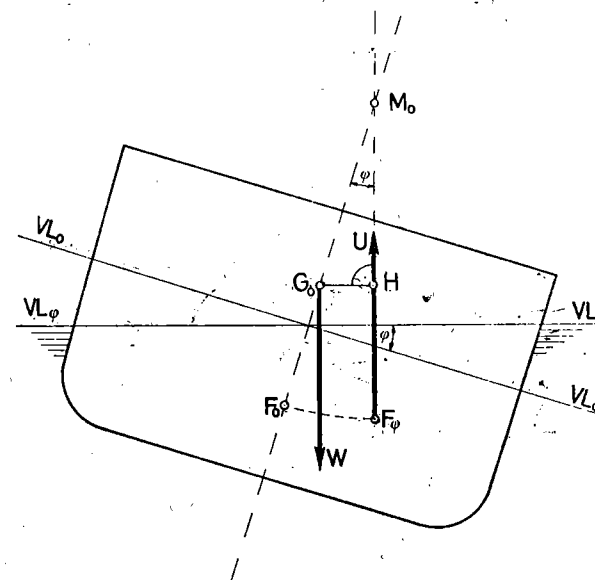
Postoje još dva uvjeta plovnosti koje treba ispuniti. Jedan zahtijeva da brod bude u ravnoteži. Da bi taj uvjet bio ispunjen, moraju sile uzgona i težine na brodu što ravno pluta ležati na zajedničkom pravcu koji je okomit na trenutnu vodenu liniju VL , što čini, dakle, drugi uvjet plovnosti (sl. 1.1). Treći uvjet plovnosti traži da brod koji pluta mora imati stabilnu ravnotežu.



Sl. 1.1. Sila teža i sila uzgona u broda u ravnom položaju

Napomenimo da je u običnih trgovačkih i ratnih brodova težište sustava uvijek iznad težišta istisnine. Izuzetak čine jedino jedrilice s balastnom kobilicom i zaronjene podmornice.

Kad se brod iz ravnog položaja nagne na jedan bok, prvi uvjet plovnosti vrijedi i dalje, bez obzira na to što se brod nagnuo, tj. i dalje ostaje $U = W$. Međutim, čim se premjesti težište uzgona u F_φ (sl. 1.2), sila težine broda W i sila uzgona U sastoje se u uspravljujući par sila. Javlja se, dakle, uspravljujući moment (engl. *righting moment*) koji nastoji vratiti brod u prvobitni ravnotežni položaj.



Sl. 1.2. Uspravljujući moment nagnutog broda

1.2. Moment statičke stabilnosti broda. Kad se brod nagne zbog djelovanja nekih vanjskih sila, npr. vjetrova, bez ikakvih promjena na težinama sustava broda, težište uzgona pomakne se na stranu nagiba, jer se pri tome promijeni i oblik volumena podvodnog dijela broda, a težište uzgona je središte geometrijskog oblika podvodnog dijela broda.

Stabilnost je u najtješnjoj vezi s nadvodnim dijelom broda. Naime, pomicanje težišta uzgona F na stranu nagiba broda uvjetovano je novim oblikom zaronjenog dijela broda koji se stvara iz pričuve (rezerve) uzgona, tj. iz nadvodnog dijela broda. Jasno je da od veličine i oblika nadvodnog dijela broda najviše zavisi i moment stabilnosti.

Iz sl. 1.2. vidi se da je moment uspravljanja broda jednak umnošku sile uzgona U i poluge \overline{GH} , odnosno, prema prijašnjem objašnjenju, umnošku deplasmana D i poluge \overline{GH} . Poluga \overline{GH} je međusobna udaljenost usporednih sila

uzgona i težine broda i zove se **poluga stabilnosti** (engl. *arm of stability*). Umnožak $D \cdot \overline{GH}$ zove se **moment statičke stabilnosti broda**, prema tome:

$$M_{st} = D \cdot \overline{GH}$$

Ova je formula zapravo jednadžba stabilnosti u općem obliku.

Točka u kojoj smjer sile uzgona siječe uzdužnu simetralnu ravninu broda zove se **metacentar** i označuje se slovom M (sl. 1.2), dok se udaljenost \overline{MG} naziva **metacentarska visina** (engl. *metacentric height*). Metacentar i metacentarska visina značajne su vrijednosti u teoriji broda, posebno u nauci o stabilnosti broda.

U daljnjem izlaganju oznaka početnog stanja broda prikazuje se tako što se uz oznaku pojedinih točaka doda indeks »0«. Tako se početni položaji težišta istisnine F težišta sustava G , metacentra M itd. označuju kao F_0 , G_0 , M_0 , a isto tako i M_{st0} (početni moment statičke stabilnosti), zatim VL_0 itd.

1.3. Podjela stabilnosti broda. Prema sl. 1.2. sve dok težište sustava G_0 leži ispod metacentra M_0 , brod je stabilan i sigurno se vraća iz nagnuta u ravan položaj. Stabilnost se, dakle, uvijek javlja pri nagiñanju broda prouzrokovanu djelovanjem sila, odnosno momenata na brod, koji potječu od vjetera ili valova, ili su pak posljedica opterećenja broda ukrcanim teretom ili prodorom vode. Kako ove sile mogu djelovati statički (barem tako ih zamišljamo) ili dinamički, pri čemu se brod u oba slučaja različito ponaša, razlikujemo **statičku stabilnost** i **dinamičku stabilnost broda**.

Brod se može naginjati oko različitih vodoravnih osi, od kojih su ipak najvažnije uzdužna i poprečna os. Ovo ujedno uvjetuje i podjelu stabilnosti broda na **poprečnu** i **uzdužnu stabilnost**.

Poprečna stabilnost javlja se kad se brod naginje u poprečnom smjeru, tj. oko svoje uzdužne osi, dok se uzdužna stabilnost javlja kad se brod naginje u uzdužnom smjeru, tj. oko svoje poprečne osi.

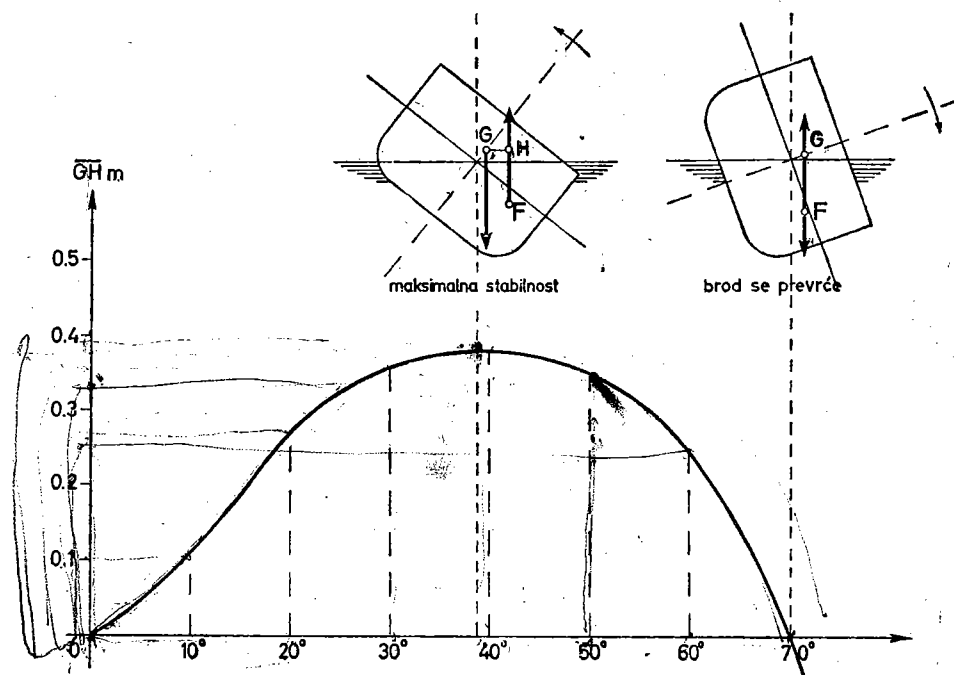
Brod ima najveći moment stabilnosti pri uzdužnom nagiñanju, a najmanji pri nagiñanju u poprečnom smjeru, zbog čega su i zamasi broda pri poprečnom nagiñanju veći i pogibeljniji. S obzirom na sigurnost broda poprečna je stabilnost važnija od uzdužne, zbog čega i nauka o stabilnosti broda proučava uglavnom poprečnu stabilnost broda. Tako se isto u običnom govoru pod nazivom »stabilnost« skoro redovito razumijevaju poprečna nagiñanja broda.

Što se brod više naginje (sl. 1.2), težište istisnine F sve više se pomiče na stranu nagiba, zbog čega se povećava i poluga \overline{GH} , a s njom do neke granice povećava se i moment stabilnosti $D \cdot \overline{GH}$. Time se moment stabilnosti dovodi u ravnotežu s povećanim momentom vanjskih sila koje djeluju na brod.

Ova promjena momenta poprečne stabilnosti prikazuje se u obliku dijagrama koji se zove **krivulja statičke stabilnosti** (sl. 1.3). Na apscisi se naznače kutovi nagiba broda, a kao ordinate se uzimaju poluge stabilnosti \overline{GH} . Kod običnih teretnih brodova poluga i moment stabilnosti imaju maksimalnu vrijednost pri nagibu broda 35—40 stupnjeva (St. maks.), što kod suvremenih brodova približno odgovara situaciji kad rub gornje palube zahvaća vodu. Stabilnost se nakon toga postupno smanjuje i traje do kuta

nagiba 60—70 stupnjeva kad vrijednost poluge \overline{GH} postane ništica i brod dođe u položaj **indiferentne ravnoteže**, što je samo po sebi opasno za brod (sl. 1.3). Udaljenost od ishodišta dijagrama do drugog sjecišta krivulje s apscisom zove se **trajnost** ili **opseg stabilnosti** i izražava se u stupnjevima; u primjeru na sl. 1.3. trajnost stabilnosti nešto je manja od 70 stupnjeva.

Kut pri kojem krivulja stabilnosti, crtana za određeno stanje tereta, tj. za određeni deplasman broda, dosegne svoj maksimum jest granica do koje se brod može nagnuti bez opasnosti da će se prevrnuti (sl. 1.3). Kad statički moment nagiba broda postane veći od najvećeg momenta upravljanja (St. maks.), brod će se najčešće prevrnuti (položaj indiferentne ravnoteže). Stoga se silazna grana krivulje statičke stabilnosti broda često naziva **upropašujuća grana** krivulje stabilnosti broda.



Sl. 1.3. Krivulja momenta statičke stabilnosti

PITANJA

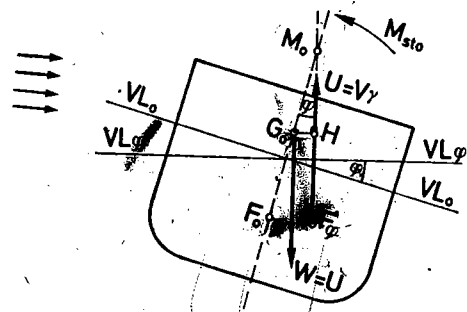
1. Što je stabilnost broda?
2. Što je sila težine broda, a što sila uzgona?
3. Koja su tri uvjeta plovnosti broda?
4. Kako utječe na stabilnost broda međusobni položaj težišta sustava G_0 i metacentra M_0 ?
5. Kako se dijeli stabilnost broda?
6. Što je poprečna, a što uzdužna stabilnost broda?
7. Što je moment statičke stabilnosti broda?
8. Što je metacentar, a što metacentarska visina broda?
9. U kome se obliku prikazuje promjena momenta poprečne stabilnosti broda?
10. Pri kojim kutovima nagiba teretnih brodova ima moment stabilnosti najveću vrijednost?

2. POPREČNA STABILNOST BRODA

2.1. Podjela poprečne stabilnosti. Poprečna stabilnost broda dijeli se na početnu stabilnost broda i stabilnost pri velikim kutovima nagiba broda.

Početna stabilnost je ona što je brod ima pri vrlo malim kutovima nagiba, približno do 10 ili 12 stupnjeva bočnog nagiba. Toj stabilnosti posvećuje se osobita pozornost, jer je uspravan položaj normalan za svaki brod dok pliva. Veliko značenje ima početna stabilnost i zbog toga što brod koji posjeduje dobru početnu stabilnost ima sve preduvjete da mu do neke granice i stabilnost pri velikim kutovima nagiba bude dobra.

Stabilnost pri velikim kutovima nagiba ostvaruje se po nešto drukčijim zakonima nego početna stabilnost broda.



Sl. 2.1. Stabilna ravnoteža broda

2.2. Glavne značajke početne stabilnosti broda. Glavna je značajka početne stabilnosti broda (sl. 2.1) ta što se u području kutova nagiba od ničtice do, otprilike, 12 stupnjeva, težište uzgona kreće ravnomjerno u stranu nagiba broda po dijelu luka kružnice kojoj je središte u metacentru M . To znači da metacentar kao točka za vrijeme trajanja početne stabilnosti ostaje stalno na istom mjestu. To ujedno znači da se pri svim nagibima za trajanja početne stabilnosti svi smjerovi sile uzgona sijeku u metacentru M . Budući da se težište sustava broda G_0 ne mijenja pri nagibu broda, jer nagib uzrokuju vanjske sile, to i metacentarska visina $\overline{M_0G_0}$ za vrijeme trajanja početne stabilnosti zadržava stalnu, tj. nepromijenjenu vrijednost i zove se početna metacentarska visina (engl. *initial metacentric height*). Ona je pozitivna ako se težište sustava nalazi ispod metacentra M_0 .

Pri početnoj stabilnosti težište uzgona F_0 pomiče se u stranu nagiba broda po dijelu luka kružnice kojoj je središte u metacentru M_0 . To ujedno znači da se položaj metacentarske točke M_0 određuje s pomoću polumjera luka kružnice $\overline{F_0F_\varphi}$ (sl. 1.2), a taj je polumjer visina metacentra nad težištem istisnine ($r = \overline{M_0F_0}$). Stoga se taj polumjer zove metacentarski polumjer, ili, točnije, poprečni metacentarski polumjer, jer se odnosi na poprečnu stabilnost broda i označuje se sa $\overline{M_0F_0}$. Polumjer $\overline{M_0F_0}$ jest značajna vrijednost u teoriji broda i služi pomorcima u praksi, pri provjeri stabilnosti i drugim sličnim proračunima.

Početna metacentarska visina $\overline{M_0G_0}$, upravo zbog toga što zadržava stalnu vrijednost, služi kao mjerilo ili pokazatelj početne stabilnosti broda. Ona je, prema tome, bitna za provjeru stabilnosti u eksploataciji broda. Ta se provjera svodi na proračunavanje same početne metacentarske visine. Proračunavanje početne stabilnosti važno je i zbog toga što je dobra početna stabilnost preduvjet i za dobru stabilnost pri velikim kutovima nagiba broda.

2.3. Moment početne stabilnosti broda. Smatrajući metacentar M_0 stalnom točkom, a udaljenost $\overline{M_0G_0}$ stalnom vrijednosti, moment početne stabilnosti proračunava se iz formule za moment stabilnosti $M_{st0} = U \cdot \overline{GH}$. Prema sl. 1.2. poluga stabilnosti može se u tom slučaju izraziti kao $G_0H = \overline{M_0G_0} \cdot \sin \varphi$. Tada formula za moment početne stabilnosti glasi:

$$M_{st0} = U \cdot \overline{M_0G_0} \cdot \sin \varphi$$

Smatrajući deplasman broda D kao masu, formula za moment početne stabilnosti može se izraziti i ovako:

$$M_{st0} = D \cdot \overline{M_0G_0} \cdot \sin \varphi$$

To je formula početne stabilnosti i prema njoj, za jedan određeni deplasman broda, stabilnost raste razmjerno početnoj metacentarskoj visini $\overline{M_0G_0}$ i sinusu kuta nagiba broda (φ). Ova formula je ujedno matematička potvrda da početna metacentarska visina $\overline{M_0G_0}$ može poslužiti kao mjerilo ili pokazatelj početne stabilnosti broda.

Budući da je veličina broda donekle u svezi s njegovim tipom, može se na temelju iskustva sastaviti pregled početnih metacentarskih visina različitih tipova trgovačkih i ratnih brodova. Takav pregled početnih metacentarskih visina za trgovačke brodove približno je ovakav:

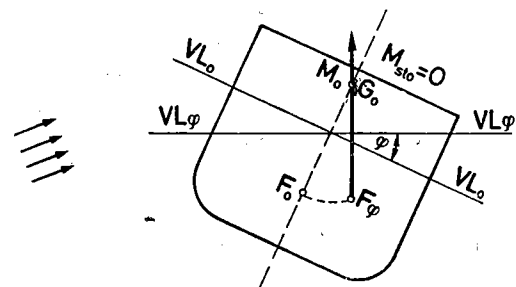
— putnički brodovi	0,35 — 0,90 m
— teretni brodovi	0,50 — 1,00 m
— tegljači	0,45 — 0,90 m
— jedrenjaci	1,00 — 1,40 m

Isti takav pregled za ratne brodove izgleda ovako:

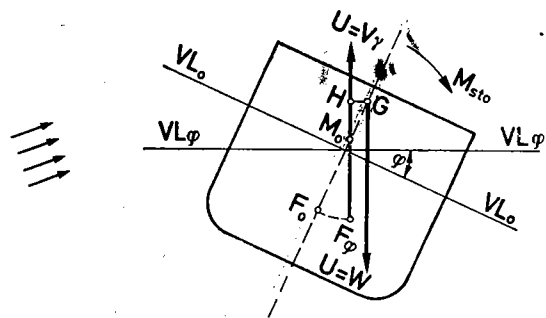
— teške krstarice	1,70 — 2,10 m
— lake krstarice	0,70 — 1,20 m
— razarači	0,70 — 1,20 m
— podmornice	0,50 — 0,90 m

2.4. Stabilnost pri indiferentnoj i labilnoj ravnoteži broda. Samo pomicanje težišta sustava broda G_0 po visini uzrokuje promjenu stabilnosti, jer pri početnoj stabilnosti metacentar M_0 ostaje u istoj točki. U tom pogledu karakteristična su tri slučaja:

a) Kad brod krca teret, težište sustava broda mijenja položaj po visini. Međutim, dokle god je ono niže od metacentra, pri naginjanju broda uvijek će se javljati uspravljujući moment $D \cdot \overline{M_0 G_0} \cdot \sin \varphi$, pa je brod stabilan (sl. 2.1.). Tada kažemo da je brod u stabilnoj ravnoteži, a ta ravnoteža je treći uvjet plovnosti broda. Pri stabilnoj ravnoteži početna je metacentarska visina $\overline{M_0 G_0}$ pozitivna, jer je metacentar M_0 iznad težišta G_0 .



Sl. 2.2. Stabilnost u uvjetima indiferentne ravnoteže broda



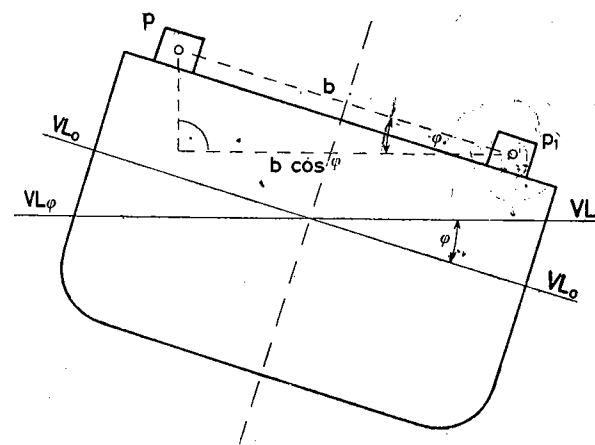
Sl. 2.3. Labilna ravnoteža broda

b) Kad se pri krcanju tereta na brod ili zbog drugih razloga težište sustava broda toliko uzdigne da dođe do metacentarske točke, neće se pojaviti uspravljujući par sila (sl. 2.2), pa kažemo da se brod nalazi u indiferentnoj ravnoteži. Na slici vidimo da je u ovom slučaju početna metacentarska visina $\overline{M_0 G_0} = 0$.

c) Kad se zbog nestručno ukrcana tereta ili kojega drugog razloga težište sustava pomakne iznad metacentra, brod će se naći u položaju labilne ravnoteže. U tom slučaju uspravljujući par sila postaje negativan i pomaže da se

brod nagine umjesto da ga vraća u ravan položaj (sl. 2.3). Početna metacentarska visina je negativna, jer je metacentar M_0 ispod težišta sustava G_0 .

2.5. Određivanje početne metacentarske visine pokusom naginjanja broda. Pri projektiranju trgovačkog broda nastoji se što točnije proračunati metacentarska visina $\overline{M_0 G_0}$, ali to nije lako postići. Dok se položaj težišta istisnine F_0 i metacentarski polumjer $\overline{M_0 F_0}$ mogu vrlo točno proračunati, proračun položaja težišta sustava u fazi projektiranja broda ne daje točne rezultate.



Sl. 2.4. Pokus nagiba broda

Zbog toga se nakon završetka gradnje broda, u okviru propisanih pukušnih vožnja, obavi pokus naginjanja broda premještanjem tereta mase p na udaljenost b u smjeru širine broda (sl. 2.4). Tako obavljene proračun služi kao kontrola prijašnjih teoretskih proračuna. U određenim uvjetima (npr. ako postoji pogodan teret za premještanje) i u eksploataciji broda može se na ovaj način provjeriti stabilnost broda.

Račun se izvodi na temelju formule za moment početne stabilnosti i poznatog poučka iz mehanike da je nagibajući moment premještanja tereta ($p \cdot b \cos \varphi$) jednak nagibajućem momentu broda, odnosno momentu stabilnosti broda ($D \cdot \overline{G_0 H}$). Prema tome:

$$p \cdot b \cdot \cos \varphi = D \cdot \overline{G_0 H} = D \cdot \overline{M_0 G_0} \cdot \sin \varphi$$

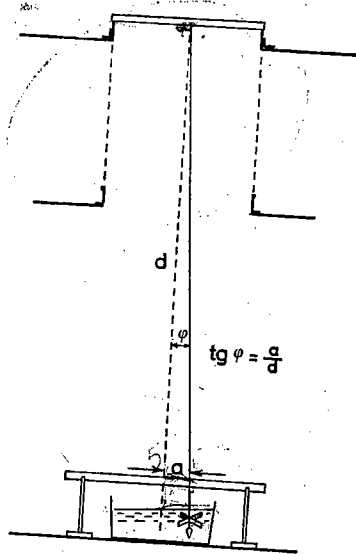
$$\overline{M_0 G_0} = \frac{p \cdot b \cdot \cos \varphi}{D \cdot \sin \varphi} = \frac{p \cdot b \cdot \operatorname{ctg} \varphi}{D} = \frac{p \cdot b}{D \cdot \operatorname{tg} \varphi}$$

Takav se proračun redovito obavlja kad se grade putnički brodovi i novi tipovi teretnih brodova. Kad se serijski grade teretni brodovi istog tipa, pokus naginjanja broda obavlja se samo na prvom sagrađenom brodu, tzv. prototipu.

U ratnoj je mornarici pravilo da se pokus naginjanja obavlja na svakom brodu odmah nakon porinuća. Pokus se ponovno obavlja kad se brod dogradi i potpuno opremi, pa se tako izmjerena početna metacentarska visina unosi u brodsku dokumentaciju (matična knjiga broda).

Pokus nagiba broda svodi se na što točniju izmjeru kuta nagiba φ prouzrokovanog premještanjem tereta mase p na daljinu b .

Kut nagiba mjeri se viskom napravljenim od ribarskog konca s olovnom utegom na kraju. Olovni uteg mase 1—2 kg visi na tankom i čvrstom koncu kako bi se što točnije mogao izmjeriti otklon utega pri nagibu broda. Na teretnim brodovima visak se obično objesi o grotlo srednjeg skladišta, a olovni uteg se radi otklanjanja oscilacija spusti u posudu s vodom ili uljem, smještenim na dnu skladišta (sl. 2.5). Da bi se što sigurnije smanjila oscilacija, iznad olovnog utega obično se postavi manji drveni križić. Na ratnim brodovima visak s olovnom utegom obično se objesi u bunare komora za municiju ili pak u strojarski prostor, dok se posuda s vodom ili uljem postavi na dno tih prostorija.



Sl. 2.5. Mjerenje kuta nagiba pri pokusu nagiba broda

Otklon viska uzrokovan nagibom broda mjeri se na ravnalu postavljenom iznad posude s vodom, odnosno uljem (sl. 2.5). Ako je d visina viska u metrima, a a duljina otklona konca u metrima, onda je kut nagiba broda:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a}{d}$$

Kad se obavlja pokus nagiba, brod se obično veže za plutaču u nekoj zaštićenoj luci ili u lučkom bazenu, odnosno bazenu brodogradilišta. Time se postiže da se brod može sam okretati prema vjetru ili struji i na taj način otklanja njihov utjecaj na nagib broda; sidra pri tome moraju biti potpuno uvučena u ždrijela. Pokus se obavlja rano ujutro kad obično vlada tišina, a jakost vjetra ne prelazi 2 bofora.

Kad se obavlja pokus, kut nagiba ograničen je i iznosi obično 3 do 4 stupnja, jer je za određivanje početne M_0G_0 takav kut nagiba dovoljan, a pri tome nije potrebno premješati mnogo tereta. Duljina viska ne smije biti manja od 2 m ni dulja od 10 m. U svakom slučaju pomicanje konca na ravnalu mora biti najmanje 12 cm (0,12 m).

Teret pri mjerenju nagiba $2p$ mora biti 1—2% deplasmana broda, a obično se smješta na gornjoj palubi, jednako i simetrično s obje strane broda. Kao teret upotrebljavaju se željezne poluge od 50 kg mase jer se mogu lako prenositi ljudskom snagom. Međutim, prije premještanja tereta u obliku željeznih poluga s jednog boka broda na drugi, tj. prije početka pokusa, brod treba točno izravnati premještanjem manjih tereta, npr. čamaca na sohama i sl. Osim toga prije početka pokusa treba iz čamca točno izmjeriti gaz na pramcu i gaz na krmi, odrediti srednji gaz i na temelju njega izračunati deplasman broda iz dijagramnog lista ili tablice deplasmana.

Za vrijeme pokusa teret se premješta s jedne strane broda na drugu stranu i ponovo natrag (npr. s lijeve strane na desnu i natrag). Nakon toga se teret prenosi na suprotnu stranu i ponovo natrag (npr. s desne na lijevu stranu i natrag). Pri tome se svaki put točno zabilježi otklon viska, a kad se teret izravna, visak se mora vratiti u nulti položaj. Netočnosti koje bi se tada mogle pojaviti posljedica su utjecaja vjetra ili struje na jedan bok broda, zatim protjecanja slobodne vode kroz otvore uzdužnjaka na dnu broda ili su pak posljedica slučajnih premještanja težina u poprečnom smjeru broda, npr. kretanje posade. Da bi se izbjegle slučajne oscilacije za vrijeme pokusa, zabranjeno je kretanje ljudi u poprečnom smjeru broda. Posada broda za to vrijeme obično mora biti na za to određenom mjestu na gornjoj palubi broda.

Za pokus naginjanja brod se obično priprema dan prije. Trgovački brodovi moraju biti bez tereta, ali s deplasmanom koji odgovara praznom brodu (laki deplasman) ili vožnji u balastu.

O pokusu naginjanja sastavlja se poseban zapisnik u koji se bilježe ovi podaci: datum i mjesto pokusa, temperatura i specifična gustoća vode (radi korekcije deplasmana), vremenske prilike i stanje mora, duljina i otklon viska, gaz broda i dr. Za čitav pokus naginjanja obično treba dva do tri sata.

Kada se tako odredi početna metacentarska visina M_0G_0 , položaj težišta sustava broda po visini, tj. njegova visina nad kobilicom, KG_0 izračuna se ovako:

$$\overline{KG_0} = \overline{KM_0} - \overline{M_0G_0}$$

Vrijednost $\overline{KM_0}$ kao $\overline{KM_0} = \overline{KF_0} + \overline{M_0F_0}$ izračuna se iz dijagramnog lista broda.

2.6. **Određivanje kuta nagiba pri premještanju tereta u poprečnom smjeru broda.** Za proračunavanje kuta nagiba broda uzrokovanog premještanjem tereta u poprečnom smjeru, tj. u smjeru širine broda, služi formula za $\overline{M_0G_0}$ izvedena u t. 2.5. Prema tome, kad se teret poznate mase p mora premjestiti u poprečnom smjeru broda na daljinu b , kut nagiba φ izračuna se kao:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{p \cdot b}{D \cdot \overline{M_0G_0}}$$

2.7. **Međusobni odnos metacentarske visine i perioda ljuľjanja broda.** Za držanje broda na valovima važan je period ljuľjanja (t). To je vrijeme u sekundama za koje se brod nagne s jednog boka na drugi. Dvostruki period ljuľjanja ($2t$) jest vrijeme u sekundama koje proteće dok brod napravi jednu potpunu oscilaciju, tj. dok se nagne s jednog boka na drugi i ponovo vrati u početni položaj (na primjer, nagib broda s desnog boka na lijevi i ponovo s lijevog na desni).

Brod će se iz nagnutog stanja brže ispraviti što je veći moment $D \cdot \overline{G_0H}$, odnosno $D \cdot \overline{M_0G_0} \cdot \sin \varphi$ koji ga uspravlja, tj. što je veća metacentarska visina $\overline{M_0G_0}$. To znači da će se brod s velikom metacentarskom visinom brzo ljuľjati i brzo vraćati u ravan položaj, tj. njegov period ljuľjanja bit će kratak. Teoretski to znači da će brodovi s velikom metacentarskom visinom biti previše stabilni i da će brzo reagirati na nagibne momente valova (živi brodovi). Obratno se događa s brodovima koji imaju malu metacentarsku visinu. U njima je moment $D \cdot \overline{M_0G_0} \cdot \sin \varphi$ manji i zbog toga period ljuľjanja veći, tj. sporije se vraćaju u ravan položaj (tromi brodovi).

Kad su prazni, teretni brodovi imaju obično premalu početnu stabilnost, jer im se težište sustava G_0 pomakne prema gore. Tada brodovi moraju ukrcati vodeni balast da bi im se spustilo težište sustava i time povećala metacentarska visina odnosno početna stabilnost. Za takve brodove kaže se da plove u balastu. Takvi brodovi su katkada previše stabilni pa se naglo i brzo ljuľjaju, osobito ako je cijeli balast smješten u dvodnu.

Brodovima za rasuti teret ugrađuju se visoki tankovi za balast. Kad su ti brodovi potpuno nakrcani, punjenjem tankova balastom ne povećava se previše metacentarska visina, a time ni stabilnost kako brodovi ne bi bili previše živi na valovima.

Putnički brodovi namjerno imaju relativno malu metacentarsku visinu. To je učinjeno radi udobnosti putnika jer brodovima na taj način period ljuľjanja postaje duži pa se nikada ne ljuľjaju naglo i brzo. Sa svim tim putnički brodovi su vrlo stabilni jer imaju veliku nadvodnu visinu, a time i veliku rezervu uzgona. Ova velika rezerva uzgona, odnosno istisnine, znatno povećava stupanj nepotopivosti broda, a vezana je i s nepropusnim pregradama broda.

Za teretne brodove najbolje je ako imaju umjerenu metacentarsku visinu (umjerenu stabilnost), tj. ako nisu ni previše živi ni previše tromi na valovima. Zbog toga oni imaju najpovoljniju početnu stabilnost kad su normalno opterećeni ili kada plove u balastu.

3. PROMJENA POPREČNE STABILNOSTI U RAZNIM UVJETIMA PREMJEŠTANJA I KRCANJA TERETA

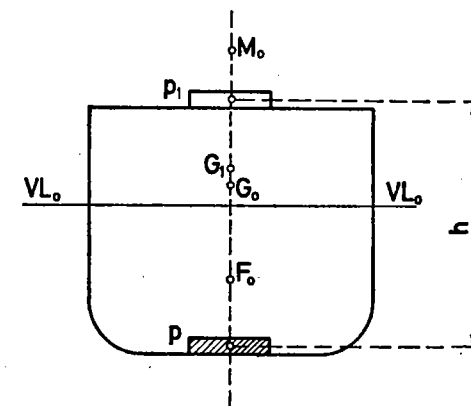
3.1. **Općenito o promjeni poprečne stabilnosti broda.** Stabilnost je u tijesnoj svezi s pomicanjem težišta sustava broda, a pogotovo kad se ono pomiče u vertikalnom smjeru, jer se tada povećava ili smanjuje početna metacentarska visina broda $\overline{M_0G_0}$. Težište sustava može se pomicati zbog premještanja, a isto tako i zbog ukrcavanja ili iskrcavanja tereta.

3.2. **Promjena stabilnosti pri premještanju tereta.** Premještanje tereta poklapa se sa smjerom koordinatnih osi pravokutnoga (ortogonalnog) koordinatnog sustava s tim što koordinatne osi x i y obično leže u vodoravnoj ravnini koja prolazi osnovkom broda. Pri tome razlikujemo premještanje tereta po visini (h), premještanje u smjeru širine broda (b) i premještanje u smjeru duljine broda (d).

Promjenu stabilnosti broda zbog premještanja tereta po visini uzrokuje promjena položaja težišta sustava broda. Ako se teret mase p u tonama premješta vertikalno za visinu h u metrima (sl. 3.1), tada se promjena položaja težišta sustava broda G_0 izračunava primjenom poučka o pomaku težišta:

$$\overline{G_0G_1} : h = p : D$$

$$\overline{G_0G_1} = \frac{p \cdot h}{D}$$



Sl. 3.1. Promjena stabilnosti broda pri premještanju tereta

Analogno tome, promjena metacentarske visine bit će:

$$\overline{M_0G_1} = \overline{M_0G_0} \pm \overline{G_0G_1}$$

U spomenutoj formuli \pm zavisi od toga da li je pomak tereta obavljen prema dolje (+) ili prema gore (−) od početnog položaja.

Primjer

M/b »Držić« ima deplasman $D = 21\,273$ t, a metacentarsku visinu $\overline{M_0G_0} = 0,77$ m. Kolika će biti nova metacentarska visina ako se iz skladišta broj 4 premjesti 100 t tereta u međupalubni prostor broj 4? Udaljenost težišta premještenog tereta nad prijašnjim položajem iznosi 8 m.

Rješenje

$$\overline{G_0G_1} = \frac{p \cdot h}{D} = \frac{100 \cdot 8}{21\,273} = 0,04 \text{ m}$$

$$\overline{M_0G_1} = \overline{M_0G_0} - \overline{G_0G_1} = 0,77 - 0,04 = 0,73 \text{ m}$$

Ako je vertikalno premještanje tereta uzrokovalo i naginjanje u smjeru širine broda, onda se kut nagiba za promijenjenu metacentarsku visinu računa analogno formuli u t. 2.6:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{p \cdot b}{D \cdot \overline{M_0G_1}}$$

3.3. Promjena poprečne stabilnosti zbog dodavanja ili uzimanja tereta. Kad se brodu dodaje ili uzima teret poznate mase p , obično se mijenja i stabilnost broda, odnosno metacentarska visina $\overline{M_0G_0}$. Pri tome, zapravo, mijenjaju svoj položaj sve tri točke značajne za stabilnost broda, tj. metacentar M_0 , težište sustava G_0 i težište deplasmana F_0 .

Promjena položaja težišta sustava $\overline{G_0G_1}$ računa se po formuli:

$$\overline{G_0G_1} = \pm \frac{p \cdot h}{D \pm p}$$

U formuli je h udaljenost težišta ukrcanog ili iskrcanog tereta od težišta sustava broda G_0 . Nova metacentarska visina $\overline{M_0G_1}$ bit će:

$$\overline{M_0G_1} = \overline{M_0G_0} \pm \frac{p \cdot h}{D \pm p}$$

Korekcije zbog premještanja težišta deplasmana i promjene metacentarskog polumjera obično se zanemaruju kad je p malen u odnosu prema D .

Težište sustava nakrcanog broda obično se nalazi blizu konstrukcijske vodene linije KVL . Stoga vrijedi ovo praktično pravilo: Kada se teret dodaje ili uzima u blizini vodene linije (VL), stabilnost se ne mijenja; kada se teret uzima ispod ili dodaje iznad VL, stabilnost se smanjuje, a kada se dodaje ispod ili uzima iznad VL, stabilnost se povećava.

Kut nagiba u smjeru širine broda, uzrokovan dodatkom ili uzimanjem nekog tereta, računa se po formuli navedenoj u t. 2.6, samo se umjesto D uzima u obzir $D \pm p$.

Primjer

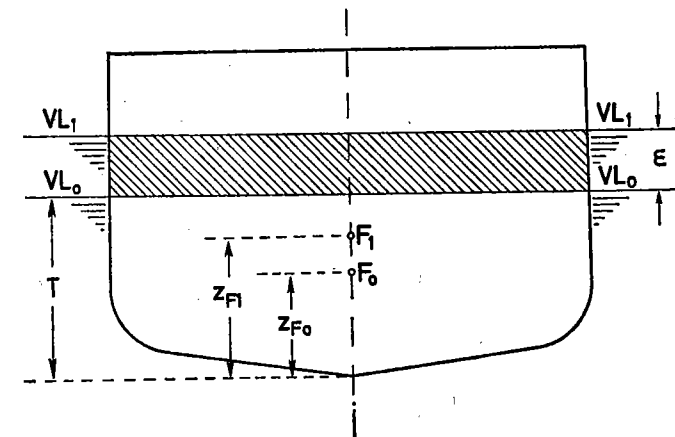
Deplasman tegljača je $D = 65$ t, a metacentarska visina $\overline{M_0G_0} = 0,7$ m. Na palubi tegljača smjestilo se 70 ljudi kojih je masa $p = 70 \cdot 0,075 = 5,25$ t, a njihovo je skupno težište iznad težišta sustava za približno $h = 1,7$ m. Za koliko će se smanjiti metacentarska visina i kolika će biti njezina nova vrijednost?

Rješenje

$$\overline{G_0G_1} = \frac{p \cdot h}{D \pm p} = \frac{5,25 \cdot 1,7}{60 + 5,25} = \frac{8,925}{65,25} = 0,14 \text{ m}$$

$$\overline{M_0G_1} = \overline{M_0G_0} - \overline{G_0G_1} = 0,70 - 0,14 = 0,56 \text{ m}$$

Jasno je da dodani ili uzeti teret ($\pm p$) utječe i na položaj težišta deplasmana F_0 (sl. 3.2) jer se s povećanjem ili smanjenjem gaza mijenja i oblik



Sl. 3.2. Promjena položaja težišta uzgona pri krcanju i iskrcavanju tereta

podvodnog dijela broda. Na sl. 3.2. T je gaz broda, a ε visina dodanog ili uzetog sloja. Taj sloj se uzima kao cilindar kome je baza vodena linija zbog

čega se središte sloja nalazi na visini $\frac{\varepsilon}{2}$. Vrijednost z_{F_1} je visina iznad kobilice novog položaja težišta deplasmana F_1 .

Položaj novog težišta istisnine izračunava se na temelju poučka o pomaku težišta:

$$\overline{F_0 F_1} : z_{F_0} = p : (D \pm p)$$

$$\overline{F_0 F_1} = \frac{p \cdot z_{F_0}}{D \pm p}$$

Primjer

Teretni brod ima 18 700 t deplasmana, a udaljenost težišta istisnine od osnovke je $z_{F_1} = 4,26$ m. Kolika će biti nova udaljenost težišta istisnine od osnovke (z_{F_1}) ako se na palubu broda ukrca teret drva mase $p = 800$ t?

Rješenje

$$\overline{F_0 F_1} : z_{F_0} = p : (D \pm p)$$

$$\overline{F_0 F_1} = \frac{p \cdot z_{F_0}}{D + p} = \frac{800 \cdot 4,26}{18\,700 + 800}$$

$$\overline{F_0 F_1} = \frac{3\,408}{19\,500} = 0,17 \text{ m}$$

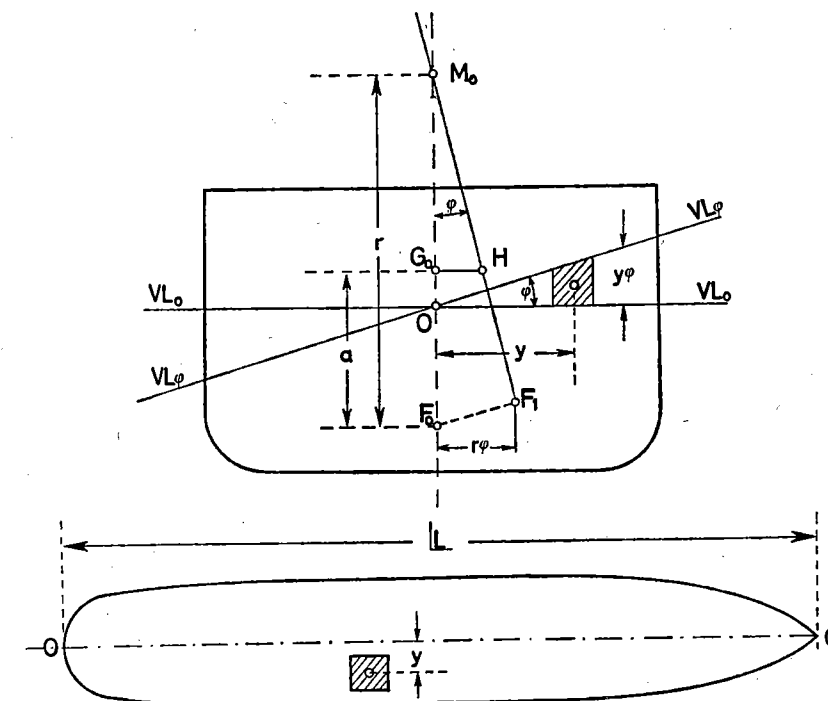
$$z_{F_1} = z_{F_0} + \overline{F_0 F_1} = 4,26 + 0,17 = 4,43 \text{ m}$$

$$\overline{F_0 F_1} = \frac{3\,400}{19\,500} = 0,174 \text{ m}$$

4. SLOBODNE POVRŠINE I NJIHOV UTJECAJ NA STABILNOST BRODA

4.1. Moment tromosti površine vodene linije. Moment tromosti površine vodene linije (VL) značajna je vrijednost koja objašnjava mnoge pojave što su u svezi sa stabilnošću broda i slobodnim površinama tekućina i rasutog tereta. Temelji se na prihvaćenom načelu da je svaka čestica površine zapravo čestica mase, pa se svi proračuni koji su u svezi s momentom tromosti, kako površine vodene linije, tako i površine tekućina u brodskim tankovima, odnosno površine rasutog tereta u brodskim skladištima, obavljaju na toj osnovi.

Moment tromosti vodene linije objašnjen je na sl. 4.1. Na slici je φ vrlo malen kut nagiba broda, f je mala čestica površine vodene linije, a y udaljenost težišta te čestice od osi, tj. simetrale broda. Os OO' prolazi kroz težište vodene linije, a ono se nalazi u simetrali broda, jer je oblik vodene linije broda simetričan.



Sl. 4.1. Moment tromosti površine vodene linije

Debljina čestice označena je lučnom mjerom kao $y\varphi$, prema tome njezin je volumen $v = f \cdot y \cdot \varphi$, a masa $p = f \cdot y \cdot \varphi \cdot \rho$ (umjesto specifične težine γ specifična gustoća ρ , jer se radi o masi).

Moment uzgona ove čestice (m) u odnosu prema simetrali (uzdužnici) broda, tj. u odnosu prema osi OO' na slici bit će jednak umnošku mase čestice, dakle mase i poluge y . Prema tome:

$$m = f \cdot y \cdot \varphi \cdot \rho \cdot y = f \cdot y^2 \cdot \varphi \cdot \rho$$

Pri nagibu broda djeluju sve čestice volumena desnoga, uronjenog klina, u smjeru uspravljanja, dakle okreću ulijevo, a čestice lijevoga izronjenog klina također okreću ulijevo te je suma momenata svih čestica volumena u oba klina $\Sigma f \cdot y^2 \cdot \varphi \cdot \rho$.

Po zakonu o polugama iz fizike, čim se brod nagne za kut φ , moment premještanja vodene linije mora biti jednak momentu premještanja broda kojega je poluga premještanja $\overline{F_0F_1}$ (sl. 4.1). Prema tome:

$$D \cdot \overline{F_0F_1} = V \cdot \rho \cdot \overline{F_0F_1} = \Sigma f \cdot y^2 \cdot \varphi \cdot \rho$$

Ako se sada i vrijednost poluge $\overline{F_0F_1}$ izrazi lučnom mjerom, bit će $\overline{F_0F_1} = r \cdot \varphi$. Iz toga dalje izlazi:

$$r \cdot \varphi \cdot V \cdot \rho = \Sigma f \cdot y^2 \cdot \varphi \cdot \rho$$

$$r \cdot \varphi = \frac{\Sigma f \cdot y^2 \cdot \varphi \cdot \rho}{V \cdot \rho} = \frac{\Sigma f \cdot y^2 \cdot \varphi}{V}$$

Ako se umjesto r stavi udaljenost $\overline{M_0F_0}$, bit će:

$$\overline{M_0F_0} = r = \frac{\Sigma f \cdot y^2 \cdot \varphi}{V \cdot \varphi} = \frac{\Sigma f \cdot y^2}{V}$$

Vrijednost $\Sigma f \cdot y^2$ jest zbroj umnožaka svih površinskih čestica vodene linije i kvadrata njihove udaljenosti od osi težišta i zove se moment tromosti vodene linije, a označuje se sa I . Prema tome:

$$\overline{M_0F_0} = \frac{I}{V}$$

Iz toga proizlazi pravilo da je metacentarski polumjer početne stabilnosti jednak momentu tromosti vodene linije podijeljenom volumenom podvodnog dijela broda.

Formula $\overline{M_0F_0} = \frac{I}{V}$ ujedno pokazuje da će biti veći poprečni metacentarski polumjer, što je veći moment tromosti vodene linije, tj. što je veća površina VL . To znači da se u tom slučaju podigne metacentar i poveća metacentarska visina, dakle, poveća se početna stabilnost broda. Ovo je važno u proučavanju stabilnosti broda.

Budući da se brod nagine u poprečnom smjeru (u smjeru širine B) i u uzdužnom smjeru (u smjeru duljine L), analogno dakle poprečnoj i uzdužnoj stabilnosti, razlikuje se i moment tromosti VL za vrijeme poprečnih naginjanja (I_B) i moment tromosti VL za vrijeme uzdužnih naginjanja (I_L).

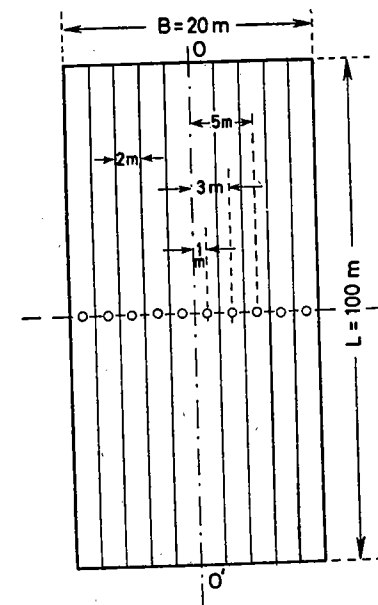
4.2. Proračunavanje momenta tromosti vodene linije. Da bi se razmotrilo proračunavanje momenta tromosti površine vodene linije, neka posluži pravokutni ponton kojega su dimenzije: $L = 100$ m, $B = 20$ m i $T = 5$ m. Radi proračuna momenta tromosti vodena linija pontona razdijeljena je na deset uzdužnih pojava jednake širine (2 m).

Površina svakog pojasa je $f = 100 \cdot 2 = 200$ m². Težišta pojedinih pojava udaljena su od simetralne osi OO' za $y = 1, 3, 5, 7$ i 9 m (sl. 4.2). Prema tome:

$$I = \Sigma f \cdot y^2 = 2 \cdot (200 \cdot 1^2 + 200 \cdot 3^2 + 200 \cdot 5^2 + 200 \cdot 7^2 + 200 \cdot 9^2) \cong 66\,000 \text{ m}^4$$

Tako dobiveni rezultat za moment tromosti vodene linije četverokutnog pontona je točan, međutim, u praksi se upotrebljava formula koja omogućuje relativno brz i jednostavan način računanja.

Ta formula izvedena je na temelju sl. 4.3. Na slici je φ vrlo mali kut nagiba pontona. Ako je svaka čestica površine vodene linije čestica mase, onda je moment tromosti vodene linije zapravo moment premještanja klinova pri nagibu pontona za mali kut φ . Ako je L duljina pontona, a B njegova širina, onda je visina uronjenog klina jednaka $h = \frac{B}{2} \text{tg } \varphi$. Volumen v uronjenog klina jednak je polovici volumena prizme kojoj je baza $L \cdot \frac{B}{2}$, a visina h . Prema tome je:



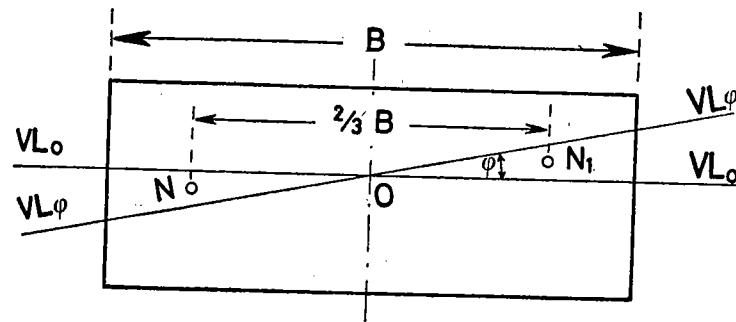
Sl. 4.2. Izračunavanje momenta tromosti površine vodene linije pravokutnog pontona

$$v = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{B}{2} \cdot \frac{B}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi = \frac{L \cdot B^2}{8} \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Ako je $\overline{NN_1}$ poluga premještanja klinova, onda je moment premještanja klinova, odnosno moment tromosti vodene linije:

$$I = v \cdot \overline{NN_1} = \frac{L \cdot B^2}{8} \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{2 \cdot B}{3} = \frac{L \cdot B^3}{12} \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Izraz $\frac{L \cdot B^3}{12}$ zove se moment tromosti vodene linije pravokutnog pontona.



Sl. 4.3. Izvođenje formule za moment tromosti površine vodene linije pravokutnog pontona

Ako se po ovoj formuli izračuna moment tromosti VL za ponton na sl. 4.2, bit će:

$$I = \frac{L \cdot B^3}{12} = \frac{100 \cdot 20^3}{12} = 66\,666 \text{ m}^4$$

Metacentarski polumjer pontona bit će:

$$\overline{M_0F_0} = \frac{I}{V} = \frac{66\,666}{10\,000} = 6,6 \text{ m}$$

Moment tromosti vodene linije trgovačkih i ratnih brodova može se približno izračunati po ovoj formuli:

$$I_B = \frac{L \cdot B^3}{11,7} \cdot \alpha^2$$

U formuli je α koeficijent punoće vodene linije.

Primjer

Pravokutni ponton ima dimenzije: $L = 22 \text{ m}$, $B = 10 \text{ m}$ i $T = 1,2 \text{ m}$. Koliki je poprečni metacentarski polumjer $\overline{M_0F_0}$?

Rješenje

$$I_B = \frac{L \cdot B^3}{12} = \frac{22 \cdot 10^3}{12} = \frac{22\,000}{12} = 1\,833,3 \text{ m}^4$$

$$V = L \cdot B \cdot T = 22 \cdot 10 \cdot 1,2 = 264 \text{ m}^3$$

$$\overline{M_0F_0} = \frac{I_B}{V} = \frac{1\,833}{264} = 6,9 \text{ m}$$

Primjer

Teretni brod ima dimenzije: $L = 133,0 \text{ m}$, $B = 19,3 \text{ m}$ i $T = 7,2 \text{ m}$. Deplasman broda je $D = 12\,920 \text{ t}$, a koeficijent punoće vodene linije $\alpha = 0,78$. Koliki je poprečni metacentarski polumjer $\overline{M_0F_0}$?

Rješenje

$$I_B = \frac{L \cdot B^3}{11,7} \cdot \alpha^2 = \frac{133 \cdot 19,3^3}{11,7} \cdot 0,78^2$$

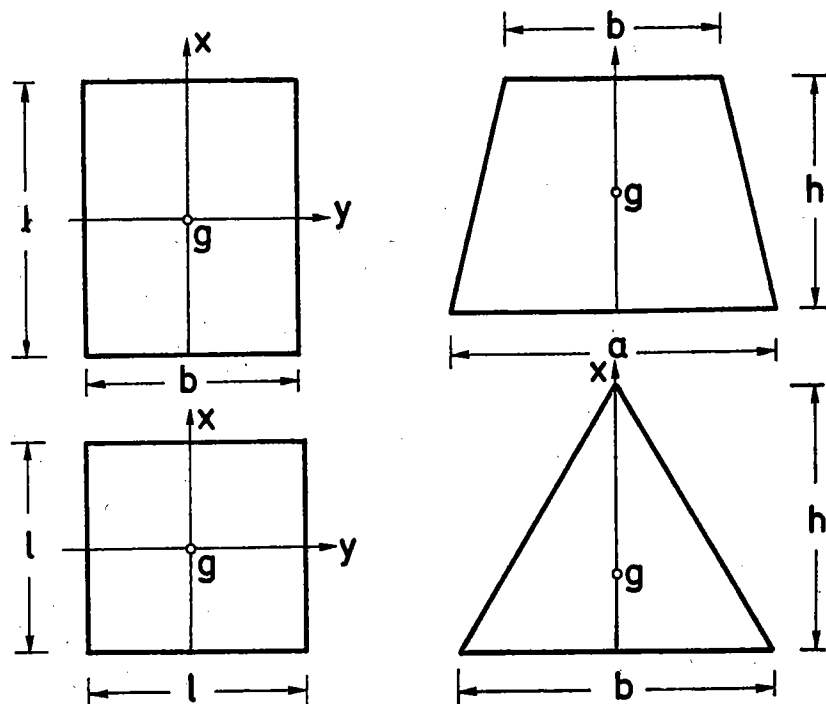
$$I_B = 49\,719,517 \text{ m}^4$$

$$V = \frac{D}{\rho} = \frac{12\,920}{1,025} = 12\,605 \text{ m}^3$$

$$\overline{M_0F_0} = \frac{I_B}{V} = \frac{49\,719,5}{12\,605} = 3,94 \text{ m}$$

4.3. Moment tromosti površine tekućine u brodskim tankovima. U brodskim tankovima, kada oni nisu do vrha puni, površina tekućine slijedi nagibe broda i uvijek je usporedna s površinom vodene linije. Međutim, brodski tankovi, pogotovo oni u kojima je smješteno gorivo i mazivo, nikad ne smiju biti do vrha puni. Njihov moment tromosti računa se u odnosu na os koja prolazi kroz težište tekućine g (sl. 4.4).

Za razliku od momenta tromosti vodene linije broda, moment tromosti površine tekućine u brodskim tankovima označuje se sa i . Kako veći dio brodskih tankova ima pravokutni oblik, njihov moment tromosti računa se analogijom s momentom tromosti pravokutnog pontona (t. 4.2.).



Sl. 4.4. Moment tromosti površine brodskih tankova čiji presjek ima različite oblike

Prema tome, ako je l duljina tanka u metrima, a b njegova širina (sl. 4.4), tada će moment tromosti površine tekućine u tanku biti:

$$i = \frac{l \cdot b^3}{12}$$

Međutim, brodski tankovi mogu imati i drukčiji oblik od pravokutnog, pa se u tom slučaju, prema sl. 4.4 njihovi momenti tromosti računaju ovako:

a) Moment tromosti kvadratnog tanka:

$$i = \frac{l^4}{12}$$

b) Moment tromosti tanka trokutnog oblika:

$$i = \frac{h}{48} \cdot b^3$$

c) Moment tromosti tanka trapeznog oblika:

$$i = \frac{h}{48} \cdot \frac{a^4 - b^4}{a - b}$$

d) Moment tromosti tanka kružnog presjeka:

$$i = 0,0491 R^4$$

Momenti tromosti površine tekućina u brodskim tankovima izraženi su u m^4 . Da bismo dobili stvarne momente tromosti, treba dobivene momente tromosti u m^4 pomnožiti specifičnom gustoćom tekućine u tankovima ρ' . Tada momente tromosti moramo izraziti u tona-metrima (t m).

4.4. Neka razmatranja o utjecaju momenta tromosti vodene linije na stabilnost broda. Iz dosadašnjeg izlaganja vidjeli smo da moment tromosti vodene linije I_B , a ovisno o njemu i metacentarski polumjer $\overline{M_0F_0}$ raste s trećom potencijom širine broda B ($I_B = \frac{L \cdot B^3}{12}$ ili $I_B = \frac{L \cdot B^3}{11,7} \cdot a^2$). Zbog toga i manja promjena širine pri projektiranju broda mnogo povećava ili smanjuje početnu stabilnost.

Teretni brodovi kad su prazni redovito imaju malu početnu stabilnost, a katkada im je stabilnost negativna. U tom slučaju moraju ukrcati vodeni balast da im se spusti težište sustava i početna stabilnost izrazito poveća. Pri tome im se poveća i površina VL , odnosno moment tromosti VL , što također povoljno utječe na stabilnost.

Kad nakrcani teretni brodovi urone do oznake nadvođa, težište sustava G redovito im se spusti, a težište depasmana F podigne, pa tada brodovi imaju povoljnu stabilnost i bez većeg povećavanja površine VL .

Površina VL i moment tromosti I_B može se smanjiti i onda kada se brod uzdužno jače naginje ili ako posrće na jakim valovima. Tada brod previše dinamično zaroni pramcem, zbog čega široki krmeni dio vodene linije izlazi iz vode. Zbog istog razloga čamci gube stabilnost i jako se nagnu na stranu ako se ljudi iz čamca odjednom premjeste na pramac.

Brzim motornim čamcima, gliserima, kakvi se danas sve više susreću, kad zaplove punom snagom, pramčani dio potpuno izađe iz vode. Zbog toga im se mnogo skрати vodena linija, a smanji moment tromosti I_B , što opet uzrokuje da se smanji stabilnost. Stoga gliseri redovito imaju izrazito širok krmeni dio vodene linije i na taj način nadoknađuju gubitak stabilnosti. Međutim, uza sve to stabilnost glisera pri brznoj vožnji nije velika, jer ako slučajno naglo skrenu s kursa, mogu se vrlo lako prevrnuti.

Metacentarski polumjer i metacentarska visina rastu razmjerno sa smanjivanjem deplasmana broda:

$$\overline{M_0 F_0} = \frac{I_B}{V}$$

Ovo smanjenje ili povećanje metacentarske visine ovisi i o vrsti tereta i njegovu smještaju na brodu.

Ovim se uvjerljivo objašnjava zašto se u onih brodova koji imaju manji gaz u odnosu prema širini B težište sustava nalazi osjetno više nad vodenom linijom. Tako se u riječnih putničkih brodova, koji katkada imaju i trokatna nadgrađa, težište sustava praznog broda (bez putnika) često nalazi na palubi broda, iako drvena nadgrađa nemaju veliku težinu. Ti brodovi su ipak vrlo stabilni, jer im je metacentarska visina od 1,5 do 2 m, i to samo zbog toga što im zbog smanjenog volumena podvodnog dijela broda mnogo naraste metacentarski polumjer $\overline{M_0 F_0}$.

Pravokutni pontoni, npr. plovne dizalice i sl., imaju razmjerno mali gaz, ali zato imaju velik moment tromosti I_B odnosno metacentarski polumjer $\overline{M_0 F_0}$. Zbog toga se na palubi pontona može ukrcati veći teret nego što je težina pontona bez opasnosti da će to smanjiti njegovu stabilnost.

Teretni brodovi imaju najbolju stabilnost (umjerena vrijednost $\overline{M_0 G_0}$) kad su normalno opterećeni, tj. kad urone do oznake nadvođa ili kada plove u balastu. Međutim, ako se brodovi pretovare, pa im se na taj način prekomjerno poveća gaz, bezuvjetno se smanjuje stabilnost broda. Ovo je vrlo jednostavno objasniti formulom $\overline{M_0 F_0} = \frac{I_B}{V}$. Naime, svako povećanje deplasmana broda ($V \cdot \varrho$) uzrok je smanjenju metacentarskog polumjera $\overline{M_0 F_0}$, a time i stabilnosti broda.

4.5. Značenje težišta vodene linije. Prema sl. 4.1. i objašnjenju datom u t. 4.1. zajednički volumen uronjenog i izronjenog klina jest $\Sigma f \cdot y \cdot \varphi$. Međutim, pri nagibu broda ukupan je uronjeni volumen nepromijenjen. Stoga su i volumeni uronjenog i izronjenog klina jednaki pa je njihov algebarski zbroj nula:

$$\Sigma f \cdot y \cdot \varphi = 0$$

Ako je umnožak dviju veličina jednak ničtici, onda jedna od njih mora biti ničtica. Budući da je φ stvarni, iako vrlo mali kut, onda $\Sigma f \cdot y$ mora biti jednak ničtici.

$\Sigma f \cdot y$ je zbroj statičkih momenata svih čestica vodene linije u odnosu prema osi OO' . Ako je zbroj svih statičkih momenata jednak ničtici, to znači da os momenta prolazi kroz težište vodene linije. Zapravo i jest tako jer težište leži u središnjici, tj. na simetrali vodene linije, a oblik je vodene linije simetričan.

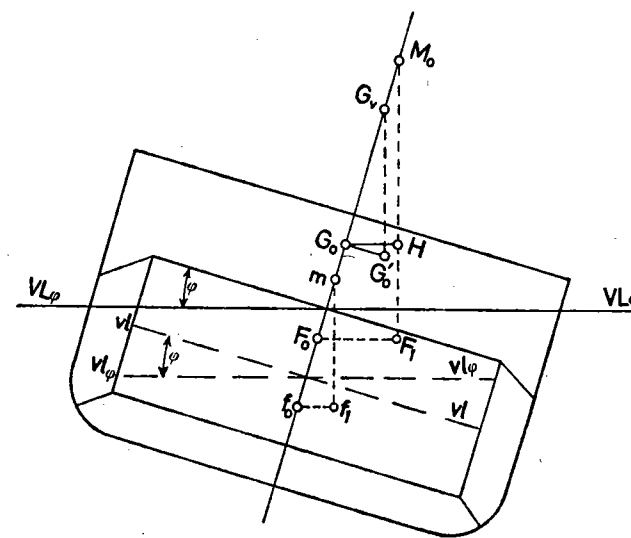
Položaj težišta vodene linije po duljini izračunava se inače pomoću Simpsonove formule.

Položaj težišta vodene linije u praksi je važan zbog toga što se približno u toj točki mora nalaziti težište tereta koji se naknadno ukrcava na brod ako se želi izbjeći da brod dobije uzdužni nagib. U suvremenih trgovačkih brodova težište konstrukcijske vodene linije (KVL) nalazi se obično iza težišta deplasmana.

4.6. Pojam slobodnih površina. Slobodnim tekućinama ili slobodnim površinama (engl. *free surface*) smatraju se nepokrivene tekućine, jer ako je prostor pun i zatvoren, na primjer palubom, tada je tekućina isto što i kruto tijelo pa njezino težište pri naginjanju broda ostaje u istoj točki. Ako tankovi goriva i vode nisu puni do vrha, tada se i gorivo i voda u takvim tankovima smatraju slobodnim površinama, jer pri ljuljanju ili posrtanju broda postaju pokretne. Slobodnom površinom smatra se i morska voda što pri prodoru ili gašenju požara uđe u brodske prostorije koje su zatvorene palubom ili u prostorije koje su nepropusno zatvorene, ako se zbog komprimiranja zraka ne mogu potpuno naplaviti.

Slobodnim površinama smatraju se žitarice i drugi tereti koji se u rasutom stanju krcaju u brodska skladišta.

Sve su slobodne površine uvijek opasne jer osjetno smanjuju početnu stabilnost broda. Stoga pomorci moraju u najopćenitijim crtama poznavati utjecaj slobodnih površina na stabilnost broda.



Sl. 4.5. Slobodne površine tekućina u brodskim tankovima

4.7. Slobodne površine i stabilnost broda. Na sl. 4.5. prikazan je brodski tank sa slobodnom tekućinom. Ostali pojmovi u vezi sa slikom jesu:

$D = V \cdot \varrho$ — masa broda zajedno sa slobodnom tekućinom,

M_0 — metacentar,

G_0 — težište sistema broda zajedno s tekućinom kada ona ne bi bila slobodna,

- G_0' — težište sustava broda sa slobodnom tekućinom,
 F_0 — težište istisnine broda,
 G_v — virtuelno (zamišljeno) težište sustava koje zapravo označuje točku do koje se smanji metacentarska visina $\overline{M_0G_0}$ zbog utjecaja slobodne površine,
 I — moment tromosti površine VL ,
 $p = v \cdot \rho'$ — masa slobodne tekućine, s tim da ρ' može biti jednaka, veća ili manja od specifične mase morske vode ρ ,
 f — težište istisnine (oblika) tekućine,
 i — moment tromosti površine tekućine,
 m — metacentar mase tekućine,
 φ — mali kut nagiba broda.

Kad se brod nagne, tekućina u tanku prelazi na nagnutu stranu sve dok joj površina ne postane vodoravna, tj. usporedna s novom vodenom linijom broda $VL\varphi$. Kad bi tekućina bila pokrivena palubom i kada pri nagninjanju ne bi mogla prelaziti i mijenjati razinu, njezino težište istisnine f koje je ujedno i težište mase ne bi se moglo pomaknuti.

U primjeru kakav je na sl. 4.5. slobodna tekućina pri nagninjanju prijeđe s vodene linije VL na $VL\varphi$. Tada se i težište istisnine f pomakne u f_1 .

Prema objašnjenju u t. 4.1. (moment tromosti VL) poznata je formula:

$$\overline{F_0F_1} = \frac{\sum f \cdot y^2 \cdot \varphi \cdot \rho}{V \cdot \rho} = \frac{I \cdot \varphi \cdot \rho}{V \cdot \rho}$$

Pomoću te formule za pomak $\overline{F_0F_1}$ po analogiji, tj. po sličnosti, izlazi da će i pomicanje težišta istisnine slobodne tekućine f_0f_1 biti:

$$\overline{f_0f_1} = \frac{i \cdot \rho' \cdot \varphi}{v \cdot \rho} = \frac{i \cdot \varphi}{v}$$

Međutim, kako se pomaklo težište tekućine, pomaklo se i težište sustava broda G_0 u G_0' . Po zakonu o polugama iz mehanike statički moment deplasmata broda D i statički moment mase tekućine u odnosu prema vertikali moraju biti međusobno jednaki. Prema tome:

$$\overline{G_0G_0'} \cdot D = \overline{f_0f_1} \cdot p$$

$$\overline{G_0G_0'} \cdot V \cdot \rho = \frac{i \cdot \varphi}{v} \cdot v \cdot \rho'$$

$$\overline{G_0G_0'} = \frac{i \cdot \varphi \cdot \rho'}{V \cdot \rho}$$

Kada tekućina ne bi bila slobodna, tj. kad bi bila nepomična, onda bi metacentarska visina broda (sl. 1.2) bila:

$$\overline{M_0G_0} = \overline{M_0F_0} - \overline{F_0G_0}$$

$\overline{M_0F_0}$ je poprečni metacentarski polumjer i prema t. 4.1. njegova vrijednost izražena je formulom $\overline{M_0F_0} = \frac{I}{V}$.

Na sl. 4.5. vidi se da su zbog premještanja G_0 u G_0' poluga stabilnosti i metacentarska visina postale manje. Metacentarska visina umanjena je za vrijednost koja odgovara udaljenosti $\overline{G_0G_v}$. Prema tome vrijednost nove, reducirane metacentarske visine $\overline{M_0G_v}$, kao posljedica slobodne površine, bit će:

$$\overline{M_0G_v} = \overline{M_0F_0} - \overline{F_0G_0} - \overline{G_0G_v} = \frac{I}{V} - \overline{F_0G_0} - \overline{G_0G_v}$$

Ako se pomak $\overline{G_0G_0'}$ pri malom kutu nagiba φ izrazi lučnom mjerom, bit će:

$$\overline{G_0G_0'} = \overline{G_0G_v} \cdot \varphi$$

$$\overline{G_0G_v} = \frac{\overline{G_0G_0'}}{\varphi} = \frac{i \cdot \varphi \cdot \rho'}{V \cdot \rho \cdot \varphi} = \frac{i \cdot \rho'}{V \cdot \rho}$$

Prema tome, reducirana metacentarska visina, uzrokovana slobodnom površinom, iznosi:

$$\overline{M_0G_v} = \frac{I}{V} - \overline{F_0G_0} - \frac{i \cdot \rho'}{V \cdot \rho}$$

Iz te formule izlazi da će se metacentarska visina zbog slobodnih površina zapravo smanjiti za vrijednost:

$$\Delta \overline{MG} = \frac{i \cdot \rho'}{V \cdot \rho}$$

Vrijednost $\Delta \overline{MG}$ naziva se korekcija metacentarske visine zbog slobodnih površina (engl. *slack reduction*). U formuli za ρ' mora se uvrstiti specifična gustoća tekućine odnosno rasutog tereta. Pri prodoru vode u brod i kad su upotrijebljeni balastni tankovi $\rho = \rho'$. Korekcija početne metacentarske visine $\overline{M_0G_0}$ zbog slobodnih površina zapravo je sastavni dio kontrole stabilnosti broda, o čemu se kasnije govori.

Budući da većina tankova na brodu ima pravokutni ili približno pravokutni oblik, formula za moment tromosti (i) prema t. 4.3. glasi:

$$i = \frac{l \cdot b^3}{12}$$

Formula $\Delta \overline{MG}$ karakteristična je zbog toga što pokazuje da samo moment tromosti slobodne površine (i) smanjuje početnu stabilnost broda, dok količina (težina) tekućine i rasutog tereta nema na nju nikakva utjecaja.

Kada je to poznato, onda je jasno zašto slobodna tekućina u odjelima dvodna, cisternama, tankovima i kaljužama broda, koja ima veliku slobodnu površinu, a relativno malu težinu, ipak znatno smanjuje stabilnost broda.

Obratno je kod dubokih tankova (engl. *deep tanks*) i bočnih tankova (engl. *side tanks*) gdje tekućina ima malu širinu površine. Štetni utjecaji slobodnih površina najbolje se i najsigurnije sprečavaju ako se smanje slobodne površine tankova i čelija dvodna, što se postiže ako se pregrade po širini i duljini. Na sličan način pregrađuju se brodska skladišta i međupalublja kada brod prevozi rasute žitarice i drugi rasuti teret.

Budući da žitarice i slični rasuti tereti za vrijeme prijevoza, osim prešipanja, što je uzrok nagibu broda, stvaraju slobodne površine koje ugrožavaju stabilnost broda, bilo je potrebno da se ovo pitanje, uz nacionalne propise pojedinih država, regulira i u međunarodnim okvirima. Stoga je Međunarodna konvencija za zaštitu ljudskih života na moru od 1974. godine u VI glavi donijela odredbe o prijevozu žitarica.¹ Te odredbe odnose se na smještaj i slaganje rasutih žitarica u skladištima, međupalublju i ostalim teretnim prostorijama broda, kako bi se spriječilo da se pomiču za vrijeme plovidbe, odnosno da se stvaraju slobodne površine.

Da bi se smanjile slobodne površine, Konvencija je uz ostale mjere propisala da se u nekim slučajevima postavljaju posebne žitne pregrade u skladištima i međupalublju (engl. *shifting boards*).

Skladište koje je potpuno ispunjeno rasutim žitom mora se i dalje napajati žitom, jer se ono za vrijeme plovidbe slegne i tako stvara slobodne površine. Napajanje se postiže s pomoću napajача (engl. *feeders*) izrađenih u obliku velikih sanduka koji za vrijeme krcanja broda ujedno omogućuju nesmetan tok žita u sve dijelove skladišta.

Kako se u napajачima za žito stvaraju slobodne površine, korekcija početne metacentarske visine zbog tih slobodnih površina u napajачima (engl. *feeders correction*) računa se po formuli:

$$\Delta \overline{MG}_t = \frac{l \cdot b^3}{5 \cdot f_s \cdot D}$$

U formuli je l duljina napajача, b širina, f_s je faktor slaganja žita, a D deplasman broda.

Problem štetnog utjecaja slobodnih površina na tankerima rješava se što većim brojem tankova, kako bi im pojedinačna površina bila manja (manji moment tromosti i), a to se postiže pregrađivanjem. Stoga su tankeri dvjema ili više uzdužnih i velikim brojem poprečnih pregrada podijeljeni u veliki broj zasebnih tankova. Tankovi se na tankerima nikada ne pune do vrha, nego se ostavi slobodan prazni prostor (engl. *ullage*) kako bi se omogućilo slobodno širenje tekućine zbog promjene temperature. Visina praznog prostora tankova ili »ullage« je na tankerima značajna vrijednost, jer se na temelju te visine određuje volumen tereta izražen u kubičnim metrima, kubičnim stopama ili barelima, budući da je svaki tank točno »kalibriran«.

¹ Prema odredbama glave VI Konvencije naziv »žito« uključuje pšenicu, kukuruz, zob, raž, ječam, rižu, grahorice i sjemenje, kao i njihove prerađevine koje se ponašaju kao i žitarice.

Kasnije se taj volumen pretvara u masu (metričke tone) na temelju izmjerene prosječne temperature u tankovima (engl. *average temperature*), zatim na temelju tzv. američke formule za gustoću tereta (tekućeg goriva) ili tzv. vrijednosti A.P.I.-Gravity (American Petroleum Institute — Gravity) i posebnih tablica. Na tankerima je ovo pretvaranje volumena u masu nužno jer se vozarina računa redovito u tonama.

Primjer

Brod ima deplasman $D = 2\,000$ t i metacentarsku visinu $\overline{M_0G_0} = 0,68$ m. Tank goriva specifične gustoće $\rho' = 0,92$ nije do vrha pun a ima dimenzije $l = 8,2$ m i $b = 4,0$ m. Koliko iznosi korekcija metacentarske visine zbog slobodne površine ($\Delta \overline{MG} = ?$) i kolika će biti nova metacentarska visina?

Rješenje

*Moment tromosti
Formule*

$$i = \frac{l \cdot b^3}{12} = \frac{8,2 \cdot 64}{12} = \frac{524,8}{12} = 43,7 \text{ m}^4$$

$$\Delta \overline{MG} = \frac{i \cdot \rho'}{D} = \frac{43,7 \cdot 0,92}{2\,000} = \frac{40,20}{2\,000} = 0,02 \text{ m}$$

$$\overline{M_0G_0} = 0,68 - 0,02 = 0,66 \text{ m}$$

Primjer

M/b »DRŽIĆ« treba da isplovi iz Montreala u Rijeku s teretom žita. Deplasman broda je $D = 19\,285$ t a metacentarska visina $\overline{M_0G_0} = 0,79$ m. Računom kontrole stabilnosti ustanovljeno je da će se na sredini puta pojaviti slobodne površine u centralnom tanku goriva br. 5, centralnom tanku goriva broj 6 i lijevom tanku pitke vode. Specifična gustoća goriva je $\rho' = 0,93$. Prema podacima iz knjige trima i stabilnosti moment tromosti i za spomenute tankove jest:

— tank broj 5	2 350 m ⁴
— tank broj 6	581 m ⁴
— tank pitke vode	120 m ⁴

Kolika će biti ukupna korekcija metacentarske visine zbog slobodnih površina na sredini puta ($\Delta \overline{MG} = ?$) i kolika će biti vrijednost nove metacentarske visine?

Rješenje

a) Za tank goriva broj 5:

$$\Delta \overline{MG} = \frac{i \cdot \rho'}{D} = \frac{2\,350 \cdot 0,93}{19\,285} = \frac{2\,186}{19\,285} = 0,11 \text{ m}$$

b) Za tank goriva broj 6:

$$\Delta \overline{MG} = \frac{i \cdot \rho'}{D} = \frac{581 \cdot 0,93}{19\,285} = \frac{540}{19\,285} = 0,03 \text{ m}$$

c) Za tank pitke vode:

$$\Delta \overline{MG} = \frac{i \cdot \rho'}{D} = \frac{120}{19\,285} = 0,01 \text{ m}$$

Ukupna korekcija $\Delta \overline{MG} = 0,15 \text{ m}$. Metacentarska visina na sredini puta bit će $\overline{M_0G_0} = 0,79 - 0,15 = 0,64 \text{ m}$.

Zbog relativno velike vrijednosti $V \cdot \rho$, što je zapravo depasman broda ($D = V \cdot \rho$), u odnosu prema momentu tromosti tekućine i , specifična gustoća ρ' obično se zanemaruje, tako da se u praksi najčešće korekcija početne metacentarske visine zbog slobodnih površina računa po formuli:

$$\Delta \overline{MG} = \frac{i}{D}$$

Vrijednost momenta tromosti i , zavisno od oblika brodskog tanka, računa se onako kako je to objašnjeno u t. 4.3. Taj posao je pomorcima olakšan jer se u knjizi stabilnosti broda redovito nalaze gotove vrijednosti za moment tromosti i za sve brodske tankove pojedinačno. U praksi, za vrijeme kontrole stabilnosti broda, potrebno je proračunatu vrijednost početne metacentarske visine $\overline{M_0G_0}$ obvezno korigirati za izračunatu vrijednost $\Delta \overline{MG}$. Pri tome se korekcija ne obavlja posebno za svaki tank, već se vrijednosti momenta tromosti i za sve tankove zbroje pa se za tako dobiveni skupni moment tromosti Σi proračuna vrijednost $\Delta \overline{MG}$. U tom slučaju korekcija metacentarske visine obavlja se po formuli:

$$\Delta \overline{MG} = \frac{\Sigma i}{D}$$

Primjer

Na temelju kontrole stabilnosti izračunato je da će linijski brod, čiji je depasman $D = 6\,180 \text{ t}$ na kraju puta imati metacentarsku visinu $\overline{M_0G_0} = 1,02 \text{ m}$. Ujedno je ustanovljeno da će brod imati na kraju puta još 180 tona goriva (teško ulje), koje je smješteno u dva tanka. Jedan tank je pravokutnog oblika čije su dimenzije: duljina $l = 12 \text{ m}$ i širina $b = 8 \text{ m}$. Drugi tank ima oblik trapeza čije su dimenzije: paralelna stranica $a = 12 \text{ m}$, paralelna stranica $b = 4 \text{ m}$ i visina $h = 20 \text{ m}$. Kakvu će stabilnost imati brod na kraju putovanja, tj. kolika će mu biti početna metacentarska visina korigirana za slobodne površine u tankovima?

Rješenje

Momenti tromosti u tankovima goriva bit će:

a) Četverokutni tank

$$i = \frac{l \cdot b^3}{12} = \frac{12 \cdot 8^3}{12} = 512 \text{ m}^4$$

b) Tank trapeznog oblika:

$$i = \frac{h}{48} \cdot \frac{a^4 - b^4}{a - b} = \frac{20}{48} \cdot \frac{12^4 - 4^4}{12 - 4} = 1\,067 \text{ m}^4$$

$$\Sigma i = 512 + 1\,067 = 1\,579 \text{ m}^4$$

Korekcija metacentarske visine zbog slobodnih površina bit će:

$$\Delta \overline{MG} = \frac{\Sigma i}{D} = \frac{1\,579}{6\,180} = 0,26 \text{ m}$$

Korigirana metacentarska visina zbog slobodnih površina bit će:

$$\overline{M_0G_1} = \overline{M_0G_0} - \Delta \overline{MG} = 1,02 - 0,26 = 0,76 \text{ m}$$

5. STABILNOST OBLIKA I STABILNOST TEŽINE

5.1. Atwoodova jednadžba stabilnosti. Veličina poluge stabilnosti \overline{GH} (sl. 5.1) zavisi od položaja težišta sustava G po visini broda, što znači da zavisi od rasporeda težina na brodu i od premještanja težišta istisnine F , a to opet znači da zavisi i od oblika broda. Na temelju toga Atwood je 1798. godine izveo svoju poznatu jednadžbu stabilnosti iz koje se može vidjeti utjecaj oblika brodskog tijela i položaja težišta sustava na stabilnost broda.

Način izvođenja Atwoodove jednadžbe objašnjen je na sl. 5.2.

Pri naginjanju broda volumen izronjenog klina jednak je volumenu uro-njenog klina, jer se ne mijenja ni deplasman ni volumen podvodnog dijela broda.

Prema pravilu iz mehanike o premještanju težišta sustava skupine ti-jela, premještanje težišta istisnine $\overline{F_0F_1}$ usporedno je s premještanjem sredi-šta klinova $\overline{NN_1}$ i među njima postoji ova zavisnost:

$$D \cdot \overline{F_0F_1} = d \cdot \overline{NN_1}$$

U prethodnoj jednadžbi d je deplasman jednog klina. Ako se veličine $\overline{F_0F_1}$ i $\overline{NN_1}$ zamijene svojim vodoravnim projekcijama, dobit će se ovaj odnos

$$D \cdot \overline{F_0H_1} = d \cdot \overline{ii_1}$$

U ovoj je jednadžbi vrijednost $d \cdot \overline{ii_1}$ vodoravni moment premještanja klinova.

Iz sl. 5.2. nadalje izlazi da se moment stabilnosti broda može prikazati i u ovom obliku:

$$St = D \cdot \overline{G_0H} = D \cdot (\overline{F_0H_1} - \overline{F_0A})$$

Iz trokuta F_0AG_0 izlazi da je: $\overline{F_0A} = \overline{F_0G_0} \cdot \sin \varphi$.

Iz formule $D \cdot \overline{F_0H_1} = d \cdot \overline{ii_1}$ izlazi da je: $\overline{F_0H_1} = \frac{d}{D} \cdot \overline{ii_1}$.

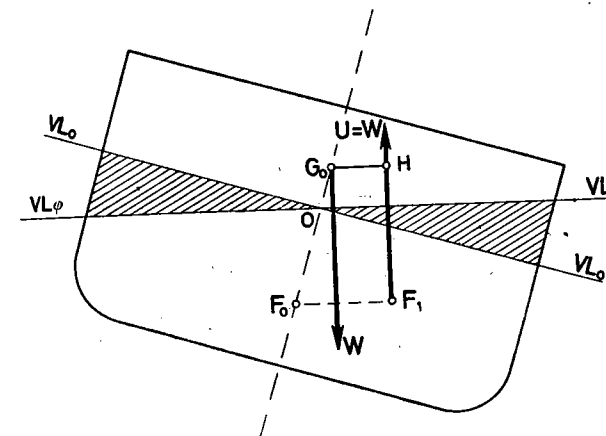
Prema tome, formula za moment stabilnosti $St = D \cdot (\overline{F_0H_1} - \overline{F_0A})$ gla-sit će:

$$St = D \cdot \left(\frac{d}{D} \cdot \overline{ii_1} - \overline{F_0G_0} \cdot \sin \varphi \right)$$

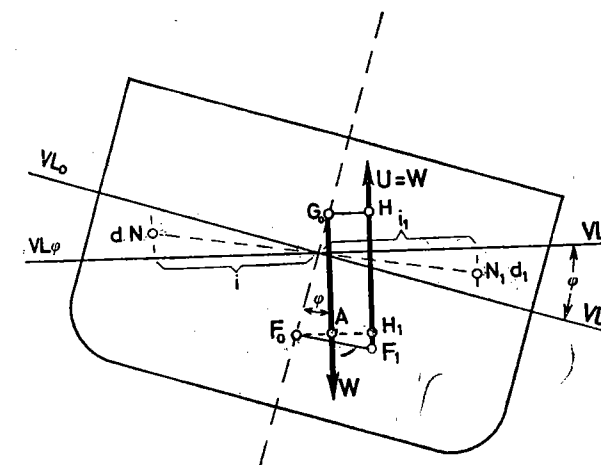
$$St = d \cdot \overline{ii_1} - D \cdot \overline{F_0G_0} \cdot \sin \varphi$$

Tako glasi Atwoodova jednadžba stabilnosti za obične trgovačke i rat-ne brodove. Međutim, uzevši u obzir i mogućnost da se u nekih brodova težište sustava G_0 nalazi ispod težišta istisnine F_0 (t. 5.2. i 5.3), općenita At-woodova jednadžba stabilnosti glasi:

$$St = d \cdot \overline{ii_1} \mp D \cdot \overline{F_0G_0} \cdot \sin \varphi$$

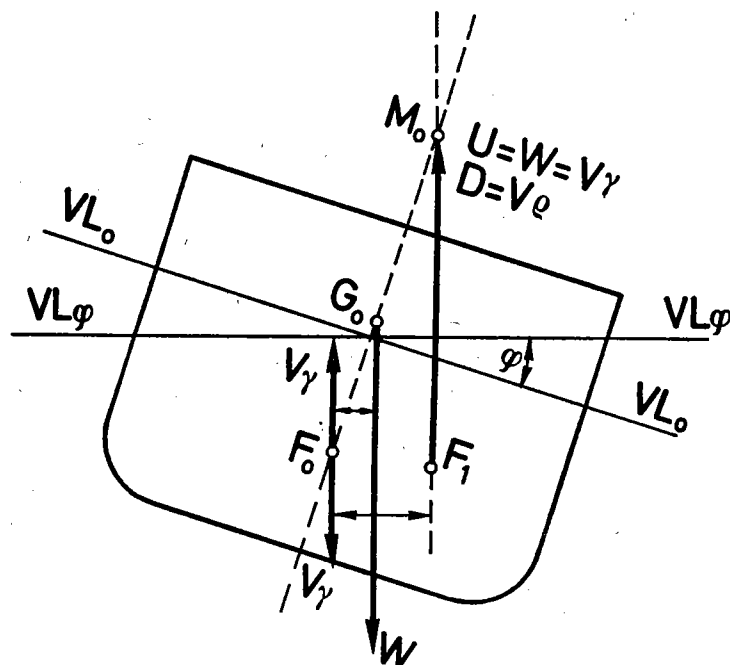


Sl. 5.1. Promjena vrijednosti poluge stabilnosti \overline{GH} u zavisnosti od rasporeda težina na brodu i od premještanja težišta istisnine



Sl. 5.2. Izvođenje Atwoodove jednadžbe

Prvi član Atwoodove jednadžbe ($d \cdot \ddot{u}_1$), koji prikazuje moment premještanja klinova, zavisi samo od oblika brodskog tijela pa se zove stabilnost oblika broda. To znači da stabilnost oblika raste ako se povećava širina broda na vodenoj liniji. Osim toga pri nagnjanju broda moment $d \cdot \ddot{u}_1$ raste s povećanjem volumena klinova. Zbog toga brodovi s malom nadvodnom visinom imaju maksimalnu stabilnost pri kutovima nagiba 20—25 stupnjeva te imaju relativno malen opseg (trajnost) stabilnosti. Brodovi s većom nadvodnom visinom, na primjer putnički brodovi, imaju maksimalan moment stabilnosti pri nagibu 40—50 stupnjeva te im je opseg stabilnosti veći.



Sl. 5.3. Objašnjenje Atwoodove jednadžbe sa fizikalnog stajališta

Drugi član Atwoodove jednadžbe zavisi samo od udaljenosti F_0G_0 , tj. od visine težišta sustava nad težištem istisnine, pa se zove stabilnost težine. U običnih trgovačkih i ratnih brodova ovaj član Atwoodove jednadžbe je negativan. Da bi se visina F_0G_0 što više smanjila, treba ili spustiti težište sustava, ili podići težište istisnine. Zbog toga razloga teretni brodovi kad plove prazni, upotrebljavaju vodeni balast (plovitba u balastu).

Značenje Atwoodove jednadžbe upravo je u tome što ona na matematički jasan način objašnjava bit stabilnosti broda. Promatrajući jednadžbu, na prvi je pogled jasno da će stabilnost u običnih brodova biti veća što je drugi član

manji (manje se odbija od $d \cdot \ddot{u}_1$). Međutim, da bi drugi član bio manji, treba da udaljenost F_0G_0 bude manja. Ona će biti manja kada se težište sustava spušta prema dnu broda, a iz prijašnjeg je izlaganja o početnoj stabilnosti poznato da sa spuštanjem težišta sustava raste metacentarska visina M_0G_0 , a time i stabilnost broda.

Atwoodova jednadžba može se izraziti i na drugi način. Prema Atwoodu formula za moment početne stabilnosti $M_{st0} = D \cdot \overline{M_0G_0} \cdot \sin \varphi$ može se rastaviti na dva dijela i predočiti ovako:

$$M_{st0} = D \cdot (\overline{M_0F_0} - \overline{F_0G_0}) \cdot \sin \varphi$$

Prvi član ove formule je stabilnost oblika, a drugi stabilnost težine. Ova formula nam omogućuje da Atwoodovu jednadžbu objasnimo i sa fizikalnog stajališta. Prema sl. 5.3. u težištu istisnine uspravnog broda nanesimo dvije jednake sile protivnog smjera i veličine $V \cdot \gamma$. Budući da se te dvije sile poništavaju, time nije poremećena ravnoteža broda. Kao što se na slici vidi, sila uzgona $U = V \cdot \gamma$, koja ima svoje ishodište u težištu istisnine nagnutog broda F_1 , i sila težine $W = V \cdot \gamma$, koja ima svoje ishodište u težištu sustava broda G_0 , čine zajedno sa dvjema silama koje djeluju u težištu istisnine uspravnog broda F_0 dva para sila. Prvi par sila veličine $D \cdot \overline{M_0F_0} \cdot \sin \varphi$, nazvan stabilnošću oblika, djeluje suprotno prekretnim momentima i uspravlja brod. Drugi par sila veličine $D \cdot \overline{F_0G_0} \cdot \sin \varphi$, nazvan stabilnošću težine, djeluje u suprotnom smjeru i potpomaže djelovanje prekretnih sila, pa samim tim smanjuje stabilnost broda, zbog čega je uvršten u gornju formulu s negativnim predznakom.

Iz prvog dijela formule koji čini stabilnost oblika vidimo da položaj metacentra ima veliko značenje za stabilnost broda, i što god je on na simetriali smješten više, brod će biti stabilniji. To ujedno znači da položaj metacentra M ovisi isključivo o obliku broda, zbog čega se i nastoji podvodnom dijelu broda dati takav oblik da pri nagibu broda metacentri leže što je moguće više.

Položaj težišta sustava G , koji je sastavni dio drugog dijela Atwoodove jednadžbe, ovisi samo o smještaju i rasporedu težina na brodu. Radi postizanja što veće stabilnosti treba da položaj težišta sustava bude što niži (udaljenost F_0G_0 što manja), zbog čega se načelno teški tereti krcaju na dnu brodskih skladišta, a lakši u međupalublju i na palubi.

Vrijednost je Atwoodove jednadžbe stabilnosti i u tome što ona omogućuje i olakšava proučavanje stabilnosti pri velikim kutovima nagiba broda.

5.2. Stabilnost jedrilica i jahta na jedra. Jedrilicama i jahtama na jedra, koje imaju olovnu balastnu kobilicu, težište je sustava ispod težišta istisnine, zbog toga im je stabilnost težine pozitivna. Prema tome, Atwoodova jednadžba za jedrilice i jahte na jedra s balastnom kobilicom glasi:

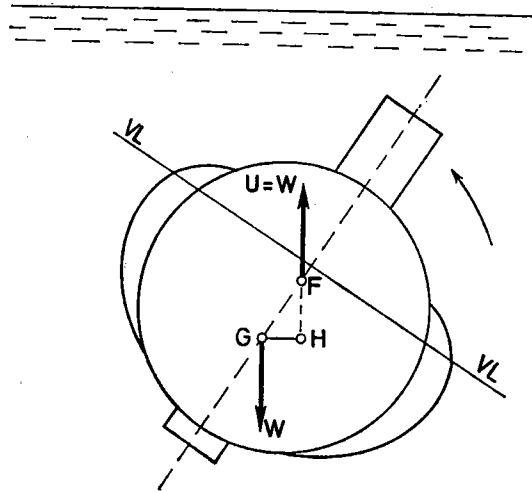
$$St = d \cdot \ddot{u}_1 + D \cdot \overline{F_0G_0} \cdot \sin \varphi$$

Formula jasno pokazuje da jedrilice i jahte na jedra s balastnom kobili-
com imaju veliku stabilnost. Osim toga, velike jedrilice (krstaši) i jahte na
jedra imaju izrazito velik volumen nadvodnog dijela broda, što znači da im
je i stabilnost oblika velika. Zbog spomenutog razloga moment stabilnosti
ovih brodova raste sve do kuta nagiba od 90 stupnjeva.

5.3. Stabilnost zaronjene podmornice. Za izračunavanje stabilnosti zaronjenih
podmornica ne dolazi u obzir prvi član Atwoodove jednadžbe jer pri nagibu
podmornice nema promjene oblika, nema, dakle, uronjenog i izronjenog
klina. Zbog toga drugi član jednadžbe mora biti pozitivan, a to znači da se
težište sustava zaronjene podmornice mora nalaziti ispod težišta istisnine
(sl. 5.4). Stabilnost zaronjene podmornice, prema tome, izražena je formulom:

$$St = D \cdot \overline{F_0 G_0} \cdot \sin \varphi$$

Formula pokazuje da moment stabilnosti zaronjene podmornice raste
točno do kuta nagiba 90 stupnjeva ($\sin 90^\circ = 1$), a završava pri 180 ($\sin 180^\circ =$
 $= 0$).



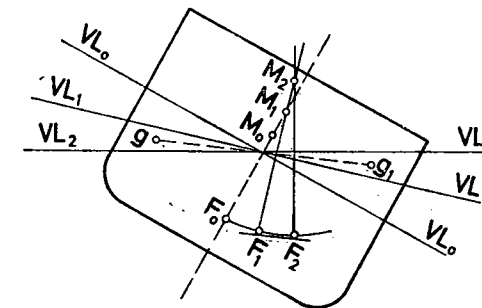
Sl. 5.4. Izvođenje Atwoodove jednadžbe za zaronjenu podmornicu

6. STABILNOST PRI VELIKIM KUTOVIMA NAGIBA BRODA

6.1. Predočavanje rezultata proračuna statičke stabilnosti. Sva dosadašnja
razmatranja odnosila su se uglavnom na probleme stabilnosti ograničene na
male početne kutove nagiba broda, približno do najviše 12 stupnjeva. Za
početnu stabilnost karakterističan je nepromijenjen položaj metacentra iznad
osnovke, dok je veličina \overline{GH} koja predstavlja polugu uspravljujućeg momenta
stabilnosti, što drži brod u ravnom položaju, određena formulom $\overline{GH} =$
 $= \overline{M_0 G_0} \cdot \sin \varphi$. Početna stabilnost, dakle, zavisi od metacentarske visine i
sinusa kuta nagiba, a metacentarska visina $\overline{M_0 G_0}$ mjerilo je te stabilnosti.

Kad bi metacentarska visina $\overline{M_0 G_0}$ bila konstantna u svim nagibima,
stabilnost broda s pozitivnom $\overline{M_0 G_0}$ bila bi najveća pri kutu nagiba od 90
stupnjeva, a stabilnost bi postojala sve do blizu 180 stupnjeva. Međutim,
u zbilji se događa drukčije.

Pri nagibanju broda težište istisnine kreće se u stranu nagiba broda
putanjom koju nazivamo **krivuljom F** ili **krivuljom težišta istisnine**. Ako
zamislamo dva susjedna nagnuta položaja VL_1 i VL_2 , premještanje težišta
uzgona $\overline{F_1 F_2}$ bit će paralelno premještanju središta klinova gg_1 (sl. 6.1). Kada
se VL_1 približava VL_2 , tada se gg_1 podudara s nagnutom vodenom linijom
 VL_2 i $\overline{F_1 F_2}$ postane tangenta krivulje uzgona F i usporedna vodenoj liniji VL_2 .
Pravac sile povučen iz težišta istisnine F_2 jest **okomica** (normala) na krivulju
 F , jer je taj pravac okomit na tangentu $\overline{F_1 F_2}$ koja je usporedna s vodenom
linijom VL_2 .

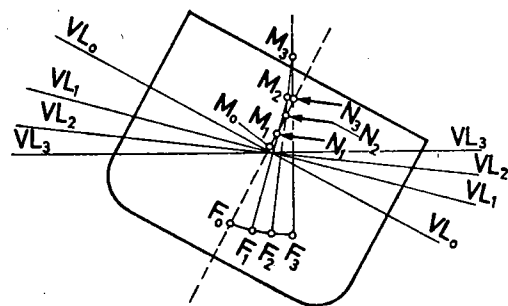


Sl. 6.1. Krivulja težišta istisnine

Metacentri nastaju kao sjecišta smjerova uzgona sa simetralnom ravninom
broda. Budući da uzgon djeluje uvijek okomito na pripadajuću vodenom liniju
koja je usporedna s tangentom na krivulju težišta istisnine, vidjeli smo da

su smjerovi uzgona, zapravo, normale na F krivulju. Dva susjedna smjera uzgona sijeku se, dakle, u središtu zakrivljenosti F krivulje, dok se polumjeri zakrivljenosti nazivaju metacentarski polumjeri. Tako se pravci sile uzgona jedan s drugim u točkama M_1, M_2, M_3 itd. i te točke su trenutni polovi oko kojih se zakreće brod pri nagibu i zovu se pravi metacentri (sl. 6.2). Krivulja dobivena spajanjem točaka M_1, M_2, M_3 itd. zove se metacentarska krivulja (engl. *metacentric curve*) ili metacentarska evoluta.

Prema tome, nova definicija metacentra M jest da je on središte zakrivljenosti F krivulje, odnosno sjecište smjerova uzgona dviju susjednih vodenih linija koje određuju istu istisninu, jer zatvaraju beskonačno mali kut. Napomenimo da ova definicija uključuje i početni metacentar M_0 . Pa ipak smo zadržali i nadalje pojam metacentra kao sjecišta smjera uzgona i simetralne ravnine broda, jer ta točka M_0 ulazi u vrlo važnu formulu za moment početne stabilnosti po kojoj je $M_{st0} = D \cdot M_0G_0 \cdot \sin \varphi$. Stoga su na sl. 6.2. te točke nazvane N_1, N_2, N_3 itd. i zovu se prividni metacentri za razliku od pravih metacentara M_1, M_2, M_3 itd. Ovo ujedno znači da pri većim kutovima nagiba broda metacentarska visina MG mijenja svoju vrijednost i zbog toga ne može biti mjerilo stabilnosti, kao što je to slučaj kod početne stabilnosti. Prema tome, pri većim kutovima nagiba kao mjerilo stabilnosti služi poluga stabilnosti \overline{GH} .



Sl. 6.2. Metacentarska krivulja

Kao što se poznavanje početne stabilnosti sastoji u poznavanju početne metacentarske visine M_0G_0 , tako se poznavanje stabilnosti pri nagnjanju broda preko 12 stupnjeva temelji na poznavanju poluge \overline{GH} u njezinoj izvornoj vrijednosti za bilo koji deplasman broda i za sve kutove nagiba od 12 do 90 stupnjeva.

Iz prijašnjeg je izlaganja poznato da je opseg ili trajnost stabilnosti ono područje nagnjanja broda kojem je poluga \overline{GH} pozitivna. Za teretne se brodove smatra da brodovi imaju dobru stabilnost ako pri nagibu od 30 stupnjeva poluga \overline{GH} iznosi barem 200 mm, a opseg stabilnosti najmanje 60 stupnjeva.

6.2. Izračunavanje vrijednosti poluge stabilnosti \overline{GH} . Za proračunavanje vrijednosti poluge stabilnosti \overline{GH} primjenjuju se uglavnom dvije metode:

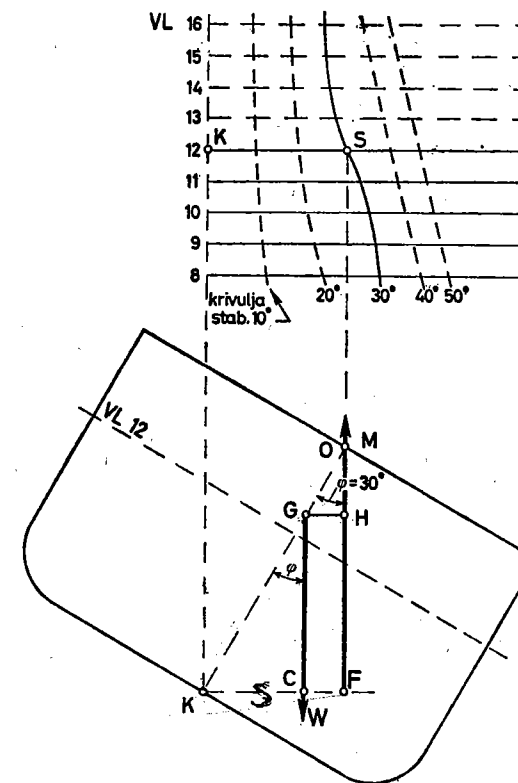
- 1) Metoda predočavanja s pomoću jedne koordinate.
- 2) Metoda predočavanja s pomoću dviju koordinata.

Zadržat ćemo se na opisu metode predočavanja s pomoću jedne koordinate.

Kako se na sl. 6.3. vidi, vrijednost poluge \overline{GH} za jedan određeni deplasman, kome odgovara određena vodena linija, i za jedan određeni kut nagiba broda računa se kao $\overline{GH} = \overline{KF} - \overline{KC}$, odnosno $\overline{GH} = \overline{KF} - \overline{KG} \cdot \sin \varphi$. Udaljenost \overline{KF} obično se označuje sa S , pa se prema tome poluga \overline{GH} računa:

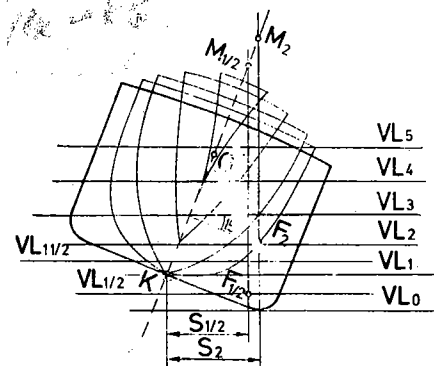
$$\overline{GH} = S - \overline{KG} \cdot \sin \varphi$$

Vrijednost S je dakle udaljenost smjera sile uzgona od točke K koja označuje osnovku, tj. gornji rub kobilice u središnjici broda. Udaljenost smjera sile uzgona ne može se mjeriti u odnosu prema točki G jer se, kako



Sl. 6.3. Proračun vrijednosti poluge stabilnosti broda \overline{GH}

će se vidjeti, vrijednosti S moraju računati za tipična stanja tereta nekog broda, tj. za nekoliko tipičnih deplasmana, a po potrebi i za bilo koji deplasman broda, pa se točka G kao težište sustava broda ne može smatrati konstantnom.



Sl. 6.4. Proračun vrijednosti S za razne deplasmane i isti kut nagiba

Služeći se ovom metodom izračunavanja, brodograditelji obično koriste **nacrt rebara** (sl. 6.4.) koji je kao sastavni dio brodskih nacрта obično rađen u točno određenom mjerilu (npr. 1:100). Kao što se na slici vidi, u nacrtu se rebara ucrtala snop usporednih vodenih linija pod nekim odabranim kutem φ , pa se za svaku od tih vodenih linija (svaka vodena linija odgovara jednom određenom gazu broda, tj. jednom određenom volumenu podvodnog dijela broda, odnosno određenom deplasmanu broda) odredi udaljenost smjera uzgona od osi koja prolazi kroz kobilicu broda K ili, točnije, odredi se udaljenost smjera uzgona od ravnine koja prolazi kroz točku K , a okomita je na dotičnu vodenu liniju. Na taj se način dobiju udaljenosti S kao funkcije volumena, odnosno deplasmana za jedan konstantni kut nagiba broda. Budući da se vrijednost S , a na temelju toga i vrijednost poluge \overline{GH} , mora odrediti za nekoliko deplasmana broda, potrebno je prethodno računom centracije za svaki deplasman broda (određeno stanje tereta) odrediti vrijednost \overline{KG} , a na temelju toga i vrijednost početne metacentarske visine kao $M_0G_0 = KM_0 - \overline{KG}_0$. Sjecište okomice iz točke M_0 sa nagnutom vodenom linijom daje nam točku uzgona F za dotičnu vodenu liniju, odnosno za dotični volumen podvodnog dijela broda. S obzirom na mjerilo nacрта rebara, na taj način planimetrijski dobijemo vrijednost $\overline{KF} = S$.

U praksi se najprije u nacrtu rebara ucrtala snop vodenih linija pod kutem $\varphi = 15^\circ$ i tako odredi S za volumene ucrtanih vodenih linija, a zatim se takav isti postupak ponovi s vodenim linijama nagnutim pod kutem od $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ i 90° i odrede odgovarajuće vrijednosti za S .

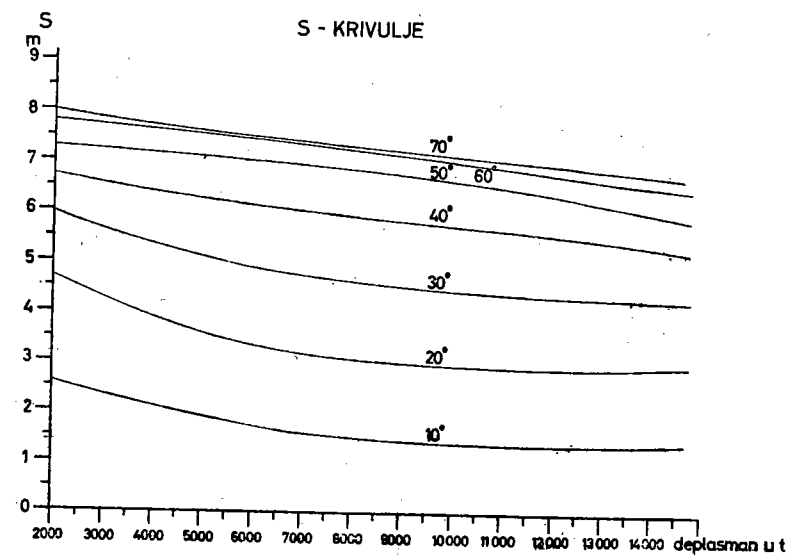
Tako dobivene vrijednosti za S predočujemo krivuljama u tzv. **dijagramu »S«** krivulja (sl. 6.5). Svaku takvu krivulju nazivamo **pantokarena izoklina** (grčki naziv koji znači krivulja za sve deplasmane i jedan te isti nagib broda), a sam dijagram nazivamo još i **dijagram pantokarena**.

Dijagram pantokarena u praksi koristimo pri konstruiranju krivulje stabilnosti broda, kako je to objašnjeno u slijedećoj točki. Pri tome moramo za određeni deplasman broda i kutove nagiba izračunati vrijednost poluge \overline{GH} kao $\overline{GH} = S - \overline{KG} \cdot \sin \varphi$.

S točke na apscisi, koja označuje odgovarajući deplasman broda, povučemo okomicu što presijeca krivulju pantokarena, a vodoravna linija od tog sjecišta do ordinata pokazuje nam vrijednost S u metrima, koju očitamo na ordinati dijagrama (sl. 6.5).

Druga metoda kojom se određuje vrijednost poluge stabilnosti \overline{GH} jest ona po kojoj se poluga \overline{GH} određuje za jednu određenu istisninu, ali različite kutove nagiba. To postizemo dijagramom koji sadrži krivulje **izokarene pantokline** (grčki naziv koji znači krivulja za jednu određenu istisninu, ali različite kutove nagiba). U isti dijagram, u kojemu smo ucrtali linije »S« u ovisnosti o kutu nagiba φ , ucrtamo krivulju $\overline{KG} \cdot \sin \varphi$ (sl. 6.6). Kako je $\overline{GH} = S - \overline{KG} \cdot \sin \varphi$, kada za neki određeni kut nagiba φ odbijemo od ordinate, koja predstavlja vrijednost »S«, dio koji predstavlja vrijednost $\overline{KG} \cdot \sin \varphi$, dobivamo odgovarajuću polugu \overline{GH} . Kada ovu razliku ordinata ucrtamo od osnovke za nekoliko kutova nagiba pa tako dobivene točke spojimo, dobivamo krivulju poluga \overline{GH} u zavisnosti od kutova nagiba.

6.3. Krivulja stabilnosti i njezino značenje. Britanski znanstvenik *Edward James Reed* (1830—1906) krajem prošlog stoljeća prvi je konstruirao krivulju stabilnosti broda i pri tome pomorce upozorio da je za potpunu procjenu

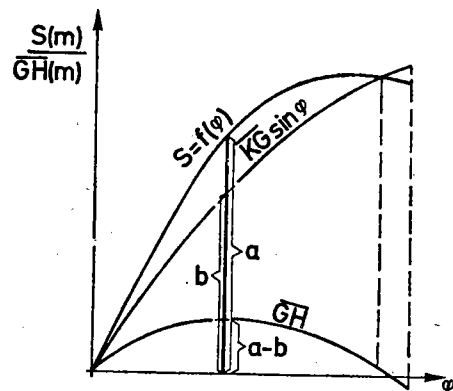


Sl. 6.5. Dijagram »S« krivulja (Dijagram pantokarena izoklina)

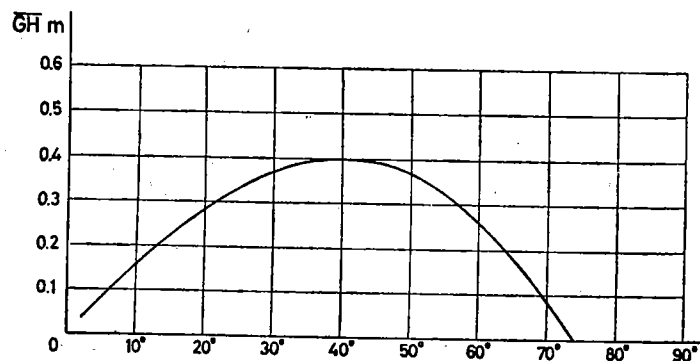
stabilnosti broda, uz početnu metacentarsku visinu važno poznavati i krivulju stabilnosti broda. Stoga se krivulja stabilnosti broda često naziva i Reedov dijagram.

Za konstrukciju krivulje stabilnosti broda mjerodavna je opća formula za moment statičke stabilnosti broda:

$$M_{st} = D \cdot \overline{GH}$$



Sl. 6.6. Proračunavanje vrijednosti poluge \overline{GH} za određenu istisninu, ali različite kutove nagiba



Sl. 6.7. Konstrukcija krivulje statičke stabilnosti broda

To ujedno znači da krivulja stabilnosti broda odgovara samo jednom deplasmanu, što kod trgovačkih brodova znači samo jednom opterećenju, odnosno samo jednom stanju tereta. Međutim, u praksi se kod trgovačkih brodova te krivulje obično crtaju za pet-šest tipičnih stanja tereta, tj. tipičnih deplasmana broda. Krivulje se unose u brodski dokument koji se zove knjiga trima i stabilnosti broda (engl. *Trim and Stability Book*). Svaka od tih krivulja može se do neke granice upotrebljavati i za druga slična stanja tereta. Među

ovih pet-šest krivulja stabilnosti, koje odgovaraju karakterističnim deplasmanima trgovačkog broda, svakako moraju biti krivulje stabilnosti za laki deplasman (engl. *light ship*) i krivulja stabilnosti za plovidbu u balastu (engl. *ballast condition*). Ostali deplasmani odnose se na karakteristične terete za taj brod.

Pri konstrukciji krivulje stabilnosti postupa se ovako:

a) Na temelju izmjenog, odnosno izračunatog srednjeg gaza iz dijagramnog lista ili tablice deplasmana izvadi se deplasman broda.

b) S fako dobivenim deplasmanom iz dijagrama »S« krivulja proračunaju se vrijednosti \overline{GH} poluge za svakih 10 stupnjeva, počevši od 0° do 90° i s pomoću tih vrijednosti nacrtaju se krivulja stabilnosti.

c) Krivulja stabilnosti crta se tako da se najprije nacrtaju mreža na bazi pravokutnoga koordinatnoga sustava. Za ishodište se uzima lijevi donji kut. Od ishodišta se na apscisu nanese vrijednosti kutova nagiba u intervalima od 10 stupnjeva, a na ordinati \overline{GH} poluge u decimetrima. Nakon toga se vrhovi ordinata spoje krivuljarom i tako dobije krivulja statičke stabilnosti (engl. *curve of statical stability*) za određeni deplasman broda (sl. 6.7).

Poluga u teretnih brodova, pa prema tome i moment stabilnosti, ima maksimalnu vrijednost pri nagibu broda od 35 do 40 stupnjeva, što približno odgovara situaciji kada rub gornje palube zahvaća vodu (maksimalna stabilnost broda). Stabilnost se dalje postupno smanjuje i traje približno do kuta nagiba 60 do 70 stupnjeva, kada vrijednost poluge stabilnosti postane ništica. Udaljenost od ishodišta dijagrama do drugog sjecišta krivulje s apscisom zove se opseg stabilnosti i izražava se brojem stupnjeva pri kojem poluga \overline{GH} ponovo postane ništica.

Ovdje je vrlo važno zapamtiti da je onaj kut pri kojem krivulja stabilnosti dosegne svoj maksimum, odnosno poluga stabilnosti svoju najveću vrijednost, granica do koje se brod može nagnuti bez opasnosti da će se prevrnuti.

Poznati finski brodograđevni stručnjak profesor J. Rahola proučio je značajke stabilnosti većeg broja do tada prevrnutih brodova.² J. Rahola je dokazao da se i nakon katastrofe nekog broda, na osnovi brodske dokumentacije (kapacitetni plan, dijagramni list, knjiga stabilnosti i dr.) i poznatog plana tereta, može matematički točno utvrditi prava istina o razlozima katastrofe.

Na temelju takve iscrpne analize J. Rahola je utvrdio matematički točnu granicu sigurnosti za sve brodove, a osobito one manje od 3 000 t nosivosti.

Norme granične sigurnosti stabilnosti po J. Raholi predstavljaju minimalne uvjete stabilnosti trgovačkih brodova i one su neslužbeno prihvaćene u nizu zemalja svijeta. Stoga su te norme u neku ruku međunarodni minimum sigurnosti trgovačkih brodova. Sažeto rečeno, norme granične sigurnosti stabilnosti broda po Raholi jesu:

1) Opseg stabilnosti ne smije biti manji od 60°.

2) Maksimalna poluga stabilnosti \overline{GH} ne smije nastati prije 35° bočnog nagiba.

² Poznato je njegovo djelo: »The judging of the stability of ships and the determination of the minimum amount of stability«, Helsinki, 1939.

3) Poluga stabilnosti \overline{GH} kod 30° bočnog nagiba ne smije biti manja od 0,20 m.

4) Poluga stabilnosti \overline{GH} kod 20° bočnog nagiba ne smije biti manja od 0,14 m.

6.4. Tangenta na krivulju stabilnosti broda i njezino značenje. Krivulja stabilnosti pokazuje vrijednost poluga \overline{GH} onako kako su proračunate. Ako se poluga \overline{GH} zamijeni metacentarskom formulom $\overline{GH} = \overline{M_0G_0} \cdot \sin \varphi$, onda se za male kuteve nagiba s dovoljno točnosti može smatrati da $\sin \varphi$ raste razmjerno s duljinom kružnog luka (arcus)³ kuta φ pa je:

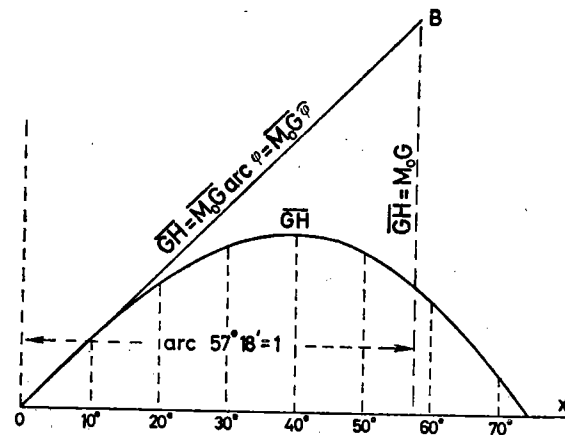
$$\sin \varphi = \widehat{\varphi}$$

Na temelju toga može se i formula za početnu stabilnost $M_{st0} = D \cdot \overline{M_0G_0} \cdot \sin \varphi$ pojednostavniti, pa imamo:

$$M_{st0} = D \cdot \overline{M_0G_0} \cdot \widehat{\varphi}$$

Prema tome, formula za polugu stabilnosti glasi sada: $\overline{G_0H} = \overline{M_0G_0} \cdot \widehat{\varphi}$, pa je za lučnu vrijednost $\widehat{\varphi} = 1$, što odgovara kutu $\varphi = 57,3^\circ$, $\overline{G_0H} = \overline{M_0G_0}$.

Konstatacija da je $\overline{GH} = \overline{M_0G_0}$ primjenjuje se s dovoljno točnosti za konstrukciju tangente krivulje \overline{GH} , odnosno krivulje stabilnosti, pogotovo što se tangenta ucrtava u početnom dijelu krivulje kad se vrijednosti $\overline{M_0G_0} \widehat{\varphi}$ podudaraju s proračunatim vrijednostima za \overline{GH} .



Sl. 6.8. Konstrukcija tangente na krivulju stabilnosti

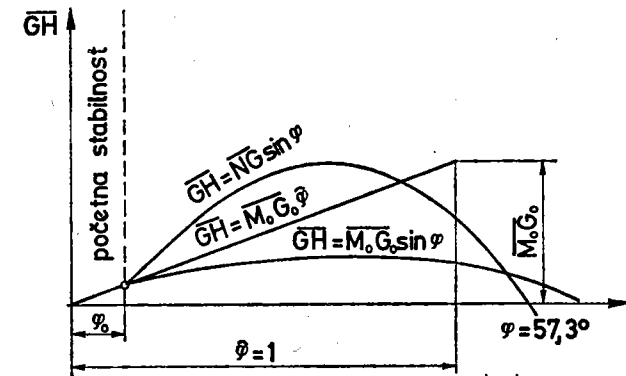
Tangenta se konstruira tako da se na apscisi krivulje stabilnosti (apscisa OX na sl. 6.8) pri kutu $\varphi = 57,3^\circ$ naznači kao ordinata vrijednost $\overline{GH} = \overline{M_0G_0}$

³ Za duljinu luka ponekad se upotrebljava kratica »arc« prema latinskom »arcus«, što znači »luk«.

i kroz točke O i B povuče pravac koji je tangenta krivulje stabilnosti. Vrijednost početne metacentarske visine $\overline{M_0G_0}$ mora se prije proračunati i odgovara, kao i sama krivulja stabilnosti, određenom stanju tereta, dakle određenom deplasmanu broda. Vrijednost $\overline{M_0G_0}$ unosi se pri kutu $\varphi = 57,3^\circ$ u mjerilu za \overline{GH} .

Praktična vrijednost tangente krivulje stabilnosti je u tome što ona služi kao kontrola oblika krivulje stabilnosti pri polaznoj točki O. Osim toga kut između tangente OB i osi apscise OX služi kao ocjena vrijednosti početne stabilnosti broda. Tako, na primjer, kada krivulja stabilnosti ima na početku vrlo zaobljen oblik, to znači da brod ima veću metacentarsku visinu $\overline{M_0G_0}$, dakle veću stabilnost. Stoga sve krivulje stabilnosti broda redovito dobivaju i svoje tangente.

Kada je riječ o tangenti na krivulju stabilnosti broda, napomenimo da se, u stvari, radi o tangenti povučenoj u ishodištu na krivulje poluga stabilnosti $\overline{GH} = \overline{M_0G_0} \cdot \sin \varphi$ i $\overline{GH} = \overline{NG} \cdot \sin \varphi$ (sl. 6.9).



Sl. 6.9. Tangenta u ishodištu na krivulje poluga stabilnosti \overline{GH}

6.5. Razni slučajevi krivulje stabilnosti broda. Pojedine vrste trgovačkih i ratnih brodova, s obzirom na veličinu nadvodnog dijela broda i oblik broda, imaju svoje karakteristične krivulje stabilnosti.

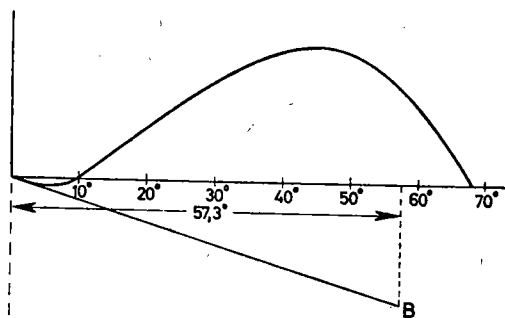
Kad su teretni brodovi potpuno nakrcani, stabilnost često može rasti do kuta nagiba od 50 stupnjeva unatoč tome što brodovi imaju umjerenu nadvodnu visinu. Pojava se objašnjava time što ovi brodovi, kad su potpuno nakrcani, ali bez palubnog tereta, imaju malu vrijednost stabilnosti težine $\overline{F_0G_0} \cdot D \cdot \sin \varphi$ (t. 5.1, drugi član Atwoodove jednadžbe), jer im je težište sustava dosta nisko pa se time kompenzira relativno mala nadvodna visina.

Kad su teretni brodovi prazni i bez vodenog balasta, često imaju negativnu početnu stabilnost (negativna vrijednost poluge \overline{GH}) sve do kuta nagiba 10° i više. Međutim, kad se ovi brodovi malo više nagnu, zbog većeg volumena nadvodnog dijela nad lakom vodenom linijom, član $d \cdot \ddot{u}$ mnogo nadmaši drugi član Atwoodove jednadžbe pa brodovi ponovo dobiju pozitivnu

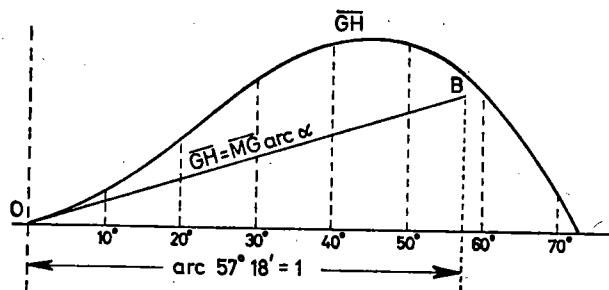
stabilnost do dosta velikog kuta nagiba. Stoga je krivulja stabilnosti tih brodova onakva kako to pokazuje sl. 6.10.

Putnički brodovi s relativno visokim nadvodnim dijelom često imaju vrlo umjerenu početnu stabilnost ($\overline{M_0G_0} = 0,35 - 0,45 \text{ m}$) zbog laganog ljujanja broda, kako bi se putnicima omogućilo što udobnije putovanje. U tom slučaju krivulja stabilnosti na početku je ulegnuta (sl. 6.11). Kasnije, kada stabilnost oblika $d \cdot i_i$ postane veća, stabilnost broda se osjetno poboljša i brod postane potpuno siguran za plovidbu, sposoban da izdrži i mnogo veća naginjanja.

Brodovi s malom nadvodnom visinom, npr. riječni brodovi, imaju maksimalnu stabilnost (najveća vrijednost poluge \overline{GH}) pri kutovima nagiba 20—25 stupnjeva, a trajnost njihove stabilnosti iznosi 45—50 stupnjeva. Pa ipak ti brodovi često imaju veliku početnu stabilnost tako da im tangenta krivulje stabilnosti u ishodištu koordinatnog sustava (točka O) zatvara veći kut s apscisom. To, naravno, stvara pogrešnu sliku o velikoj sigurnosti spomenutih brodova u plovidbi.



Sl. 6.10. Krivulja stabilnosti trgovačkih brodova bez tereta i balasta



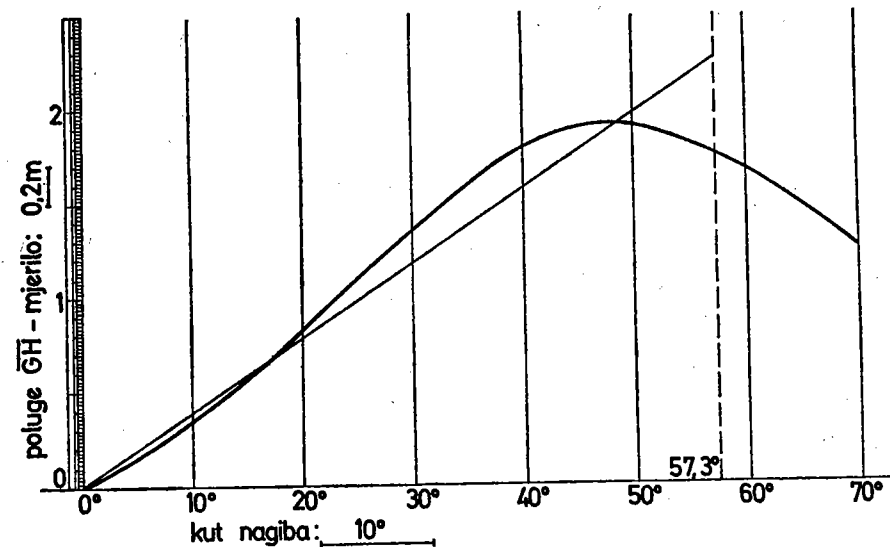
Sl. 6.11. Krivulja stabilnosti putničkih brodova

U brodova s većom nadvodnom visinom i većim volumenom nadvodnog dijela, npr. u jahta i velikih putničkih brodova, a od ratnih brodova u krstarica i razarača, moment stabilnosti često raste do kuta nagiba 50—60 stupnjeva, a trajnost stabilnosti do 80 ili čak do 90 stupnjeva nagiba.

Teretni brodovi imaju najveću stabilnost kada plove u balastu, tj. kad su bez tereta s nakrcanim vodenim balastom u dvodnu. Slika 6.12. pokazuje

slučaj 6 (plovidba u balastu - brod u odlasku)

istisnina $D = 8159 \text{ t}$
 težište sustava od osnovke $\overline{KG} = 6,43 \text{ m}$
 metacentarska visina $\overline{M_0G_0} = 2,24 \text{ m}$



Sl. 6.12. Krivulja stabilnosti linijskog broda pri plovidbi u balastu

krivulju stabilnosti linijskog broda za plovidbe u balastu. Deplasman broda je $D = 8159$ tona, udaljenost težišta sustava od osnovke je $\overline{KG} = 6,43 \text{ m}$, a početna metacentarska visina je $\overline{M_0G_0} = 2,24 \text{ m}$.

U pomorskoj praksi često se dogodi da brodovi s ukrcanim palubnim teretom, osobito drvom, imaju negativnu početnu stabilnost. To se najčešće događa zimi, u sjevernim širinama, kad složeno drvo na palubi pokisne ili na nj napada snijeg ili mu se po površini uhvati led. Takvi brodovi lako se primijete, jer već u luci plivaju nagnuti, a kad je početna metacentarska visina $\overline{M_0G_0}$ negativna, brod će se nagnuti iako na nj ne djeluje nikakav nagibni moment. Međutim, kad ti brodovi isplove na otvoreno more i počnu se ljujati, ponovo dobivaju pri većim kutovima nagiba pozitivnu stabilnost. Takve primjere vrlo lijepo objašnjava moment tromosti vodene linije, objašnjen u t. 4.1. i 4.2, samo što ovdje treba posebno naglasiti da stabilnost postane ponovo pozitivna jedino ako brod ima ravne ili približno ravne bokove, što je u suvremenih teretnih brodova gotovo redovito. Naime, kad se brod s ravnim bokovima počne ljujati, u nagnutom položaju poveća mu se površina vodene linije, a time i moment tromosti I . Istovremeno s povećanjem momenta tromosti I metacentar se u nagnutom stanju također pomakne prema gore, jer

je $\overline{M_0G_0} = \frac{I}{V}$. Budući da se tako metacentar ponovo pomakne iznad težišta sustava G , stabilnost broda ponovo postaje pozitivna. Krivulja stabilnosti za takav slučaj slična je onoj na sl. 6.10.

Primjer

Konstruirajte krivulju stabilnosti i tangentu na krivulju za M/b »ALKA« kad plovi u balastu.

Potrebni elementi za proračun jesu: $D = 8\,216\text{ t}$, $\overline{KG}_0 = 6,43\text{ m}$ i $\overline{M}_0G_0 = 1,99\text{ m}$. Iz dijagrama »S« krivulja proizlazi da su vrijednosti »S« za odgovarajuće kutove nagiba ove:

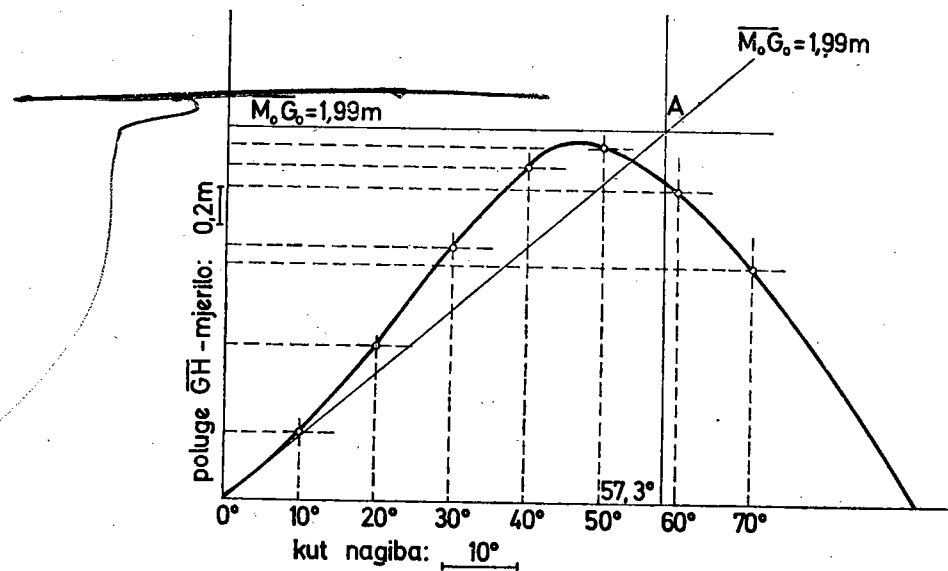
$\varphi = 10^\circ$	$S = 1,48\text{ m}$
$\varphi = 20^\circ$	$S = 3,02\text{ m}$
$\varphi = 30^\circ$	$S = 4,57\text{ m}$
$\varphi = 40^\circ$	$S = 5,91\text{ m}$
$\varphi = 50^\circ$	$S = 6,82\text{ m}$
$\varphi = 60^\circ$	$S = 7,23\text{ m}$
$\varphi = 70^\circ$	$S = 7,29\text{ m}$

Rješenje

PRORAČUN \overline{GH} POLUGA

Kut nagiba φ	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
S	1,48	3,02	4,57	5,91	6,82	7,23	7,29
$\sin \varphi$	0,173 65	0,342 02	0,500 00	0,642 79	0,766 04	0,866 03	0,939 69
$\overline{KG} \cdot \sin \varphi$	1,12	2,20	3,22	4,13	4,93	5,57	6,04
$\overline{GH} = S - \overline{KG} \cdot \sin \varphi$	0,36	0,82	1,35	1,78	1,89	1,66	1,25

Konstrukciju zadane krivulje stabiliteta zajedno s tangentom pokazuje sl. 6.13.



Sl. 6.13. Konstrukcija krivulje stabilnosti linijskog broda M/b »ALKA« za plovidbu u balastu prema primjeru u t. 6.5.

PITANJA

1. Kada se javlja poprečna stabilnost broda?
2. Kako se dijeli poprečna stabilnost broda?
3. Što je početna stabilnost broda i u čemu je njezino značenje?
4. Što je početna metacentarska visina i kada kažemo da je ona pozitivna?
5. Što je poprečni metacentarski polumjer?
6. Što služi kao mjerilo, odnosno kao pokazatelj, početne stabilnosti broda?
7. Što je moment početne stabilnosti broda?
8. Kako glasi i kakvo značenje ima formula za moment početne stabilnosti broda?
9. Na presjeku glavnog rebra nagnutog broda prikazite grafički situaciju početne stabilnosti broda sa svim njezinim elementima!
10. Koliko iznose prosječne vrijednosti početne metacentarske visine za putničke i teretne brodove?
11. Kad je brod u indiferentnoj, a kad u labilnoj ravnoteži?
12. Koja je svrha pokusa naginjanja broda i kako se on obavlja?
13. Kako se određuje kut nagiba broda pri premještanju tereta u poprečnom smjeru broda?
14. Kako se odnosi metacentarska visina i period ljuljanja broda?
15. Kako vertikalno premještanje tereta utječe na stabilnost broda i kako se tada računa korekcija početne metacentarske visine?
16. Kako utječe ukrcavanje ili iskrcavanje tereta na stabilnost broda i kako se tada računa korekcija početne metacentarske visine?
17. Na čemu se osniva proračunavanje momenta tromosti površine vodene linije?
18. Kako se izvodi formula za moment tromosti površine vodene linije?
19. U kakvu su međusobnom odnosu metacentarski polumjer početne stabilnosti i moment tromosti vodene linije?
20. Po kojoj se formuli računa moment tromosti vodene linije pravokutnih pontona?
21. Kako glasi formula za približno proračunavanje momenta tromosti površine vodenih linija trgovačkih i ratnih brodova?
22. Kad se javlja moment tromosti površine tekućina u brodskim tankovima i od čega zavisi njegova veličina?
23. Kako glasi formula za proračunavanje momenta tromosti površine tekućine u brodskim tankovima pravokutnog i kvadratnog oblika?
24. Kako glasi formula za proračunavanje momenta tromosti površine tekućine u brodskim tankovima trapeznog, trokutnog i kružnog oblika?
25. Zašto os momenta po kojoj se računa moment tromosti površine vodene linije prolazi kroz težište vodene linije?
26. Zašto je pomorcima potrebno poznavati položaj težišta vodene linije?
27. Što su slobodne površine i kako one utječu na stabilnost broda?
28. Koje se konstrukcijske protumjere poduzimaju na brodovima radi suzbijanja štetnog utjecaja slobodnih površina?
29. Koji brodski tereti stvaraju slobodne površine?
30. Kako glasi formula za korekciju početne metacentarske visine zbog utjecaja slobodnih površina i što ona pokazuje?
31. Kada se u pomorskoj praksi obavlja korekcija početne metacentarske visine zbog utjecaja slobodnih površina i kako se ona obavlja?
32. Kako se obavlja korekcija početne metacentarske visine zbog slobodnih površina u napajacima za žito?
33. Što je stabilnost oblika, a što stabilnost težine i tko je prvi te pojmove objasnio?
34. Kako se izvodi Atwoodova jednadžba stabilnosti i što ona objašnjava?
35. Kako glasi Atwoodova jednadžba za jedrilice i jahte, a kako za zaronjene podmornice?
36. Koje su glavne značajke stabilnosti pri velikim kutovima nagiba broda?
37. Što pokazuje krivulja stabilnosti broda i kako se ona konstruira?
38. Što je trajnost ili opseg stabilnosti, a što maksimalna stabilnost broda?
39. Kako se izračunavaju vrijednosti poluge stabilnosti \overline{GH} ?
40. Što je dijagram »S« krivulja ili dijagram pantokarena?
41. Kakvo značenje ima tangenta krivulje stabilnosti broda i kako se ona konstruira?
42. Nabrojite i objasnite najtipičnije slučajeve krivulje stabilnosti broda!

ZADACI

1. Deplasman teretnog broda je 8216 t i odgovara plovidbi u balastu sa 100% brodskih zaliha. Za vrijeme pokusa naginjanja broda teret mase $p = 90$ t premješta se na daljinu $b = 12,3$ m. Izmjereni kut nagiba bio je $\varphi = 4^\circ$. Izračunajte metacentarsku visinu broda $\overline{M_0G_0}$!
2. Pri pokusu naginjanja broda olovni uteg obješen o konac dug 8 m otklonio se na stranu nagiba za vrijednost 0,15 m. Koliki je kut nagiba φ ?
3. Deplasman putničkog broda je $D = 350$ t, a metacentarska visina $\overline{M_0G_0} = 0,85$ m. Koliko će se brod nagnuti ako se teret mase $p = 12$ t premjesti u smjeru širine broda na udaljenost 5,8 m?
4. Računom provjerite stabilnost linijskog teretnjaka pokusom nagiba. Deplasman broda je $D = 10\,370$ t, a dimenzije broda su: $L = 133,0$ m, $B = 19,3$ m i $T = 6,0$ m. Teret s pomoću kojeg će se obaviti pokus nagiba smješten je na gornjoj palubi u sredini, s obje strane broda i masa mu je $2p = 120$ t. Daljina premještanja tereta s jednog boka na drugi je $b = 10$ m. Pri premještanju tereta $p = 60$ t na daljinu $b = 10$ m, otklon viska s olovnim utegom bio je $a = 16$ cm (0,16 m), a visina viska je $d = 5,2$ m. Provjerite stabilnost broda tako što ćete izračunati vrijednost početne metacentarske visine ($\overline{M_0G_0} = ?$)
5. Linijski brod ima dimenzije: $L = 133$ m, $B = 19,3$ m i $T = 7,1$ m. Deplasman broda je $D = 12\,734$ t, a početna metacentarska visina $\overline{M_0G_0} = 0,72$ m. Na gornjoj palubi broda naknadno su ukrcane dvije dizel-motorne lokomotive ukupne mase $p = 186$ tona, a njihovo skupno težište udaljeno je od težišta sustava broda za vrijednost $h = 5,8$ m. Izračunajte koliko će ukrcane lokomotive na palubi smanjiti stabilnost broda ($\overline{G_0G_1} = ?$) i kolika će biti vrijednost nove metacentarske visine ($\overline{M_0G_1} = ?$).
6. Teretni brod je nakon završenog krcanja tereta imao dimenzije: $L = 148$ m, $B = 21,8$ m, $T = 9,3$ m i deplasman $D = 15\,380$ t. Nakon završenog krcanja tereta obavljena je kontrola stabilnosti broda pa je ustanovljeno da je težište sustava nakrcanog broda udaljeno od kobilice za vrijednost $\overline{KG_0} = 7,61$ m i da je početna metacentarska visina broda $\overline{M_0G_0} = 1,29$ m. Izračunajte koliko će se smanjiti stabilnost broda ($\overline{G_0G_1} = ?$) i kolika će biti nova vrijednost početne metacentarske visine ($\overline{M_0G_1} = ?$), ako se na palubi broda ukrca dodatni teret mase $p = 600$ t, a skupno težište tog palubnog tereta udaljeno je od kobilice 14,45 m.
7. Pravokutni ponton ima dimenzije: $L = 18$ m, $B = 10$ m i $T = 1$ m. Koliki je poprečni metacentarski polumjer pontona $\overline{M_0F_0}$?
8. Teretni brod ima dimenzije: $L = 153,0$ m, $B = 20,5$ m, $T = 8,8$ m, i deplasman $D = 20\,427$ t, a koeficijent punoće vodene linije $\alpha = 0,80$. Izračunajte poprečni metacentarski polumjer broda ($\overline{M_0F_0} = ?$).
9. Tegljač ima ove konstrukcijske podatke: $L = 30,8$ m, $B = 6,7$ m, $T = 3,0$ m, $D = 314$ t, a koeficijent $\alpha = 0,81$. Koliki je njegov poprečni metacentarski polumjer $\overline{M_0F_0}$?
10. Tramper čija je ukupna nosivost $Nu = 10\,700$ t, a deplasman $D = 15\,850$ t imao je nakon završenog krcanja tereta metacentarsku visinu $\overline{M_0G_0} = 1,4$ m. U dvodnu trampera nalaze se ovi tankovi za gorivo odnosno pitku vodu:
 - jedan pravokutni tank teškog ulja čije su dimenzije: duljina $l = 23$ m i širina $b = 10$ m;
 - dva pravokutna tanka teškog ulja čije su dimenzije: duljina $l = 15$ m i širina $b = 10$ m;
 - jedan tank teškog ulja koji ima oblik trapeza čije su dimenzije: usporedna stranica $a = 15$ m, usporedna stranica $b = 5$ m i visina $h = 18$ m;
 - dva pravokutna tanka plinskog ulja čije su dimenzije: duljina $l = 25$ m i širina $b = 5$ m;

— dva trokutna tanka pitke vode čije su dimenzije: baza $b = 4$ m i visina $h = 13$ m. Izračunajte koliko će slobodne površine u ovim tankovima smanjiti stabilnost broda ($\Delta \overline{MG} = ?$) i koliko će iznositi nova vrijednost metacentarske visine ($\overline{M_0G_1} = ?$).

11. Nacrtajte krivulje stabilnosti i tangentu na krivulju stabilnosti za teretni brod kome je deplasman $D = 12\,920$ t, a metacentarska visina $\overline{M_0G_0} = 1,12$ m ako su vrijednosti poluge \overline{GH} za pojedine kutove nagiba:

10°	0,21 m
20°	0,48 m
30°	0,81 m
40°	0,93 m
50°	0,82 m
60°	0,56 m
70°	0,00 m

12. Konstruirajte krivulju stabilnosti i tangentu na krivulju za M/b »ALKA« za brod u polasku (departure) nakrcan s homogenim teretom u skladištima i međupalubiju i 50% zaliha. Potrebni elementi za proračunavanje jesu: $D = 12\,920$ t, $\overline{KG_0} = 7,46$ m, $\overline{M_0G_0} = 0,77$ m i gaz broda $T = 7,22$ m. Iz dijagrama »S« krivulja proizlazi da su vrijednosti »S« za odgovarajuće kutove nagiba ovi:

$\varphi = 10^\circ$	$S = 1,44$ m
$\varphi = 20^\circ$	$S = 2,91$ m
$\varphi = 30^\circ$	$S = 4,37$ m
$\varphi = 40^\circ$	$S = 5,50$ m
$\varphi = 50^\circ$	$S = 6,27$ m
$\varphi = 60^\circ$	$S = 6,72$ m
$\varphi = 70^\circ$	$S = 6,91$ m

7. UZDUŽNA STABILNOST BRODA

Sredstve
5/2
11

7.1. Pojam uzdužne stabilnosti broda. Uzdužna stabilnost broda javlja se kad se brod naginje oko svoje poprečne osi pri uzdužnom naginjanju broda.

Pri uzdužnom naginjanju broda težište istisnine F također se pomakne na stranu nagiba, tj. prema pramcu ili prema krmi. Tamo gdje pravac sile uzgona siječe poprečnu ravninu koja prolazi kroz težište sustava broda, pojavi se metacentarska točka. Ta se točka naziva **uzdužni metacentar** (M_L). Prema tome, udaljenost $M_L G$ **uzdužna je metacentarska visina**. Pri uzdužnom naginjanju broda kut nagiba označujemo sa ψ (grčko slovo psi), a on je relativno malen, zbog čega otpada razmatranje uzdužne stabilnosti pri velikim kutovima nagiba broda. Moment uzdužne stabilnosti izražavamo formulom:

$$St_L = D \cdot M_L G \cdot \sin \psi$$

Ovo je formula za moment uzdužne stabilnosti. Na temelju ove formule zaključujemo da je i pri uzdužnoj stabilnosti uzdužna metacentarska visina $M_L G$ pokazatelj stabilnosti. Međutim, vrijednost ove uzdužne metacentarske visine redovito je vrlo velika, pa i u putničkih i u teretnih brodova znade ponekad biti veća od duljine broda. Jasno nam je da zbog tako velike brojčane vrijednosti uzdužne metacentarske visine, ona nije pogodna za međusobnu poredbu uzdužne stabilnosti brodova. Osim toga velika vrijednost uzdužne metacentarske visine ostvaruje i veliki moment uzdužne stabilnosti broda, tako da djelovanje vjetera malo utječe na uzdužna nagibanja broda. Ovo možemo objasniti i na temelju Atwoodove jednadžbe, jer velika uzdužna stabilnost nastaje zbog većeg momenta premještanja klinova. Stoga nešto veća uzdužna nagibanja obično nastaju zbog ukrcavanja ili premještanja tereta ili se, javljaju dinamično pri posrtanju na visokim valovima uzburkanog mora.

Naginjanja broda u uzdužnom smjeru izražavaju se **trimom** ili **ukupnom promjenom trima**, jer oni točnije pokazuju položaj broda u uzdužnom smjeru nego mala vrijednost kuta nagiba ψ .

Kako je uzdužna metacentarska visina $M_L G$ numerički pokazatelj uzdužne stabilnosti broda, ona se, kako ćemo vidjeti, koristi pri proračunavanju trima i ukupne promjene trima. Trim i ukupna promjena trima značajne su vrijednosti u pomorskoj praksi. Trim (t) je razlika između gazova na pramcu i krmi izražena u metrima, dok je promjena trima mjera koja pokazuje koliko se prijašnji trim promijenio. **Ukupna promjena trima** (u) jest zbroj povećanja utonuća jednog kraja broda i smanjenja utonuća drugog kraja. Ako se ta promjena na pramcu označi sa n , a na krmi sa k , tada će ukupna promjena trima izražena u metrima biti:

$$u = n + k$$

Za brod koji na pramcu više gazi nego na krmi kaže se da je **pretežan**, dok se razlika između pramčanog i srednjeg gaza zove **pretega**.

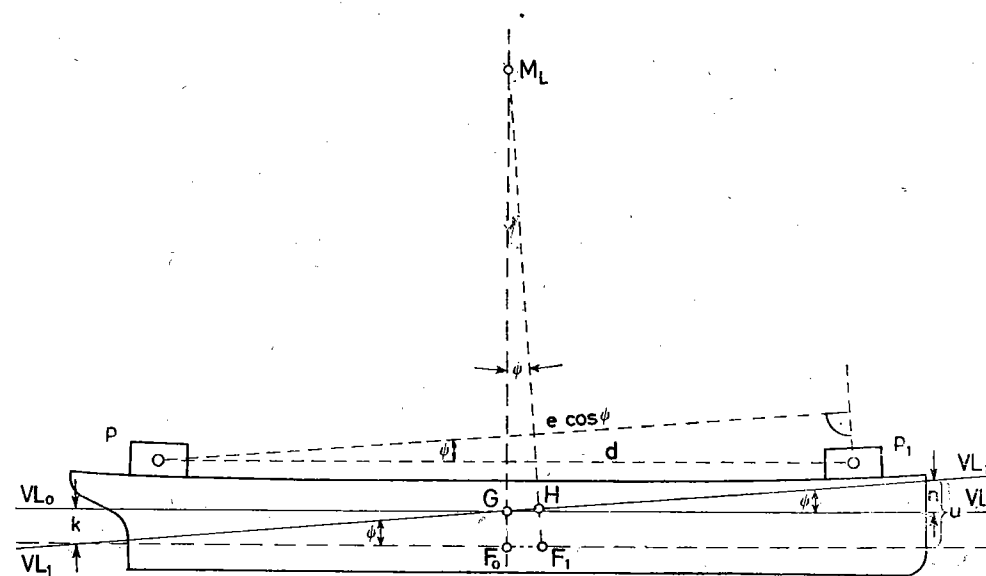
Brod koji gazi na krmi više nego na pramcu **zatežan** je, a razlika između gaza na krmi i srednjeg gaza zove se **zatega**.

Ovdje je potrebno napomenuti da trim broda obično dobiva i svoj predznak. Kad brod više gazi na pramcu nego na krmi, trim dobiva predznak plus (+). Obratno, kad je gaz na krmi veći, predznak trima je minus (-). Iako je brod građen da pliva na konstrukcijskoj vodenoj liniji, a i sve njegove geometrijske vrijednosti su na toj osnovi proračunate, u praksi se dopušta da brod ima manji krmeni trim. Naime, pri manjem krmenom trimu brod bolje drži kurs u plovidbi, kormilo nešto bolje sluša, a i djelotvornost vijka (propelera) je veća jer radi u dubljoj vodi. Iako nema nekih propisanih norma koliki treba da bude krmeni trim, one se ipak određuju iskustvom. Tako se, na primjer, smatra da teretni brod od približno 10 000 t nosivosti može imati krmeni trim 0,3 do 0,4 m.

7.2. Izračunavanje ukupne promjene trima. Vidjeli smo da uzdužni nagibi broda nastaju zbog ukrcavanja, iskrcavanja ili premještanja tereta, zatim zbog poplave odjela na krajevima broda ili se javljaju dinamično zbog posrtanja broda na valovima.

Proračunavanje ukupne promjene trima uzrokovane premještanjem tereta objašnjeno je na sl. 7.1. Kad je brod već jednom nakrcan, trim nije potrebno posebno izračunavati jer se on dobije jednostavno kao razlika gaza na pramcu i krmi broda.

Na sl. 7.1. objašnjava se promjena trima uzrokovana premještanjem tereta mase p na daljinu d u smjeru uzdužnice broda (od krme prema pramcu).



Sl. 7.1. Proračun ukupne promjene trima i kuta uzdužnog naginjanja broda

Prema zakonu o ravnoteži nekog sustava koji zahtijeva jednakost momenta $M = 0$, statički moment deplasmana D i statički moment mase p s obzirom na vertikalnu \overline{GM}_L bit će međusobno jednaki:

$$p \cdot d \cdot \cos \psi = D \cdot \overline{GH}_L = D \cdot \overline{M}_L G \cdot \sin \psi$$

$$\frac{\sin \psi}{\cos \psi} = \operatorname{tg} \psi = \frac{p \cdot d}{D \cdot \overline{M}_L G}$$

U prethodnom slučaju $p \cdot d$ je moment uzrokovan premještanjem tereta po duljini broda, tj. moment koji naginje brod u uzdužnom smjeru.

Iz sl. 7.1. nadalje izlazi da je $\operatorname{tg} \psi = \frac{u}{L}$, prema tome:

$$\frac{u}{L} = \frac{p \cdot d}{D \cdot \overline{M}_L G}$$

$$u = \frac{p \cdot d \cdot L}{D \cdot \overline{M}_L G}$$

Pomoću prethodne formule može se brzo izračunati ukupna promjena trima koja nastaje pri premještanju tereta na brodu. Kako je pri uzdužnoj stabilnosti udaljenost težišta sustava G od težišta istisnine F malena u odnosu prema duljini $\overline{M}_L G$, u praksi se obično uzima da je metacentarska visina $\overline{M}_L G$ jednaka uzdužnom metacentarskom polumjeru $\overline{M}_L F$, koji se lako izvadi iz dijagramnog lista broda, a označuje se često kao R .

Promatrajući sliku 7.1. vidimo da volumeni, pa prema tome i momenti uronjenog i izronjenog klina između vodenih linija VL_0 i VL_1 , moraju biti jednaki, jer se za vrijeme naginjanja istisnina broda ne mijenja. Iz toga zaključujemo da se vodene linije, koje međusobno zatvaraju mali kut ψ , sijeku u svom težištu. Budući da su volumeni uronjenog i izronjenog klina jednaki, zaključujemo da su i statički momenti površina vodenih linija za uronjeni i izronjeni dio broda jednaki s obzirom na os u kojoj se sijeku vodene linije, a jasno je da ta os prolazi kroz težišta vodenih linija.

Kada je težište vodene linije točno u sredini broda, tj. na glavnom rebru, tada je krmeni dio duljine broda L_k jednak pramčanom dijelu duljine broda L_n (sl. 7.2). Tada je lako izračunati koliko od proračunate ukupne promjene trima otpada na pramac, a koliko na krmu.

Primjer

Brod ima: $L = 130$ m, $D = 4380$ t, $R = 225$ m, a težište vodene linije točno u sredini broda. Teret od 35,5 t treba premjestiti od pramca prema krmu na daljinu od 95 m. Kolika je promjena trima na pramcu (n) i na krmu (k)?

Rješenje

$$\bar{u} = \frac{p \cdot d \cdot L}{D \cdot \overline{M}_L G} = \frac{35,5 \cdot 95,0 \cdot 130}{4380 \cdot 225} = 0,44 \text{ m}$$

$$n = k = \frac{u}{2} = \frac{0,44}{2} = 0,22 \text{ m}$$

Budući da se u ovom primjeru teret premješta od pramca prema krmu, jasno je da će se dosadašnji gaz na krmu povećati za 0,22 m, a gaz na pramcu smanjiti za 0,22 m.

Ako težište vodene linije nije u sredini broda (sl. 7.3), tada se proračun promjene gaza na pramcu (n) i na krmu (k) računa ovako:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{u}{L} = \frac{n}{L_n} = \frac{k}{L_k}$$

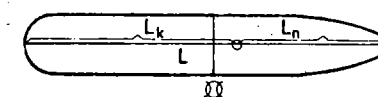
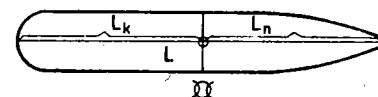
$$\frac{u}{L} = \frac{n}{L_n}$$

$$\frac{u}{L} = \frac{k}{L_k}$$

iz čega nadalje slijedi da je:

$$n = u \cdot \frac{L_n}{L}$$

$$k = u \cdot \frac{L_k}{L}$$



Sl. 7.2. Proračunavanje promjene gaza na pramcu i na krmu iz ukupne promjene trima kad je težište vodene linije u sredini broda

Sl. 7.3. Proračunavanje promjene gaza na pramcu i na krmu iz ukupne promjene trima kad težište vodene linije nije u sredini broda

Primjer

Brod ima: $L = 150$ m, $D = 18\,400$ t, $R = 184$ m, a težište je vodene linije 9 m ispred glavnog rebra broda. Teret od 120 t treba premjestiti od krme prema pramcu na daljinu od 98 m. Kolika je promjena trima na pramcu (n) i na krmi (k)?

Rješenje

$$u = \frac{p \cdot d \cdot L}{D \cdot \overline{M_L G}} = \frac{120 \cdot 98 \cdot 150}{18\,400 \cdot 184} = 0,53 \text{ m}$$

$$n = u \cdot \frac{L_n}{L} = 0,53 \cdot \frac{66}{150} = 0,23 \text{ m}$$

$$k = u \cdot \frac{L_k}{L} = 0,53 \cdot \frac{84}{150} = 0,30 \text{ m}$$

Za određivanje kuta nagiba broda (ψ) pri uzdužnom premještanju tereta vrijedi formula koja je izvedena u t. 7.2. i objašnjena na sl. 7.1. Ta formula glasi:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{p \cdot d}{D \cdot \overline{M_L G}}$$

U formuli je p masa tereta u tonama, d daljina premještanja tereta u metrima, D deplasman broda u tonama, a $\overline{M_L G}$ uzdužna metacentarska visina u metrima. Za $\overline{M_L G}$ se s dovoljno točnosti redovito uzima da je $\overline{M_L G} = \overline{M_L F}$, a to je uzdužni metacentarski polumjer, često označen i kao R , a dobiva se iz dijagramnog lista broda.

7.3. Jedinični moment trima. Moment koji uzrokuje promjenu trima broda za jedan metar značajna je vrijednost koja služi za proračunavanje u vezi s uzdužnom stabilnošću i trimom, a označuje se sa M_x . Taj moment naziva se jedinični moment trima, a proračunava se po formuli izvedenoj na temelju poznatih formula za kut trima $\operatorname{tg} \psi$, objašnjenih u t. 7.2.

Iz onoga što je izneseno u t. 7.2. izlazi da je kut pri uzdužnom nagibu broda koji je uzrokovan i pomicanjem težina:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{p \cdot d}{D \cdot \overline{M_L G}}$$

Nadalje, objašnjeno je da je kut trima $\operatorname{tg} \psi$ jednak kvocijentu ukupne promjene trima (u) i duljine broda (L):

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

Ako se sada umjesto $\operatorname{tg} \psi$ stavi $\frac{u}{L}$ dobije se:

$$\frac{u}{L} = \frac{p \cdot d}{D \cdot \overline{M_L G}}$$

Izlazi da je za promjenu trima u potreban moment:

$$p \cdot d = \frac{u \cdot D \cdot \overline{M_L G}}{L}$$

Međutim, da bi se trim promijenio za 1 m ($u = 1$), potreban je jedinični moment trima:

$$M_x = p \cdot d = \frac{D \cdot \overline{M_L G}}{L}$$

Jedinični moment trima za razne deplasmane (srednje gazove) broda, proračunat na temelju spomenute formule, nalazi se u dijagramnom listu broda kao krivulja jediničnog momenta trima za razliku gaza 1 m.

7.4. Proračun trima. Trim broda, kao što je već objašnjeno, jest razlika gazova na pramcu i krmi, a izazvan je momentom trima (engl. *trimming moment*). Ravnoteža broda ovisi o odnosu sile uzgona i težine broda, tj. o međusobnom položaju težišta istisnine F i težišta sustava G kao hvatišta spomenutih dviju sila. Takva ravnoteža postiže se kad su ove dvije sile u ravnoteži, tj. jednake i protivnog smjera, i kada djeluju na istoj vertikali. Pri ukrcavanju tereta dolazi do poremećaja ravnoteže, jer težište sustava broda mijenja svoj položaj, osim kad se težište ukrcanog tereta poklapa s težištem sustava broda. Radi uspostavljanja ravnoteže mora i težište istisnine promijeniti svoj položaj pa se premješta na okomicu spuštenu na odgovarajuću trenutnu vodenu liniju, ispod težišta sustava broda. Znamo da se pri ukrcavanju tereta istisnina broda povećava, a pri iskrcavanju istisnina se smanjuje. Promjena istisnine broda, a s tim i promjena gazova, prouzrokuju promjenu trima, koju izaziva moment trima izražen ovom formulom:

$$M_t = (D \pm p) \cdot l$$

gdje je l vodoravna udaljenost težišta sustava G_0 prije ukrcavanja ili iskrcavanja tereta i novog težišta sustava G_1 .

Kada treba unaprijed izračunati trim broda na temelju sastavljenog plana tereta, tj. prije krcanja tereta, što pomorci u svojoj praksi često moraju obaviti, tada se moment trima računa prema formuli:

$$M_t = D \cdot l$$

U ovom se slučaju poluga trima l računa kao horizontalna udaljenost težišta istisnine od težišta sustava, mjerena na uzdužnici broda te je izražena formulom:

$$l = x_G - x_F$$

x_G je udaljenost težišta sustava od glavnog rebra, a x_F udaljenost težišta istisnine od glavnog rebra. Koordinata x_G ima predznak plus (+) ako je težište sustava ispred glavnog rebra (prema pramcu), a predznak minus (-) ako je iza glavnog rebra (prema krmi). Koordinate x_F i x_G mogu se mjeriti i od krmene okomice, što je u biti svejedno. Naravno, za x_G tada otpadaju predznaci.

Ako se moment trima $D \cdot l$ podijeli jediničnim momentom trima za razliku gaza 1 m, dobit će se trim broda (t) u metrima:

$$t = \frac{D \cdot l}{M_x}$$

Kad je brod nakrcan teretom, jasno je samo po sebi da trim broda nije potrebno proračunavati nikakvom formulom, jer se može jednostavno odrediti nakon očitavanja gazova na pramcu i krmi broda. Međutim, kad se želi trim unaprijed proračunati na temelju sastavljenog plana tereta ili kad ga je potrebno unaprijed odrediti za neku luku u koju će brod uploviti nakon većeg utroška brodskih zaliha, onda se mora izračunati pomoću gornje formule. Postupak izračunavanja trima detaljno je objašnjen u t. 10.3.3.

7.5. Dijagram promjene trima. Kada se želi trim potpuno eliminirati, to se može postići premještanjem tereta. Daljina d u metrima na koju treba premjestiti teret poznate mase p u tonama radi poništenja trima t , računa se po formuli:

$$d = \frac{t \cdot M_x}{p}$$

Obratno, ako je poznata udaljenost d u metrima na koju treba premjestiti teret nepoznate mase p , tada se količina tereta p računa po formuli:

$$p = \frac{t \cdot M_x}{d}$$

M_x je, kao što je poznato, jedinični moment trima za razliku gaza 1 m u morskoj vodi i za odgovarajući srednji gaz lako se i brzo izvadi iz dijagramnog lista broda. Spomenute dvije formule vrlo su važne za pomorce, jer pomoću njih mogu brzo rješavati sve probleme trima broda.

Do neke granice trim se može smanjiti i punjenjem balastnih tankova na krajevima broda, čemu služe pramčani trim-tank (engl. *fore peak*), i krmni trim-tank (engl. *after peak*). Stoga je i u našoj pomorskoj terminologiji usvojeno da se ti tankovi često nazivaju pikovima (npr. krmni pik i pramčani pik).

Primjer.

Trim broda je $1,84$ m, a jedinični moment trima $21\,850$ t m. Koliko tona tereta (p) treba premjestiti iz skladišta broj 1 na pramcu u skladište broj 5 na krmi broda na daljinu $d = 100$ m da trim broda bude ništica ($t = 0$)?

Rješenje

$$p = \frac{t \cdot M_x}{d} = \frac{1,84 \cdot 21\,850}{100} = 402,040 \text{ t}$$

Primjer

Gaz na pramcu broda je $T_p = 8$ m 42 cm, gaz na krmi $T_k = 7$ m 12 cm, a jedinični moment trima $M_x = 21\,500$ tm. Koliki je trim broda (t) i na koju daljinu (d) treba s pramca prema krmi premjestiti 300 tona tereta ($p = 300$ t) da bi brod imao krmni trim $0,4$ m ($t = -0,4$ m)?

Rješenje

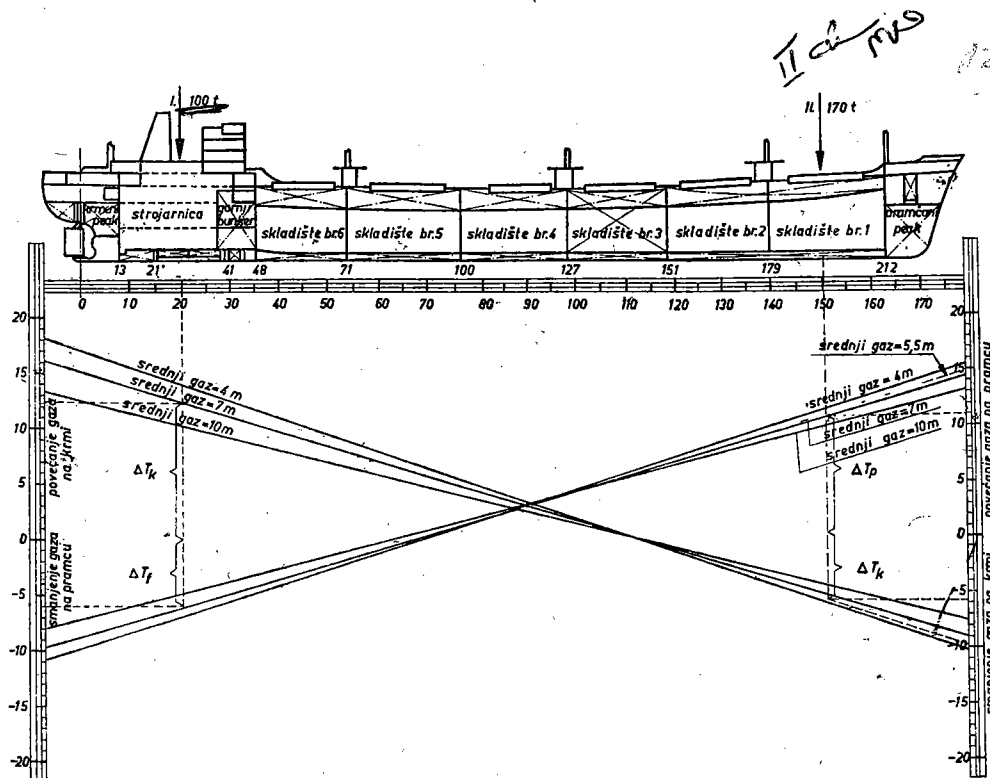
$$\begin{aligned} T_p &= 8 \text{ m } 42 \text{ cm} \\ T_k &= 7 \text{ m } 12 \text{ cm} \\ t &= 1 \text{ m } 30 \text{ cm} \\ t &= 1,3 \text{ m} \end{aligned}$$

$$d = \frac{t \cdot M_x}{p} = \frac{(1,3 + 0,4) \cdot 21\,500}{300} = 121,8 \text{ m}$$

Međutim, za izračunavanje promjene trima i za izravnanje broda pri premještanju, odnosno ukrcavanju ili iskrcavanju tereta, pomorcima je na raspolaganju dijagram ili tablica promjene trima. Taj se dijagram upotrebljava i kad je riječ o promjeni trima uzrokovanoj dodatnim masama koje se javljaju pri prodoru vode u brod. Brodograditelji izrađuju ovaj dijagram na temelju poznate formule za ukupnu promjenu trima $u = \frac{p \cdot d \cdot L}{D \cdot M_{LG}}$

i formula $n = u \cdot \frac{L_n}{L}$ i $k = u \cdot \frac{L_k}{L}$.

Dijagram je sračunat na promjene trima kad se 100 tona tereta ($p = 100$ t) ukrca na pojedinim mjestima broda (sl. 7.4). Dijagram sadrži uzdužni presjek broda i mjerilo duljine broda, a ispod njega je dijagram za očitavanja promjene gaza na pramcu i na krmi s ucrtanim linijama srednjeg gaza (na primjer, na sl. 7.4. za vrijednost srednjeg gaza 4 , 7 i 10 m).



Sl. 7.4. Dijagram i tablica promjene trima jugoslavenskog broda za rasuti teret M/b »BANJA«

Pri očitavanju promjene trima, od mjesta na nacrtu presjeka broda gdje treba teret ukrcati ili iskrcati spusti se okomica do odgovarajuće linije srednjeg gaza, a zatim se na ordinati pročita koliko će se gaz povećati na krmu, a smanjiti na pramcu i obratno, već prema tome hoće li se teret ukrcavati ili iskrcavati na krmenom ili pramčanom dijelu broda. Za srednje gazove između onih koji su označeni na linijama srednjih gazova vrši se interpolacija. U praksi se to obično radi tako da se za konkretni srednji gaz linija interpolira olovkom i dalje očitavaju promjene trima na već opisani način. Za mase ispod ili preko 100 tona dobivene vrijednosti promjene trima razmjerno se smanjuju, odnosno povećavaju

Tablica promjene trima obično se nalazi u knjizi trima i stabilnosti broda.

PITANJA

1. Koje su glavne značajke uzdužne stabilnosti broda?
2. Što je trim, a što ukupna promjena trima?
3. Što je jedinični moment trima i kako se izračunava?
4. Što je moment trima, a što poluga trima?
5. Što je dijagram promjene trima i na temelju čega se sastavlja?
6. Kako se u praksi upotrebljava dijagram promjene trima?
7. Čemu služe pramčani i krmeni pik-tankovi?

ZADACI

1. Teretni brod ima: $L = 133$ m, $D = 15\,070$ t i $R = 164$ m. Teret mase $p = 100$ t treba premjestiti od pramca prema krmu broda na daljinu $d = 80$ m. Proračunajte ukupnu promjenu trima (u), zatim promjenu trima na pramcu (n) i na krmu (k). Težište vodene linije nalazi se u sredini broda.
2. Linijski teretnjak ima: $L = 148$ m, $D = 16\,200$ t i $R = 125$ m, a težište vodene linije nalazi se 6 m iza glavnog rebra (prema krmu). Teret mase $p = 145$ t treba premjestiti od krme prema pramcu broda na daljinu $d = 90$ m. Proračunajte ukupnu promjenu trima (u), zatim promjenu trima na pramcu (n) i na krmu (k).
3. Duljina teretnog broda je $L = 174$ m, a deplasman $D = 33\,300$ t i uzdužni metacentarski polumjer $R = 240$ m. Izračunajte jedinični moment trima za razliku gaza 1 m u morskoj vodi.
4. Brod za rasuti teret treba da ukrcia teret ugljena. Iz sastavljenog plana tereta proizlazi da će deplasman nakrcanog broda biti $D = 21\,273$ t, a iz računa centracije da je $x_G = 76,15$ m (računato od krmene okomice). Iz dijagramnog lista broda izlazi da je za spomenuti deplasman srednji gaz broda $T_S = 9$ m 09 cm, udaljenost težišta istisnine od krmene okomice $x_F = 76,45$ m, a jedinični moment trima $M_x = 24\,000$ mt. Koliki će biti trim broda (t), a koliki gaz na pramcu (T_p) i na krmu (T_k)?
5. Brod za rasuti teret ima gaz na pramcu $T_p = 8$ m 32 cm i gaz na krmu $T_k = 8$ m 82 cm. Jedinični moment trima za razliku gaza 1 m jest $M_x = 22\,650$ mt. Na koju daljinu (d) treba iz krmenog skladišta premjestiti teret mase $p = 120$ t da bi trim broda bio nula?
6. Kad je brod za rasuti teret ukrcio teret, imao je gaz na pramcu $T_p = 9$ m 20 cm, a na krmu $T_k = 8$ m 06 cm. Jedinični moment trima za razliku gaza 1 m jest $M_x = 22\,800$ tm. Koliko tona tereta (p) treba premjestiti iz skladišta broj 1 prema krmu na daljinu $d = 100$ m da bi brod imao krmeni trim 0,3 m?

8. STABILNOST U NEKIM POSEBNIM UVJETIMA

8.1. UTJECAJ VISEĆEG TERETA NA STABILNOST BRODA

8.1.1. Promjena poprečne stabilnosti zbog visećeg tereta. Kada teret mase p visi na brodu, na primjer na samarici, njegov utjecaj na poprečnu stabilnost promatramo tako kao da je taj teret smješten u točki privezivanja koloturnika (podizača) samarice. I zaista, pri nagibanju broda pravac sile p uvijek prolazi kroz točku privezivanja koloturnika i ta točka leži na osovini gornje žabe (kolotura) toga koloturnika, a poluga momenta tereta p s obzirom na težište sistema broda raste s kutom nagiba broda.

S tog stajališta promjenu poprečne stabilnosti broda proračunavamo onako kako je to objašnjeno u t. 3.3. pri dodavanju tereta p na visinu osi gornjeg kolotura (žabe) podizača tereta nad težištem sustava broda (h).

Tada će nova početna metacentarska visina biti:

$$\overline{M_0G_1} = \overline{M_0G_0} - \frac{p \cdot h}{D + p}$$

Primjer

Linijski brod ima dimenzije: $L = 142,2$ m, $B = 19,8$ m, $T = 7,2$ m i deplaman $D = 10\ 800$ t. Početna metacentarska visina broda je $\overline{M_0G_0} = 0,86$ m.

Za vrijeme krcanja tereta u luci na samarici broj 2 (samarica za teške terete) visio je teret mase $p = 50$ t. Visina osovine gornjeg kolotura (žabe) podizača tereta samarice nad težištem sustava broda je $h = 22,5$ m.

Treba izračunati:

1) Koliko će spomenuti teret koji visi na samarici broj 2 smanjiti stabilnost broda ($\overline{G_0G_1} = ?$)?

2) Kolika će biti početna metacentarska visina broda za vrijeme dok teret visi na podizaču samarice?

Rješenje

Ad 1) Smanjenje stabilnosti, tj. početne metacentarske visine bit će:

$$\overline{G_0G_1} = \frac{p \cdot h}{D + p} = \frac{50 \cdot 22,5}{10\ 800 + 50} = 0,10 \text{ m}$$

Ad 2) Nova početna metacentarska visina bit će:

$$\overline{M_0G_1} = \overline{M_0G_0} - \overline{G_0G_1}$$

$$\overline{M_0G_1} = 0,86 - 0,10 = 0,76 \text{ m}$$

8.1.2. Proračunavanje uzdužnog i poprečnog kuta nagiba broda i drugih elemenata prouzročenih visećim teretom na brodu. Kada teret visi na podizaču brodske samarice ili dizalice, odnosno na podizaču plovne dizalice, smanjit će se stabilnost broda, a brod će se nagnuti u uzdužnom smjeru za kut ψ i u poprečnom za kut φ .

Prema tome, treba za teret poznate mase p koji visi na samarici, odnosno dizalici, proračunati smanjenje početne metacentarske visine, zatim kut uzdužnog nagiba ψ , ukupnu promjenu trima u i kut poprečnog nagiba φ .

Za proračunavanje kuta uzdužnog nagiba, što ga prouzrokuje viseći teret, uzet ćemo za primjer teret koji visi na podizaču plovne dizalice (sl. 8.1.1). Kada se plovna dizalica pri dizanju tereta p nagne u uzdužnom smjeru za kut ψ (sl. 8.1.1), tada poluga nagibajućeg momenta postane udaljenost l_1 i ona se kao kateta pravokutnog trokuta određuje ovako:

$$l_1 = (h + H) \cdot \sin \psi$$

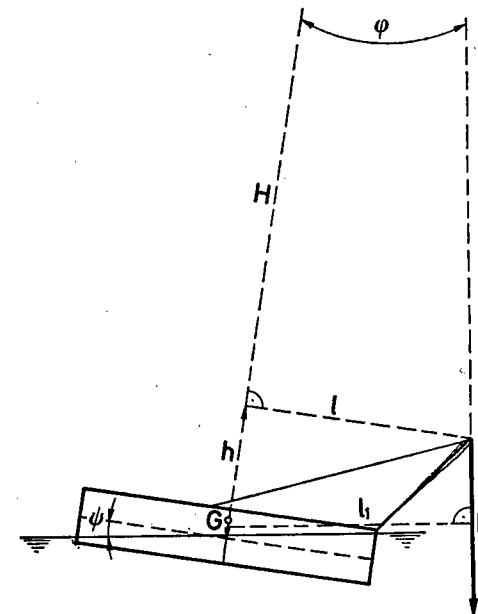
h — visina objesišta tereta na vrhu krova dizalice od težišta sustava G_0 ;
 H — udaljenost na pravcu djelovanja uzgona za vodenu liniju VL_0 (vodena linija prije nagiba broda), i to od presjecišta tog pravca s pravcem djelovanja tereta p do visine h .

Jednadžba stabilnosti u ovom slučaju glasi ovako:

$$p \cdot l_1 = (D + p) \cdot \overline{M_0G_0} \cdot \sin \psi$$

$$p \cdot (h + H) \cdot \sin \psi = (D + p) \cdot \overline{M_0G_0} \cdot \sin \psi$$

$$p \cdot (h + H) = (D + p) \cdot \overline{M_0G_0}$$



Sl. 8.1.1. Proračun uzdužnog i poprečnog kuta nagiba plovne dizalice, kada teret visi u objesištu tereta na dizalici

Ako je l vodoravna udaljenost pravca sile p od središta vodene linije pri ravnom položaju dizalice, bit će:

$$H' = l \cdot \operatorname{ctg} \psi = \frac{l}{\operatorname{tg} \psi}$$

Prema tome:

$$p \cdot \left(h + \frac{l}{\operatorname{tg} \psi} \right) = (D + p) \cdot \overline{M_0 G_0}$$

$$p \cdot h + p \cdot \frac{l}{\operatorname{tg} \psi} = (D + p) \cdot \overline{M_0 G_0}$$

Ako sada jednadžbu pomnožimo sa $\operatorname{tg} \psi$ bit će:

$$p \cdot h \cdot \operatorname{tg} \psi + p \cdot l = (D + p) \cdot \overline{M_0 G_0} \cdot \operatorname{tg} \psi$$

$$p \cdot l = (D + p) \cdot \overline{M_0 G_0} \cdot \operatorname{tg} \psi - p \cdot h \cdot \operatorname{tg} \psi$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{p \cdot l}{(D + p) \cdot \overline{M_0 G_0} - p \cdot h}$$

Kut poprečnog nagiba broda računa se analogijom prema gornjoj formuli ovako:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{p \cdot b}{(D + p) \cdot \overline{M_0 G_0} - p \cdot h}$$

U formuli je b udaljenost težišta visećeg tereta od simetralne ravnine broda.

Ukupna promjena trima (u) računa se ovako:

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

$$\frac{u}{L} = \frac{p \cdot l}{(D + p) \cdot \overline{M_0 G_0} - p \cdot h}$$

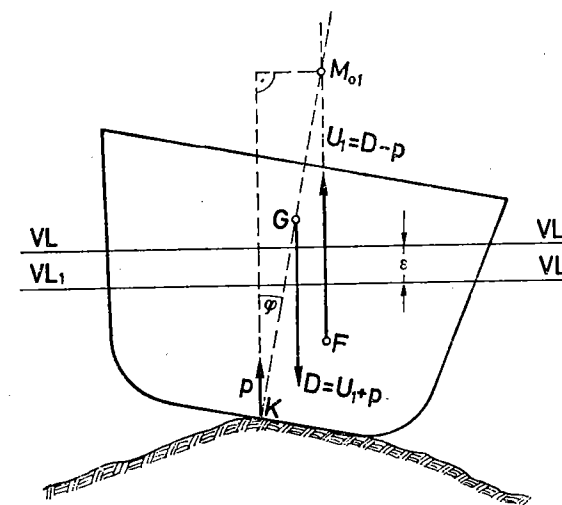
$$u = \frac{p \cdot l \cdot L}{(D + p) \cdot \overline{M_0 G_0} - p \cdot h}$$

8.2. STABILNOST PRI NASUKANJU I PRI DOKOVANJU

8.2.1. Stabilnost pri nasukanju broda. Kada se brod nasuče, reakcija uporišta u točki nasukanja smanjuje moment stabilnosti broda. Izronjeni sloj broda pri nasukanju $VLVL_1$ (sl. 8.2.1) nije više osiguran uzgonom i masa ovako izronjenog sloja jest onaj pritisak koji djeluje u točki nasukanja i naziva se **reakcija na dnu broda**. Ako se nakon nasukanja smanji visina vode (nadolazak niske vode) ili ako se brod nasuče velikom brzinom, tada se na točku dodira može prenijeti znatan dio mase broda, zbog čega se pojavi osjetan gubitak stabilnosti broda. U takvoj situaciji može se dogoditi da se nasukani brod nagne zbog i najmanjeg djelovanja vjetra i valova, a može doći i u takvo pogibeljno stanje da potpuno izgubi stabilnost (u tom se slučaju metacentar M_{01} na sl. 8.2.1. pomakne sve do težišta sustava G ili čak ispod njega) i legne sasvim na bok, što može prouzročiti znatna oštećenja. Ako je teren nasukanja strm ili u njegovoj blizini postoje udoline, brod se može i prevrnuti.

Reakcija na dnu broda p koja zamjenjuje uzgon izronjenog sloja broda $VLVL_1$ određuje se ovako:

$$p = F_{VL} \cdot \varepsilon \cdot \rho$$



Sl. 8.2.1. Stabilnost kod nasukanja broda

U formuli je ε srednja vrijednost debljine izronjenog sloja broda zbog nasukanja, tj. srednja vrijednost smanjenja gaza na pramcu i na krmi zbog nasukanja, dok je F_{VL} površina vodene linije u m^2 . Ukoliko pri nasukanju broda dođe i do prodora vode u brod, tada se reakcija na dnu broda uveća za masu vode koja je prodrla u brod.

Ako se nasukani brod nagne za neki kut φ , njegov moment stabilnosti jednak je zbroju momenata s obzirom na točku nasukanja K, oko koje se brod okreće, sve pod pretpostavkom malih kutova nagiba (sl. 8.2.1), prema tome:

$$M_{st} = U_1 \cdot \overline{M_{01}K} \cdot \sin \varphi - D \cdot \overline{KG} \cdot \sin \varphi$$

Iz formule vidimo da smo kao pozitivan označili onaj moment koji uspravlja brod, dakle $U_1 \cdot \overline{M_{01}K} \cdot \sin \varphi$, a kao negativan onaj moment koji pomaže prevrtanje broda, dakle $D \cdot \overline{KG} \cdot \sin \varphi$.

Budući da je $U_1 = D - p$, formula za moment stabilnosti glasi: će:

$$M_{st} = (D - p) \cdot \overline{M_{01}K} \cdot \sin \varphi - D \cdot \overline{KG} \cdot \sin \varphi$$

$$M_{st} = D \cdot \overline{M_{01}K} \cdot \sin \varphi - p \cdot \overline{M_{01}K} \cdot \sin \varphi - D \cdot \overline{KG} \cdot \sin \varphi$$

Budući da je $D \cdot \overline{M_{01}K} \cdot \sin \varphi - D \cdot \overline{KG} \cdot \sin \varphi = D \cdot \overline{M_{01}G} \cdot \sin \varphi$ tada će formula za moment stabilnosti glaziti:

$$M_{st} = D \cdot \overline{M_{01}G} \cdot \sin \varphi - p \cdot \overline{M_{01}K} \cdot \sin \varphi$$

$$M_{st} = (D \cdot \overline{M_{01}G} - p \cdot \overline{M_{01}K}) \cdot \sin \varphi$$

$$M_{st} = D \left(\overline{M_{01}G} - \frac{p}{D} \cdot \overline{M_{01}K} \right) \cdot \sin \varphi$$

Razlika $\overline{M_{01}G} - \frac{p}{D} \cdot \overline{M_{01}K}$ je smanjena metacentarska visina nakon nasukanja broda, odnosno smanjena metacentarska visina već nasukanog broda nakon nadolaska niske vode i zove se reducirana metacentarska visina ($\overline{M_0G_{red}}$). Prema tome je:

$$\overline{M_0G_{red}} = \overline{M_{01}G} - \frac{p}{D} \cdot \overline{M_{01}K}$$

Na temelju ove formule možemo i moment statičke stabilnosti za slučaj nasukanja pisati kao i općenitu formulu za moment početne statičke stabilnosti kad brod pluta na vodi. Prema tome:

$$M_{st} = D \cdot \overline{M_0G_{red}} \cdot \sin \varphi$$

Razumljivo je da za stabilnu ravnotežu broda mora biti $\overline{M_{01}G} > \frac{p}{D} \cdot \overline{M_{01}K}$

Kritični gaz pri nasukanju je onaj srednji gaz u kojeg je masa izronjenog broda p tolika, da je reducirana metacentarska visina $\overline{M_0G_{red}}$ na granici dopuštene vrijednosti (0,3 m).

Kritični gaz nalazimo tako da u dijagramnom listu broda ucrtamo krivulju $\frac{d}{D} \cdot \overline{M_{01}K}$ za nekoliko gazova ispod onog gaza na kojem brod pluta. Tada gdje ordinata te krivulje postaje jednaka $\overline{M_{01}G}$ očitavamo kritični gaz.

Primjer

Nasukani teretni brod ima ove značajke: deplasman $D = 18\,960$ t, $L = 148$ m i $B = 21,8$ m. Srednji gaz broda prije nasukanja bio je $T_{s1} = 9,2$ m, a nakon nasukanja na podvodni greben srednji gaz broda bio je $T_{s2} = 8,4$ m. Početna metacentarska visina nasukanog broda je $\overline{M_{01}G} = 1,10$ m, udaljenost metacentra M_{01} iznad osnovke prema dijagramnom listu je $\overline{M_{01}K} = 8,8$ m, a površina vodene linije $F_{VL} = 2\,360$ m². Specifična gustoća morske vode je $\rho = 1,025$.

Treba izračunati:

- 1) Kolika je masa reakcije (p) na dno nasukanog broda?
- 2) Budući da se očekuje nadolazak niskog vodostaja i opadanje vode za 0,6 m ($\varepsilon_1 = 0,6$ m), postoji li opasnost da će se tada brod nagnuti i prevrnuti?

Rješenje

Ad 1) Masa reakcije na dno nasukanog broda je:

$$p = F_{VL} \cdot \varepsilon \cdot \rho$$

Visina izronjenog sloja broda nakon nasukanja je:

$$\varepsilon = T_{s1} - T_{s2} = 9,2 - 8,4 = 0,8 \text{ m}$$

Prema tome, masa reakcije na dno je:

$$p = 2\,360 \cdot 0,8 \cdot 1,025 = 1\,935,2 \text{ t}$$

Ad 2) Reducirana početna metacentarska visina pri nadolasku niske vode bit će:

$$\overline{M_0G_{red}} = \overline{M_{01}G} - \frac{p}{D} \cdot \overline{M_{01}K}$$

Masa izronjenog sloja broda nastalog nadolaskom niske vode bit će:

$$p = F_{VL} \cdot \varepsilon_1 \cdot \rho = 2\,360 \cdot 0,6 \cdot 1,025$$

$$p = 1\,416 \text{ t}$$

$$\overline{M_0G_{red}} = 1,10 - \frac{1\,416}{18\,960} \cdot 8,8$$

$$\overline{M_0G_{red}} = 0,44 \text{ m}$$

Budući da je reducirana metacentarska visina pozitivna i da ima zadovoljavajuću vrijednost od 0,44 m, to znači da će nasukani brod i nakon nadalaska niske vode ostati i dalje u ravnom položaju.

8.2.2. Stabilnost pri dokovanju broda. Pri dokovanju broda može također nastati smanjivanje ili pak gubitak stabilnosti. Stoga se bočne potklade i upore ne smiju pomicati niti postavljati na svoje mjesto sve dok brod ne dotakne kobilicne potklade na čitavoj duljini.

Dokovanje broda s obzirom na stabilnost može se promatrati slično kao i stabilnost pri nasukanju. Naime, pri dokovanju voda se crpe iz doka. Pritom se dok izdiže iz vode i brod, u jednom trenutku dotakne potklade doka, koje su prije postavljene prema položaju kobilice broda.

Nakon što je brod nalegao na potklade, dok se i dalje diže, ali sada zajedno s brodom. Prema tome uzgon U_1 sve više i više se smanjuje, a reakcija p sve više povećava. Pri jednoj stanovitoj razini vode u doku postat će $\frac{p}{D} \cdot \overline{M_{01}K} = \overline{M_{01}G}$, čime je postignut kritičan vodostaj u doku. Daljnjim dizanjem doka brod će izgubiti početnu stabilnost pa ga treba sa strane poduprijeti bočnim uporama kako bi se izbjegli veći nagibi.

Formula izvedena za stabilnost pri nasukanju:

$$M_{st} = D \left(\overline{M_{01}G} - \frac{p}{D} \cdot \overline{M_{01}K} \right) \cdot \sin \varphi$$

vrijedi i za stabilnost pri dokovanju, samo što je izvedena na nešto drukčiji način.

Promatrajmo istu sliku 8.2.1. kao i pri nasukanju. Zamislimo da smo iz točke K iskricali teret jednak reakciji p . Zbog iskrcavanja tereta ispod težišta sustava stabilnost broda će se smanjiti. Kako se težište iskrceanog tereta nalazi ispod težišta sustava G , težište G podignut će se u G_1 , pa će se udaljenost težišta sustava od osnovke povećati za $\overline{GG_1}$. Nova metacentarska visina je $\overline{M_{01}G_1} = \overline{M_{01}K} - \overline{KG_1}$, gdje je $\overline{KG_1} = \overline{KG} + \overline{GG_1}$ udaljenost težišta G_1 od osnovke K . Prema poučku o pomaku težišta zbog iskrcavanja tereta, bit će:

$$\overline{GG_1} = \frac{p \cdot \overline{KG}}{D - p}$$

$$\overline{M_{01}G_1} = \overline{M_{01}K} - \overline{KG} - \overline{GG_1}$$

$$(D - p) \cdot \overline{M_{01}G_1} = D \cdot \left(\overline{M_{01}G} - \frac{p}{D} \cdot \overline{M_{01}K} \right)$$

Analogno tome bit će:

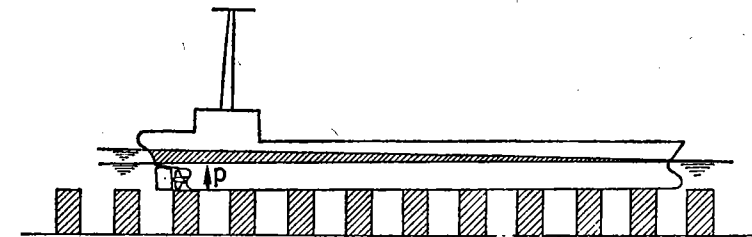
$$M_{st} = (D - p) \cdot \overline{M_{01}G_1} \cdot \sin \varphi = D \cdot \left(\overline{M_{01}G} - \frac{p}{D} \cdot \overline{M_{01}K} \right) \cdot \sin \varphi$$

Slično kao i pri nasukanju i u ovom će slučaju reducirana metacentarska visina biti:

$$\overline{M_{01}G_{red}} = \overline{M_{01}G_1} - \frac{p}{D} \cdot \overline{M_{01}K}$$

Kritični gaz nalazimo u dijagramnom listu broda na isti način koji je objašnjen pri nasukanju broda.

Ako brod koji se dokuje pri dodiru kobilicnih potklada ima znatniju razliku gaza na pramcu (T_p) i na krmi (T_k), iz vode će izaći jedan klinasti volumen (sl. 8.2.2), što može znatno smanjiti stabilnost broda. Volumen tako izronjenog klina određuje se približno kao $v = F_{VL} \cdot \frac{1}{2}$ razlike gazova na pramcu i na krmi, što je zapravo visina klina, dok se za središte klina može smatrati da se nalazi na $2/3 (T_k - T_p)$. Tada će smanjenje stabilnosti broda biti izraženo kao reducirana metacentarska visina.



Sl. 8.2.2. Stabilnost kod dokovanja broda

Primjer:

Brod za rasuti teret ima deplasman $D = 18\,147$ t, gaz na krmi $T_k = 6,54$ m, gaz na pramcu $T_p = 5,48$ m, površinu vodene linije $F_{VL} = 3\,700$ m² i početnu metacentarsku visinu $\overline{M_{01}G_1} = 1,9$ m, a udaljenost metacentra iznad osnovke je $\overline{M_{01}K} = 9,8$ m.

Zbog pretrpljene nezgode brod se mora dokovati. Kako gazovi na pramcu i na krmi nisu jednaki, pri dodiru kobilicnih potklada u doku iz vode će izaći odgovarajući klinasti volumen koji će smanjiti stabilnost broda.

Stoga je potrebno izračunati koliko će se smanjiti stabilnost u trenutku kada brod dodirne kobilicne potklade na doku i postoji li opasnost da se brod opasno nagne i sklizne s kobilicnih potklada u trenutku dodira.

Rješenje

Volumen izronjenog klina broda bit će:

$$v = F_{VL} \cdot \frac{T_k - T_p}{2} = 3700 \cdot \frac{6,54 - 5,48}{2}$$

$$v = 1961 \text{ m}^3$$

Masa reakcije na potkladama bit će:

$$p = v \cdot \rho = 1961 \cdot 1,025 = 2010 \text{ t}$$

Smanjenje metacentarske visine u trenutku dodira potklada u doku bit će:

$$\overline{M_0G_{red}} = \overline{M_{01}G_1} - \frac{p}{D} \cdot \overline{M_{01}K}$$

$$\overline{M_0G_{red}} = 1,9 - \frac{2010}{18146} \cdot 9,8$$

$$\overline{M_0G_{red}} = 0,82 \text{ m}$$

Budući da metacentarska visina u trenutku kad brod dodirne kobilične potklade doka ima zadovoljavajuću vrijednost ($\overline{M_0G_{red}} = 0,82 \text{ m}$), ne postoji opasnost da će se brod u trenutku dodira potklada opasno nagnuti i skliznuti.

PITANJA

1. Kako teret koji visi na podizaču brodske samarice ili dizalice utječe na stabilnost broda?
2. Kako se proračunava korekcija metacentarske visine zbog visećeg tereta na brodskoj samarici ili dizalici?
3. Kako se proračunavaju kutovi uzdužnog i poprečnog nagiba broda uzrokovanog visećim teretom na brodu?
4. Kako utječe na stabilnost nasukanje broda i što je to reakcija ili pritisak na dno pri nasukanju?
5. Kako utječe nadolazak niske vode na stabilnost nasukanog broda i kada postoji opasnost da će se brod prevrnuti?
6. Kada i zbog čega pri dokovanju broda može nastati opasno smanjenje stabilnosti broda?

ZADACI

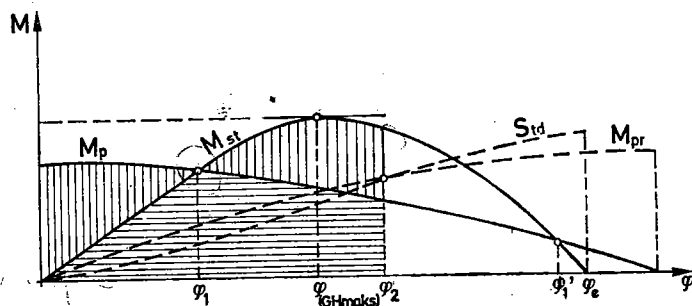
1. Linijski brod ima dimenzije: $L = 148 \text{ m}$, $B = 21,8 \text{ m}$, $T = 7,8 \text{ m}$ i deplasman $D = 14800 \text{ t}$. Početna metacentarska visina broda je $\overline{M_0G_0} = 0,98 \text{ m}$. Za vrijeme krcanja tereta u luci, na samarici broj 3 visio je teret mase $p = 135 \text{ t}$, a visina osi gornjeg kolotura podizača samarice nad sistemnim težištem broda je $h = 20,8 \text{ m}$.
Treba izračunati:
1) Koliko će spomenuti teret koji visi na samarici broj 3 smanjiti stabilnost broda ($\overline{G_0G_1} = ?$)?
2) Kolika će biti metacentarska visina broda za vrijeme dok teret visi na podizaču samarice ($\overline{M_0G_1} = ?$)?
2. Nasukani obalni putnički brod ima ove značajke: $D = 390 \text{ t}$, $T = 3,05 \text{ m}$, $\overline{M_{01}G} = 1,28 \text{ m}$, površina vodene linije $F_{VL} = 167,5 \text{ m}^2$, a udaljenost metacentra od osnovke je $\overline{M_{01}K} = 3,2 \text{ m}$. Kako se očekuje nadolazak niskog vodostaja i opadanje vode za $0,6 \text{ m}$, postoji li opasnost da će se brod u tom slučaju nagnuti, odnosno prevrnuti?
3. Obalni putnički brod ima ove značajke: $D = 470 \text{ t}$, $T_k = 3,6 \text{ m}$, $T_p = 2,6 \text{ m}$, $F_{VL} = 216,5 \text{ m}^2$, $\overline{M_{01}G_1} = 1,40 \text{ m}$, a udaljenost metacentra od osnovke je $\overline{M_{01}K} = 4,2 \text{ m}$. Kako zbog nezgode koju je brod pretrpio gazovi na pramcu i na krmi nisu jednaki, potrebno je ustanoviti koliko će se smanjiti stabilnost broda pri dokovanju u trenutku kad brod dodirne kobilične potklade i postoji li opasnost da se brod nagne i sklizne s kobiličnih potklada u trenutku dodira.

9. DINAMIČKA STABILNOST BRODA

Sredstven

9.1. Definicija i značenje dinamičke stabilnosti. Već smo spomenuli da se stabilnost uvijek javlja pri naginjanju broda prouzrokovanog djelovanjem sila, odnosno momenata na brod, koji potječu od vjetera ili valova ili su posljedica opterećenosti broda ukrcajnim teretom ili prodorom vode. Međutim, kad se veličina sila ili momenata koji djeluju na brod naglo mijenja, dolazi do ubrzanja masa, zbog čega govorimo o dinamičkom djelovanju sila i o pojavi dinamičke stabilnosti broda.

Promatrajmo za trenutak sl. 9.1. gdje su ucrtane krivulja momenta statičke stabilnosti M_{st} i krivulja momenta nagibanja, odnosno prekretnog momenta M_p . Vidimo da se i krivulja prekretnog momenta mijenja također s nagibom broda, jer se mijenjaju i poluge sila koje djeluju na brod, a ponekad i same sile. Zbog nastalog ubrzanja brod dobiva određenu brzinu gibanja koja se sve više povećava, i to sve dotle dok je nagibni moment M_p veći od momenta statičke stabilnosti M_{st} , što znači do kuta nagiba φ_1 gdje se sijeku krivulje tih momenata. Međutim, zbog prikupljene kinetičke energije njezove mase brod se neće zaustaviti u statičkom položaju ravnoteže, tj. do kuta nagiba φ_1 , nego će nastaviti to gibanje sve do kuta nagiba φ_2 , pri kojem će ta količina kinetičke energije biti utrošena radnjom koju mora obaviti moment nagiba M_p radi svladavanja momenta statičke stabilnosti M_{st} . Budući da nakon kuta nagiba φ_1 moment statičke stabilnosti postaje veći od prekretnog momenta, suma momenta protivi se daljnjem nagibanju broda.



Sl. 9.1. Objašnjenje dinamičke stabilnosti broda

Karakteristični kut φ_2 nalazimo tako da izjednačimo radnju prekretnog momenta s radnjom momenta statičke stabilnosti broda. To je na sl. 9.1. prikazano jednakošću vertikalno iscrtkanih površina. Naime, radnju možemo

predočiti površinom koju zatvara krivulja momenta ovisno o kutovima nagiba, s osi na koju su nanoseni ti kutovi nagiba; u našem slučaju to je kut φ_2 ucrtan tamo gdje postoji jednakost površina ispod krivulja prekretnog momenta M_p i momenta M_{st} . Postavljanje, dakle, osi koja označuje kut izjednačenja obaju momenata koji djeluju na brod uvjetovano je jednakošću površina ispod krivulja M_p i M_{st} do toga kuta. Iz slike 9.1. nadalje vidimo da je vodoravno iscrtkana površina zajednička objema krivuljama M_p i M_{st} , što je također uvjetovano jednakošću površina ispod krivulja M_p i M_{st} do kuta φ_2 ; vodoravno iscrtkana površina predstavlja višak energije obaju momenata. Tako i mora biti, jer višak prekretnog momenta (npr. vjetera) prouzrokuje kinetičku energiju broda, dok višak statičke stabilnosti daje rad u koji se mora ta kinetička energija utrošiti.

Na temelju ovoga što je rečeno vidimo da je za svladavanje kinetičke energije broda, prouzrokovane dinamičkim djelovanjem vanjskih sila, značajna površina ispod krivulja momenta statičke stabilnosti, a to je, zapravo, rad momenta statičke stabilnosti i on se zove **dinamička stabilnost broda**.

Ako se površina ispod krivulje momenta statičke stabilnosti za pojedine kutove nagiba predoči u određenom mjerilu kao linearna vrijednost, dobije se niz točaka koje spojene daju krivulju dinamičke stabilnosti broda (na sl. 9.1. krivulja St_d). Na sličan način se konstruira i krivulja radnje prekretnog momenta (na sl. 9.1. krivulja M_{pr}). Matematički izraženo, krivulja dinamičke stabilnosti je integrala krivulje momenta statičke stabilnosti, dok je krivulja radnje prekretnog momenta integrala krivulje prekretnog momenta.

Promatrajući sl. 9.1. vidimo da je kut nagiba φ_2 u stvari presjecište krivulje dinamičke stabilnosti St_d s krivuljom radnje prekretnog momenta M_{pr} . Prema tome, pri dinamičkom djelovanju sila brod se može u krajnjem slučaju nagnuti sve dotle dok postoji pozitivna površina (površina iznad osi apscise φ) ispod krivulje statičke stabilnosti, tj. sve do kuta φ_e . Pri dinamičkom djelovanju prekretnog momenta brod će se prevrnuti tek tada kada vertikalno iscrtkana površina na sl. 9.1. ispod viška nagibnog momenta (npr. vjetera) bude veća od odgovarajuće površine ispod viška krivulje statičke stabilnosti, što bi se dogodilo tek kad bi se brod nagnuo preko kuta nagiba φ_1 , koji u krajnjem slučaju može postići vrijednost φ_e , zbog čega se taj kut i naziva **dinamički kut prevrtanja broda**. Otprije znamo da taj kut određuje i opseg krivulje momenata statičke stabilnosti.

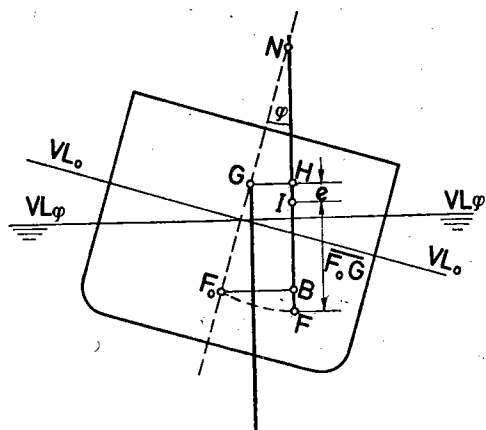
Rekli smo da je dinamička stabilnost broda radnja koju obavlja moment statičke stabilnosti pri nagibanju broda. Tu radnju koju obavlja moment statičke stabilnosti možemo izraziti kao umnožak između deplasmana broda D i razlike udaljenosti težišta istisnine i težišta sustava pri uspravnom i nagnutom položaju broda (sl. 9.2). Budući da je udaljenost između težišta istisnine i težišta sustava u uspravnom broda F_0G , a u nagnutom broda FH , tada će rad statičke stabilnosti, odnosno dinamička stabilnost biti:

$$St_d = D \cdot (FH - F_0G) = D \cdot e$$

Vidimo da moment nagiba (prekretni moment) pri nagibanju obavi rad koji bi bio potreban da se cijela težina W , odnosno masa broda D podigne za visinu e . Na slici 9.2. vidimo da je put dinamičke stabilnosti prikazan dužinom $\overline{HI} = e$.

Budući da dinamičku stabilnost možemo definirati kao umnožak sile, odnosno mase i puta, mjerna jedinica je tona-metar (t m).

Značenje nauke o dinamičkoj stabilnosti još je i u tome što ona objašnjava razliku djelovanja na brod nekoga stalnog nagibajućeg momenta, npr. tlaka vjetra ili presipanja žitarica u brodskim skladištima, od takva momenta koji se ispoljava dinamično, npr. vjetra na mahove.



Sl. 9.2. Dinamička stabilnost kao rad statičke stabilnosti

9.2. Krivulja dinamičke stabilnosti broda. Rad momenata statičke stabilnosti jest dinamička stabilnost broda i prikazana je površinom ispod krivulje momenata statičke stabilnosti. Ako sada pomoću planimetra ili pomoću Simpsonove formule izračunamo površine ispod krivulje momenata statičke stabilnosti, odnosno krivulje poluga statičke stabilnosti, kao funkcije kuta nagiba φ (npr. za svakih 10° nagiba) pa te površine u određenom mjerilu predočimo kao linearne vrijednosti, dobit ćemo niz točaka. Kada te točke spojimo krivuljarem, dobijemo krivulju dinamičke stabilnosti St_d (sl. 9.3).

Promatrajući sl. 9.3. vidimo da je krivulja dinamičke stabilnosti najstrmija u točki gdje krivulja poluga statičke stabilnosti $\overline{GH}(\varphi)$ ima maksimalnu vrijednost. Međutim, u točki gdje je ordinata krivulja $\overline{GH}(\varphi)$ jednaka ničtici, krivulja dinamičke stabilnosti ima svoj maksimum. Iz krivulje dinamičke stabilnosti vidimo da je radnja potrebna za okretanje broda najveća upravo u točki gdje je poluga \overline{GH} jednaka ničtici.

Sve ovo ujedno znači da iz krivulje momenata statičke stabilnosti možemo ocijeniti veličinu radnje dinamičke stabilnosti.

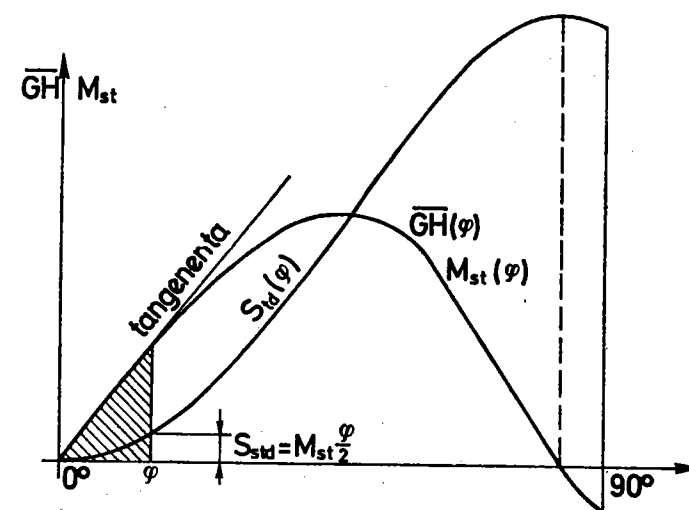
Na sl. 9.3. vidimo da se pri malim kutovima nagiba oblik krivulje momenata statičke stabilnosti poklapa s tangentom u samom ishodištu. Površinu ispod ove krivulje, tj. ispod tangente pri nekom malom kutu nagiba

φ možemo smatrati kao površinu trokuta. Ako je moment stabilnosti M_{st0} prikazan na ordinati kao umnožak $D \cdot \overline{GH}$, a znamo da površina trokuta prikazuje dinamičku stabilnost do kuta nagiba φ , tada će dinamička stabilnost biti:

$$St_d = \frac{D \cdot \overline{GH} \cdot \varphi}{2} = D \cdot \overline{GH} \cdot \frac{\varphi}{2}$$

$$St_d = M_{st0} \cdot \frac{\varphi}{2}$$

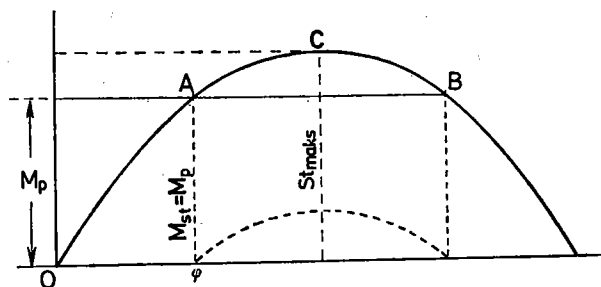
U formuli kut nagiba računamo u radijanima. Prema tome, rad dinamičke stabilnosti jednak je momentu statičke stabilnosti (u t m) pomnoženim polovinom kuta nagiba (u radijanima).



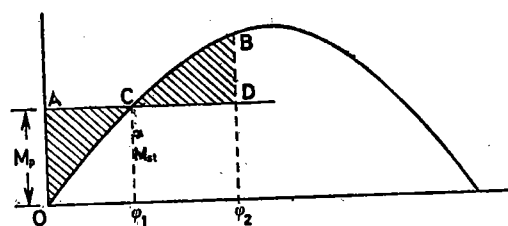
Sl. 9.3. Krivulja dinamičke stabilnosti

9.3. Djelovanje stalnoga nagibajućeg momenta na brod. Kao što je spomenuto u t. 9.1, nauka o dinamičkoj stabilnosti proučava i djelovanje na brod nekoga stalnog nagibajućeg momenta i momenta koji djeluje dinamično, na primjer kad na brod djeluje vjetar na mahove.

U prvom slučaju, kad se nagibajući moment broda pod utjecajem neke stalne sile (npr. vjetar stalne jakosti) postupno povećava do vrijednosti M_p (sl. 9.4), rad te sile je u svakom času jednak radu uspravljujućeg para sile. Na slici se vidi da će stalni nagibajući moment nagnuti brod do kuta φ kada je $M_{st} = M_p$ i brod će se zadržati u tom položaju. Međutim, ako M i dalje djeluje kao stalni nagibajući moment (djelovanje vjetra ili prodiranje vode u brod), taj moment će smanjiti rezervu stabilnosti do vrijednosti ABC na slici.



Sl. 9.4. Djelovanje stalnog nagibajućeg momenta na brod

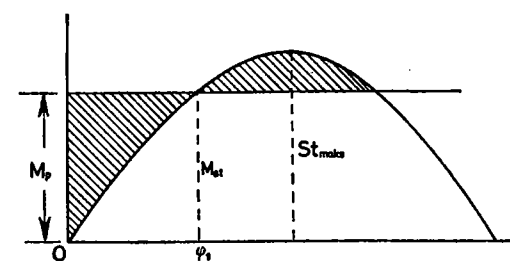


Sl. 9.5. Nagibni moment pri djelovanju vjetra na mahove na brod

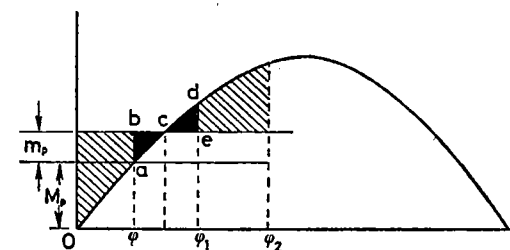
9.4. Djelovanje vjetra na mahove. Kada nagibajući moment djeluje na brod iznenadno i dinamično u cijeloj svojoj veličini kao trajni udarac, rad tog momenta u početku nadjačava rad uspravljujućeg para statičke stabilnosti M_{st} (sl. 9.5). Kada se ti momenti izjednače pri kutu nagiba φ_1 , brod ima kutnu brzinu i produžit će naginjanje do kuta φ_2 , kada će se opet izjednačiti rad nagibajućeg momenta i rad uspravljujućeg para. Na sl. 9.5. taj slučaj je prikazan tako da su površine OAD i OB postale jednake, odnosno postali su jednaki šrafirani isječci OAC i CBD .

U točki B na sl. 9.5. uspravljujući moment M_{st} veći je od nagibajućeg momenta M_p , pa će nakon nekoliko oscilacija brod ponovo doći u stabilan položaj pri kutu nagiba φ_1 , kada je $M_{st} = M_p$.

Kada takav nagibajući moment koji dinamično djeluje na brod (npr. vjetar na mahove) ima znatnu vrijednost ili brod ima premalo rezerve stabilnosti, može se dogoditi da na krivulji stabilnosti nema točke gdje bi se mogli izjednačiti nagibajući i uspravljujući moment (sl. 9.6). Na slici se jasno vidi da je šrafirani dio koji prikazuje rezervu stabilnosti mnogo manji od šrafiranog dijela koji pokazuje višak M_p . U tom slučaju brod će se prevrnuti iako je nagibajući moment i nešto manji od maksimalnog momenta stabilnosti (St_{maks}).



Sl. 9.6. Slučaj kada ne postoji mogućnost izjednačenja nagibajućeg i uspravljućeg momenta (na krivulji stabilnosti nema točke u kojoj bi se ova dva momenta mogla izjednačiti)



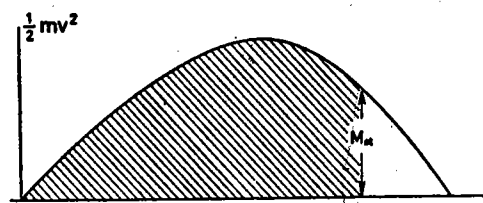
Sl. 9.7. Slučaj kad nagibajući moment vjetra ($M_p + m_p$) djeluje postupno i kad djeluje odjednom

Daljnijim proučavanjem dinamičke stabilnosti objašnjava se nekoliko pojava koje se na prvi pogled čine proturječnima. Tako, na primjer, ako se brod pod djelovanjem momenta vjetra M_p već nagnuo do kuta φ (sl. 9.7), pa mu se u tom trenutku pridodaje moment vjetra na mahove m_p , brod će se nagnuti do kuta φ_1 . Slučaj na sl. 9.7. objašnjen je i prikazan dodatkom površina $abc = cde$. Međutim, ako bi na brod cijeli moment $M_p + m_p$ djelovao dinamično odjednom, naganje broda bilo bi znatno veće sve do kuta φ_2 .

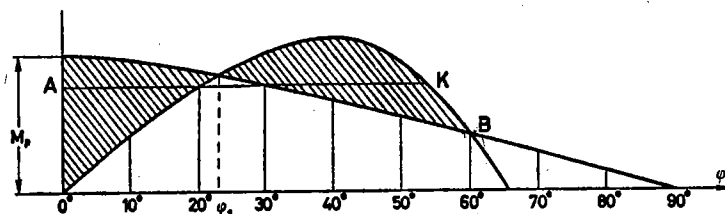
Situacijom prikazanom na sl. 9.7. objašnjava se, na primjer, slučaj u jedrenju kada je uvijek korisnije i manje opasno izdržati udarac vjetra s punim jedrima. Međutim, ako brod dok jedri prihvati (okrene u vjetar) pa zatim otpadne (okrene od vjetra) i odjednom dobije cijeli udarac vjetra $M_p + m_p$, može doći u vrlo opasnu situaciju.

Iz svega što je do sada rečeno o stabilnosti broda znamo da kut pri kojem krivulja stabilnosti dosegne svoj maksimum (St_{maks}) predstavlja granicu do koje se brod može bez opasnosti nagnuti, jer čim statički moment naganja postaje veći od najvećega uspravljujućeg momenta, brod će se prevrnuti. Međutim, u praksi se događa da brod dođe na upropašujuću granu krivulje stabilnosti (nagibi preko 45 — 50 stupnjeva) a opet se vrati natrag. Takav je

primjer prikazan na sl. 9.8, a odnosi se na slučaj kad trenutni kratki udar vala poveća postojeći nagib broda. U tom slučaju na brod djeluje samo impuls sile $\frac{1}{2} m \cdot v^2$ (m = masa vrha vala, a v = brzina vala). Taj impuls na samom početku oslabi zbog rada uspravljujućeg momenta, stoga nestane sila koja bi produžila naginjanje broda, pa on sačuva cijelu rezervu stabilnosti i vrati se u početni položaj.



Sl. 9.8. Slučaj trenutnog udara vala na već nagnuti brod. Brod se vraća u ravan položaj iako je već došao na upropašujuću granu krivulje stabilnosti



Sl. 9.9. Nagibajući moment M_p kao funkcija kuta naginjanja broda

9.5. Moment kritičnoga dinamičkoga para (sl. 9.9). Nagibajući moment M_p , koji dinamično djeluje na brod zapravo se mijenja kao funkcija kuta nagiba broda. Ta je funkcija prikazana na sl. 9.9. kao kosinus krivulja, tj. kao $M \cdot \cos \varphi$, koja završava kod 90° kad je kosinus nula. Zapravo tako i jest jer komponenta tlaka vjetra koji nagine brod silom P izražena je kao $P \cdot \cos \varphi$. Međutim, za tumačenje različitih pojava dinamičke stabilnosti, kako je to iz prijašnjeg izlaganja poznato, ova se kosinusoida može zamijeniti pravcem AK (sl. 9.9) koji je uspoređan s apscisom dijagrama.

Iz sl. 9.9. nadalje se vidi da moment M_p , koji dinamično djeluje na brod nagine ga do točke B na silaznoj grani krivulje statičke stabilnosti, gdje se izjednačuju radovi momenata M_p i M_{st} , ali gdje više nema rezerve stabilnosti. Stoga se u ovom slučaju silazni dio ili silazna grana krivulje statičke stabilnosti zove upropašujuća grana, a moment u točki B moment kritičnoga dinamičkoga para. Ovaj moment, koji dinamično djeluje na brod, sigurno će prevrnuti brod, bez obzira na to što je manji od maksimalnog momenta statičke stabilnosti St_{maks} .

Kut φ_1 koji odgovara prvoj fazi djelovanja kritičnoga dinamičkoga para naziva se kritični kut dinamičke stabilnosti.

PITANJA

1. Što je dinamička stabilnost broda i koje su njezine dimenzije?
2. Kako se konstruira krivulja dinamičke stabilnosti?
3. Što predstavlja rezervu stabilnosti na krivulji dinamičke stabilnosti broda?
4. Kako se grafički prikazuje djelovanje stalnoga nagibajućeg momenta na brod i kakve elemente sadrži taj prikaz?
5. Kako se grafički prikazuje kad nagibajući moment djeluje na brod iznenadno i dinamično, kao kod vjetra na mahove, do trenutka kad se izjednači rad nagibajućeg momenta i rad uspravljujućeg para?
6. Kako se grafički prikazuje situacija kad na krivulji stabilnosti nema točke gdje bi se izjednačili nagibajući i uspravljujući moment?
7. Objasnite razliku kad nagibajući moment vjetra djeluje postupno i kad djeluje odjednom!
8. Kakva je razlika kad trenutni udar vala djeluje na već nagnuti brod od situacije kad taj udar djeluje na brod koji ravno pliva?

10. KONTROLA STABILNOSTI I TRIMA U EKSPLOATACIJI BRODA

10.1. OPĆENITO O KONTROLI STABILNOSTI I TRIMA

10.1.1. Kontrola stabilnosti broda. Vidjeli smo da je poprečna stabilnost broda, čiji je pokazatelj početna metacentarska visina M_0G_0 , vrlo važna za sigurnost broda u plovidbi. Stoga neke pomorske zemlje zakonom obvezuju zapovjednike svojih brodova da moraju prije isplovljenja proračunati početnu metacentarsku visinu M_0G_0 i tako sa sigurnošću utvrditi zadovoljava li stabilnost broda. Neke države, poimence SAD i Kanada, propisima obvezuju sve brodove koji u njihovim lukama krcaju takve homogene terete kao što su žitarice, rude, drvo i sl., da prije isplovljenja na posebnim obrascima predoče kompletni račun stabilnosti s proračunatim vrijednostima početne metacentarske visine M_0G_0 za brod u odlasku (engl. *departure*) i za brod u dolasku (engl. *arrival*), a ponekad i za brod na sredini puta (engl. *intermediate*). Izračunavanje početne metacentarske visine za sredinu puta i za dolazak obavlja se zbog toga što će se u toku putovanja njezina vrijednost smanjiti zbog štetnog utjecaja slobodnih površina koje nastaju u brodskim tankovima kao posljedica utroška goriva i vode, a ujedno će se izmijeniti i zbog promijenjenih masa brodskih zaliha prouzročenih njihovom potrošnjom u toku plovidbe. Za žitarice su propisi posebno strogi jer zahtijevaju osim proračuna početne metacentarske visine još i proračun kuta nagiba, a isto tako i proračun rezerve dinamičke stabilnosti, o čemu se поближе govori u 11. poglavlju.

Na kraju napomenimo da je stabilnost broda s fizikalnog stajališta ispravno predočena jedino momentom statičke stabilnosti, jer samo ona daje onu veličinu s kojom se brod odupire djelovanju vjetrova i valova. Stoga smo u prijašnjem izlaganju i napomenuli da je za pomorca važno, ako želi upotpuniti sliku o stabilnosti svog broda, poznavati osim početne metacentarske visine M_0G_0 i krivulju stabilnosti broda.

10.1.2. Izračunavanje trima broda. Ponekad se uz provjeru stabilnosti broda mora obaviti i izračunavanje trima broda, i to na temelju sastavljenog plana tereta. Lučke vlasti obično ne zahtijevaju od broda i račun provjere trima broda, ali se ipak na temelju proračunavanja trima broda može zaključiti kako će se u toku putovanja, točnije na sredini puta i u dolasku, mijenjati trim broda koji je on imao na polasku, kao posljedica smanjenja masa brodskih zaliha. Ovo je posebno važno za brodove koji prevoze žitarice i rude i za tankere. Svaki zapovjednik broda, kao iskusan pomorac, nastojat će da prije odlaska broda izravna brod u uzdužnom smjeru tako da on pliva ili na ravnoj kobilici (engl. *on even keel*) ili pak da ima manji krmeni trim. Budući da svaki zapovjednik broda nastoji da takvo stanje trima broda zadrži, barem

približno, za cijelo vrijeme putovanja, sasvim je razumljivo što je ponekad nužno da se obavi i kontrola trima broda na temelju sastavljenog plana tereta.

10.1.3. Općenito o pomagalima potrebnim pri provjeri stabilnosti i trima broda. Za obavljanje provjere stabilnosti i trima broda svaki brod mora imati i odgovarajuća pomagala bez kojih ne bi bilo moguće izvesti sve potrebne proračune. To su prvenstveno ova pomagala: dijagramni list broda, knjiga trima i stabilnosti i kapacitetni plan broda.

10.1.4. Dijagramni list broda i njegovo značenje (sl. 10.1.1). Dijagramni list (engl. *hydrostatic curves*) je grafički prikaz važnijih geometrijskih veličina broda, unesenih u obliku krivulja koje vrijede za sve srednje gazove broda. Prema tome, dijagramni list je pravokutni koordinatni sustav s ishodištem u donjem lijevom kutu. Na apscisu se unosi konstrukcijska duljina broda, od konstrukcijskog rebra ništica (0) pa dalje, ili pak deplasman broda, a na ordinati srednji gaz broda (T_s). Kad je na apscisu umjesto konstrukcijske duljine unesen deplasman broda, što je kod današnjih dijagramnih listova gotovo obična pojava, očitavanje deplasmana broda za neki srednji gaz vrši se mnogo brže, jer ne treba upotrebljavati mjerilo predviđeno za krivulju deplasmana broda.

Prema tome, sve veličine koje su unesene u obliku krivulja u dijagramni list broda vrijede za srednje gazove. Srednji gaz broda (engl. *mean draught*) aritmetička je sredina gazova na pramcu i na krmi broda. Ponekad se dogodi, osobito kod većih brodova kad su nakrcani (npr. tankeri), zbog trenutne zakrivljenosti ili manjeg nagiba na bok, da im gazovi na pramcu i na krmi na oba boka nisu jednaki. Tada treba očitati gazove na pramcu, i to desno i lijevo, pa zatim na krmi, također desno i lijevo. Nakon toga se iz srednjega pramčanog gaza (engl. *forward draught mean*) i srednjega krmenog gaza (engl. *aft draught mean*) kao aritmetička sredina izračuna srednji gaz broda (engl. *forward and aft draught mean*).

Duljina broda na apscisi i srednji gaz na ordinati uneseni su u određenom mjerilu, na primjer 1 : 200, a srednji gaz 1 : 15 ili slično. Kada se na apscisi nalaze vrijednosti za deplasman, onda se on obično unosi u mjerilu 1 cm = 200 t.

Dijagramni list obično ne prelazi format pomorske karte; iz njega se s poznatim srednjim gazom mogu izvaditi sve geometrijske veličine broda za čije bi proračunavanje inače trebalo utrošiti mnogo vremena.

Međutim, dijagramni list broda, koji je sastavni dio knjige trima i stabilnosti, manjeg je formata, kao što je slučaj jugoslavenskog broda za rasuti teret »BANIJA« koji prikazuje sl. 10.1.1. Taj dijagramni list prikazan je na kraju knjige dimenzijama kako je predočen u knjizi trima i stabilnosti tog broda, što znači da može služiti za vježbe i praktične proračune.

Dijagramni list teretnih brodova obično ima približno 20 krivulja. Sve su one vrlo važne za vršenje raznih teoretskih proračuna, ali su neke od njih pomorcima potrebne za praktične svrhe, na primjer, za provjeravanje stabilnosti, za razne proračune pri krcanju tereta i slično. Za pravilnu upotrebu dijagramnog lista i za očitavanje podataka potrebno je da na svakoj njegovoj krivulji bude uneseno mjerilo (na primjer 1 cm = 200 m³, 1 cm = 200 tona, 1 cm = 0,2 m, 1 cm = 20 tona/cm itd.). Bez unesenih mjerila ne bi bilo moguće nikakvo očitavanje na dijagramnom listu.

Izračunavanje pojedinih veličina iz dijagramnog lista obavlja se tako da se od srednjeg gaza na ordinati povuče vodoravna crta do odgovarajuće krivulje i izmjeri duljina te crte u centimetrima. Kad se ta duljina pomnoži mjerilom za dotičnu krivulju, dobije se iznos te veličine u odgovarajućim mjernim jedinicama za traženi srednji gaz broda. Dijagramni listovi obično se crtaju na milimetarskom papiru, što znatno ubrzava i olakšava mjerenje udaljenosti od srednjeg gaza na ordinati dijagrama do spomenute krivulje.

Zelimo li, na primjer, izračunati poprečni metacentarski polumjer ($\overline{M_0F_0}$) za M/b »BANJU« pri srednjem gasu $T_s = 6 \text{ m } 55 \text{ cm}$, postupit ćemo ovako (sl. 10.1.1):

Od ordinate pri srednjem gasu $T_s = 6 \text{ m } 55 \text{ cm}$ povučemo olovkom vodoravnu liniju do krivulje poprečnog metacentarskog polumjera te izmjerivši je vidimo da je ona dugačka 3,2 cm. Ako sada ovu duljinu pomnožimo mjerilom krivulje (1 cm = 2 m) dobijemo:

$$\overline{M_0F_0} = 3,2 \cdot 2 = 6,4 \text{ m}$$

Slično postupamo pri proračunu bilo koje veličine, čija je krivulja ucrtana u dijagramnom listu. Napomenimo da su na dijagramnom listu mjerila nekih krivulja ucrtana tako da se udaljenosti ne mjere od ordinate, nego od glavnog rebra (npr. na sl. 10.1.1. krivulja težišta vodenih linija i krivulja težišta istisnine) što je u biti svejedno. Isto tako, za neke veličine udaljenost se mjeri od ordinate na desnoj strani dijagrama (npr. na sl. 10.1.1. krivulja poprečnog momenta tromosti itd.).

Dijagramni list teretnog broda ima obično ove krivulje:

- krivulju visine težišta deplasmana iznad osnovke;
- krivulju jediničnog momenta trima za razliku gaza 1 m u morskoj vodi (M_x);
- skalvolumena;
- skalvolumena s privjescima (kormilo, vijak, ljuljna kobilica itd.);
- skalvodeplasmana (istisnine) s privjescima;
- krivulju površina vodenih linija;
- krivulju poprečnog metacentarskog polumjera (\overline{MF});
- krivulju uzdužnog metacentarskog polumjera ($\overline{M_1F}$);
- krivulju težišta vodenih linija;
- krivulju udaljenosti težišta deplasmana po duljini;
- krivulju tone/cm za gaz u morskoj vodi itd.

Za praktičnu upotrebu dijagramnog lista pomorcima je osobito važno određivanje deplasmana, gaza i razlike gaza u morskoj i slatkoj vodi. Iz razlike proračunatih deplasmana za različite gazove lako se izračuna količina ukrčanog i iskrčanog tereta. Posebnu važnost za pomorce ima krivulja tone/cm jer je vrlo praktična.

Pošto se očitava gaz broda, iz skale deplasmana odmah se može naći koliki je deplasman broda. Prema tome, ako se očitava gaz prije i nakon ukrcavanja,

odnosno iskrčavanja tereta, iz skale deplasmana može se doznati masa ukrčanog odnosno iskrčanog tereta, jer će ona biti jednaka razlici deplasmana za jedan i drugi gaz. Ako gaz na pramcu i krmi nije jednak, uzima se uvijek srednji gaz. Za odgovarajući srednji gaz deplasman se vadi od ordinate pa vodoravno do skale deplasmana, uzimajući u obzir mjerilo. Ako je na apscisu unesen deplasman, postupak je još jednostavniji, jer se tada s dobivene točke na skali istisnine spusti okomica na apscisu i očitava deplasman. Napomenimo da je skala volumena na dijagramnom listu ujedno i skala deplasmana za slatku vodu (1 m³ = 1 tona).

Postupak za proračunavanje novoga srednjeg gaza pri prijelazu iz mora u slatku vodu i obratno jednostavan je, a za to se upotrebljavaju: skala volumena i skala deplasmana u morskoj vodi. Postupak je ovakav: Od točke na ordinati koja odgovara srednjem gasu u moru povuče se vodoravna linija do skale deplasmana u morskoj vodi. Zatim se u sjecištu na skali deplasmana povuče vertikala i od mjesta gdje ona siječe skalvolumena povuče se vodoravna linija, a na ordinati pročita odgovarajući gaz u slatkoj vodi. Pri prijelazu iz slatke vode u more postupak je obratan. Takvi proračuni obično se obavljaju kada brod krca teret u lukama koje leže na ušćima rijeka, jer se mora točno znati koliko brod mora dublje gaziti da na otvorenom moru uroni do propisanog gaza ili do oznake nadvođa.

10.1.5. Knjiga trima i stabilnosti broda. Kako je već spomenuto, svakom deplasmanu broda odgovara poseban dijagram krivulje stabilnosti. Međutim, u praksi je trgovačkih brodova da se krivulja stabilnosti obično crta za nekoliko karakterističnih deplasmana odnosno karakterističnih stanja tereta. Krivulje s ostalim potrebnim podacima unose se u knjigu trima i stabilnosti.

U ratnih se brodova krivulja stabilnosti crta za laki deplasman, zatim standardni i puni deplasman, a katkada još za dva-tri karakteristična opterećenja broda.

U knjizi trima i stabilnosti trgovačkih brodova bezuvjetno se nalaze krivulje stabilnosti za prazan brod (laki deplasman) i kad brod plovi u balastu, dok se krivulje za ostala opterećenja crtaju u zavisnosti od tipa i namjene broda. Za svako od spomenutih stanja tereta dati su u posebnoj tablici podaci potrebni za provjeru poprečne stabilnosti i trima broda. Krivulje stabilnosti i ostali podaci mogu se do neke granice upotrijebiti i za druga, približno slična stanja tereta.

Za svako od spomenutih opterećenja, odnosno stanja tereta, prikazan je račun centracije na temelju kojeg se izračuna vrijednost $\overline{KG_0}$, tj. udaljenost težišta sustava broda od osnovke, dok su u posebnoj tablici dati podaci potrebni za provjeru stabilnosti.

Tako su, na primjer, u tablici ovi podaci potrebni za provjeru poprečne stabilnosti:

- udaljenost metacentra iznad osnovke ($\overline{KM_0}$);
- udaljenost težišta sistema iznad osnovke ($\overline{KG_0}$);
- metacentarska visina ($\overline{M_0G_0}$);
- smanjenje metacentarske visine zbog slobodnih površina tekućina u tankovima ($\Delta \overline{MG}$);

— reducirana metacentarska visina, nakon odbitka $\Delta \overline{MG}$ zbog slobodnih površina.

Podaci u tablici potrebni za kontrolu trima jesu:

- udaljenost težišta istisnine od krmene okomice (x_F);
- udaljenost težišta sistema od krmene okomice (x_G);
- udaljenost težišta istisnine od težišta sustava ($x_G - x_F$);
- moment trima;
- jedinični moment trima za jedan metar;
- pretega (razlika između pramčanog i srednjeg gaza);
- zatega (razlika između krmenog i srednjeg gaza).

Od posebne praktične vrijednosti za pomorce je što se u knjizi trima i stabilnosti nalazi još i slijedeće:

- kapacitetni plan broda;
- dijagramni list;
- tablica momenata tromosti tekućine u brodskim tankovima;
- dijagram promjene trima za 100 tona tereta;
- dijagram S krivulja (pantokarena).

10.1.6. Kapacitetni plan broda. Kapacitetni plan (engl. *capacity plan*) je nacrt broda (uzdužni i poprečni presjek, a isto tako i tlocrti paluba i dvodna) na kojem su označeni prostori za teret, spremišta brodskih zaliha i brodski tankovi, a u posebnim tablicama dat je njihov kapacitet, a često i položaj težišta. Uz plan se obično ucertava i tablica nosivosti. Na nacrtu je označeno koji se tankovi protežu preko cijele širine broda, a koji su nepropusnom pregradom pregrađeni u lijevi i desni tank. U pregrađenih tankova u tablici je dat posebno kapacitet za desni, a posebno za lijevi tank.

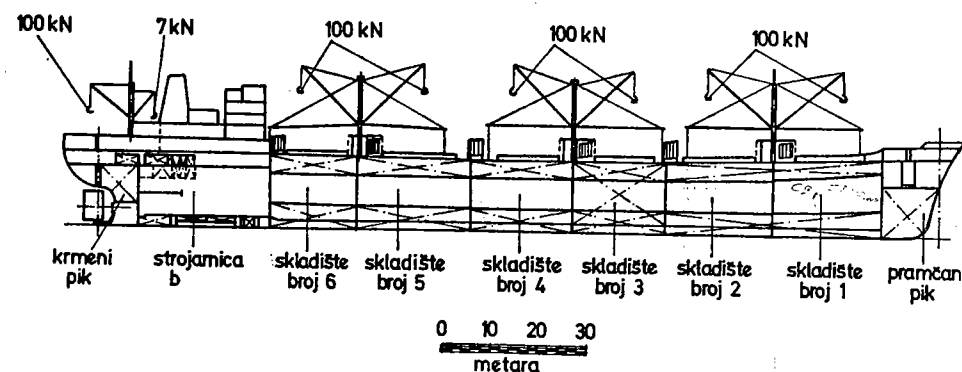
Tablica s kapacitetnim podacima teretnih prostorija broda sadrži kapacitet za žito i bale u kubičnim metrima za svako pojedino skladište, međupalubne prostore i ostale teretne prostorije, kao što su duboki tankovi, specijalni teretni prostor (loker) i sl. Tablica na kraju sadrži zbroj ukupnog kapaciteta teretnih prostorija za žito i za bale.

Tablica kapaciteta spremišta brodskih zaliha sadrži volumen svakoga pojedinog spremišta u kubičnim metrima, a obično još i udaljenost u metrima težišta svakog spremišta od osnovke i krmene okomice.

Tablice kapaciteta raznih tankova, kao što su tankovi vodenog balasta, tankovi pitke i kotlovene vode, tankovi teškog ulja itd., sadrže volumen svakoga pojedinog tanka u kubičnim metrima, masu sadržine u tonama, a obično i udaljenost težišta od osnovke i krmene okomice.

Podatak o udaljenosti težišta pojedinih skladišta, spremišta i tankova važan je za proračune momenata pri obavljanju računa centracije koji je sastavni dio kontrole stabilnosti i kontrole trima broda. Ako udaljenost težišta nije data u tablici, može se lako proračunati iz nacrtu broda, jer kapacitetni plan broda osim nacrtu (generalni plan broda) obično sadrži i mjerilo.

Sl. 10.1.2. prikazuje dio generalnog nacrtu (engl. *general arrangement plan*) broda M/b »BANIJA«, a sl. 10.1.3. tablicu kapaciteta brodskih skladišta (engl. *capacities of holds*). Obje su slike sastavni dio kapacitetnog plana spomenutog broda.



Sl. 10.1.2. Dio generalnog nacrtu jugoslavenskog broda za rasuti teret »BANIJA« kao sastavni dio kapacitetnog plana

Kapacitetni plan broda redovito se koristi pri sastavljanju plana tereta, a isto tako i pri provjeri stabilnosti i trima broda, i to ponajviše za proračunavanje momenata ukrcanog tereta po visini i duljini, jer se bez proračunatih momenata spomenuta provjera ne može obavljati. Ako je, na primjer, na brodu »BANIJA« skladište broj 4, čiji je kapacitet za žito $5\,575\text{ m}^3$, do vrha nakrcano pšenicom kojoj je faktor slaganja (engl. *stowage factor*) $f = 1,36\text{ m}^3$, tada se masa pšenice, koja će se ukrcati u skladište, i moment ovako računaju:

Kada pomnožimo masu tereta u tonama faktorom slaganja tereta, koji je u ovom slučaju izražen u m^3 , dobit ćemo kapacitet u m^3 koji će teret na brodu zauzeti. Prema tome, masu tereta p koju ćemo ukrcati u skladište broj 4 izračunamo ovako:

$$p \cdot f = 5\,575$$

$$p \cdot 1,36 = 5\,575$$

$$p = \frac{5\,575}{1,36} = 4\,099,3\text{ t}$$

$p = 4099,3\text{ t}$
 $f = 1,36$
 $cf = p \cdot f$
 $cf = 4099,3 \cdot 1,36$
 $cf = 5575\text{ m}^3$

Budući da će skladište biti do vrha nakrcano pšenicom, težište tereta nalaziti će se točno u sredini skladišta. To težište ćemo lako pronaći, ako u uzdužnom presjeku broda, prikazanom u generalnom nacrtu (sl. 10.1.2),

i to u skladištu broj 4, povučemo običnom olovkom dvije dijagonale. Težište tereta nalazit će se u sjecištu dijagonala. Ako sada šestarom prenesemo udaljenost težišta od osnovke broda na mjerilo vidimo da je težište pšenice udaljeno od osnovke za duljinu $z = 9,2$ m, što znači da će moment po visini ukrance pšenice u skladištu broj 4 biti:

$$m_z = p \cdot z = 4\,099,3 \cdot 9,2 = 37\,713,5 \text{ t m}$$

Slično postupamo i pri izračunavanju uzdužnog momenta tereta, samo što ovog puta moramo izmjeriti udaljenost težišta tereta od krmene okomice kao osi momenta (prolazi kroz osovnu kormila). Ta udaljenost bit će $d = 88$ m, što znači da će moment po duljini ukrance pšenice u skladištu broj 4 biti:

$$m_x = p \cdot d = 4\,099,3 \cdot 88 = 360\,738,4 \text{ t m}$$

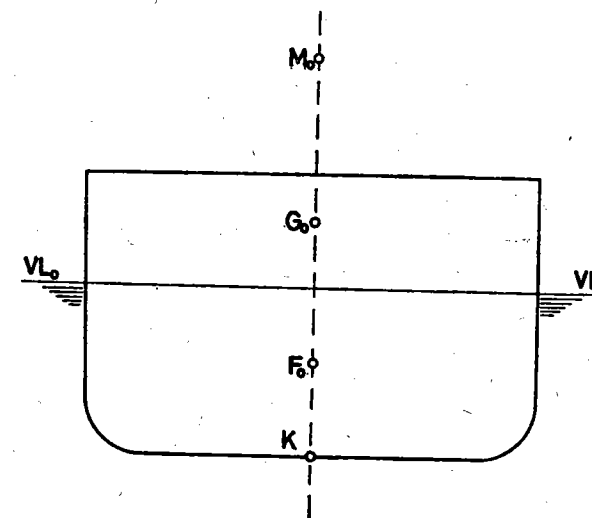
KAPACITET SKLADIŠTA BRODA M/b »BANIJA«

Naziv	Rebro	Za žito		Težište od	
		m ³	m ³	Osnovke (m)	Krmene okomice (m)
Skladište br. 1	179—212	5 770	5 193	8,73	151,32
Skladište br. 2	151—179	6 147	5 531	8,13	129,48
Skladište br. 3	127—151	3 322	2 990	8,40	108,50
Skladište br. 4	100—127	5 575	5 041	7,90	88,48
Skladište br. 5	71—100	6 330	5 697	8,26	66,18
Skladište br. 6	46—71	5 557	5 001	8,45	44,50
Palubni tank br. 1 L.	151—212	566,49	510	13,68	138,76
Palubni tank br. 1 D.	151—212	566,49	510	13,68	138,76
Palubni tank br. 2 L.	127—151	267,93	241	12,80	108,65
Palubni tank br. 2 D.	127—151	267,93	241	12,80	108,65
Palubni tank br. 3 L.	100—127	301,48	271	12,79	88,25
Palubni tank br. 3 D.	100—127	301,48	271	12,79	88,25
Palubni tank br. 4 L.	71—100	323,81	291	12,79	65,85
Palubni tank br. 4 D.	71—100	323,81	291	12,79	65,85
Palubni tank br. 5 L.	46—71	279,58	252	13,05	44,31
Palubni tank br. 5 D.	46—71	279,58	252	13,05	44,31
Bočni tank u skl. br. 3 L.	127—151	803,77	723	6,97	108,67
Bočni tank u skl. br. 3 D.	127—151	803,77	723	6,97	108,67
Ukupno		37 787,12	34 031	—	—

Sl. 10.1.3. Tablica kapaciteta brodskih skladišta jugoslavenskog broda za rasuti teret »BANIJA«

10.2. KONTROLA POPREČNE STABILNOSTI

10.2.1. Općenito o kontroli poprečne stabilnosti broda. Kontrola poprečne stabilnosti broda najčešće se obavlja još prije početka krcanja tereta pod uvjetom da je pažljivo sastavljen plan tereta (engl. *cargo plan*), koji daje točne podatke o težinama tereta, razmještaju tereta po pojedinim skladištima i ostalim teretnim prostorijama, a isto tako i o kapacitetu (volumenu) koji će teret zauzeti.



Sl. 10.2.1. Proračun početne metacentarske visine pri kontroli stabilnosti broda

10.2.2 Račun centracije. Budući da je mjerilo početne stabilnosti metacentarska visina, potrebno je tu vrijednost odrediti. Položaj metacentra mjeri se njegovom visinom iznad osnovke (K) i označuje se sa \overline{KM}_0 (sl. 10.2.1). Prema tome: $\overline{KM}_0 = \overline{KG}_0 + \overline{M_0G_0}$, iz čega izlazi da je početna metacentarska visina:

$$\overline{M_0G_0} = \overline{KM}_0 - \overline{KG}_0$$

Znači da je za proračunavanje početne metacentarske visine potrebno odrediti visinu metacentra iznad osnovke \overline{KM}_0 i položaj težišta sustava, tj. njegovu visinu \overline{KG}_0 iznad osnovke.

\overline{KM}_0 za bilo koji srednji gaz izvadi se iz dijagramnog lista broda, dok se udaljenost težišta sistema iznad osnovke \overline{KG}_0 određuje posebnim postupkom.

\overline{KM}_0 se zapravo sastoji od dva dijela: od $\overline{M_0F_0}$ i $\overline{KF_0}$ (sl. 10.2.1). Vrijednost $\overline{M_0F_0}$ izvadi se iz dijagramnog lista broda pomoću krivulje poprečnog metacentarskog polumjera. Vrijednost $\overline{KF_0}$ vadi se iz dijagramnog lista pomoću krivulje udaljenosti težišta istisnine iznad osnovke. U oba slučaja postupa se tako da se za određeni srednji gaz na ordinati dijagramnog lista povuče horizontala do krivulje. Duljina takve horizontale izražena mjerilom upisanim u dijagramnom listu daje vrijednost $\overline{M_0F_0}$, odnosno $\overline{KF_0}$ u metrima. Kada se tako dobivene vrijednosti za $\overline{M_0F_0}$ i $\overline{KF_0}$ zbroje, dobije se udaljenost $\overline{M_0K}$ u metrima.

Uobičajeni postupak za određivanje visine težišta sistema iznad osnovke \overline{KG}_0 jest račun centracije. Po tome postupku udaljenost \overline{KG}_0 dobije se ako se zbroj momenata po visini, svih ukranih tereta, uključujući i moment praznog broda, momente tereta brodskih zaliha i momente svih tankova napunjenih tekućinama, podijeli deplasmanom broda. Podaci za moment praznog broda, momente tereta brodskih zaliha (hrana, materijal za održavanje broda i dr.) i za momente tekućina u tankovima (gorivo, mazivo, pitka voda, voda za kotlove, balast itd.) dobiju se iz knjige trima i stabilnosti i kapacitetnog plana broda. Svi ti momenti računaju se u odnosu prema osnovki kao osi momenta.

Prema tome, ako je D_0 deplasman praznog broda, z_{G_0} udaljenost težišta sistema praznog broda od osnovke, p masa svakoga pojedinog tereta, a z udaljenost težišta svakoga pojedinog tereta od osnovke, onda će udaljenost težišta sustava nakrcanog broda od osnovke biti:

$$\overline{KG}_0 = \frac{D_0 \cdot z_{G_0} + \sum p \cdot z}{D} = \frac{\sum M}{D}$$

Nakon toga se metacentarska visina izračuna kao:

$$\overline{M_0G_0} = \overline{KM}_0 - \overline{KG}_0$$

Kad je brod nakrcan homogenim teretom, kao što je npr. žito, drvo, ruda i sl., lako je odrediti udaljenost težišta tereta od osnovke za bilo koji teretni prostor. U linijskoj plovidbi, kad se u skladištima ili međupalubnim teretnim prostorijama nalaze najrazličitiji tereti, pomorci obično zbroje sve mase u jednom teretnom prostoru pa na temelju zauzetog kapaciteta u tome prostoru određuju skupno težište i, služeći se kapacitetnim planom broda (plan teretnih prostorija prikazan u uzdužnom presjeku broda), izmjere udaljenost skupnog težišta tereta od osnovke.

Ako se tako proračunata metacentarska visina približno podudara s metacentarskom visinom koja se za takvo ili barem slično stanje tereta nalazi u knjizi trima i stabilnosti, znači da je teret po visini pravilno složen i raspoređen, odnosno da je plan dobro sastavljen. Međutim, i bez obzira na takvu podudarnost metacentarska visina $\overline{M_0G_0}$ može se ocijeniti ako se usporedi s prosječnom vrijednosti $\overline{M_0G_0}$ za takav tip brodova, kako je to objašnjeno u t. 2.3.

Ako je proračunata metacentarska visina znatno manja od normalne, to upozorava da su neki teži tereti previše visoko podignuti (težište sustava se podiglo, zbog čega se $\overline{M_0G_0}$ smanjila). Tako nakrcan brod neće biti dovoljno stabilan, a to znači da će biti trom na valovima, što za sigurnost broda nije dobro. Naime, u krajnjim slučajevima takav se brod može nagnuti, a novi udar vala može naići prije nego se brod zbog tromosti (veliki period ljuhanja) još ne uspije vratiti u ravan položaj. Nakon nekoliko takvih uzastopnih udara valova brod se može lako prevrnuti. Ta konstatacija ujedno upozorava da se teret mora drukčije razmjestiti ili da se moraju napuniti balasti tankova u dvodnu, ako za to postoji mogućnost.

Kad je proračunata metacentarska visina osjetno veća od normalne, to pokazuje da su samo teži tereti složeni na dnu skladišta (težište sustava se spustilo zbog čega se $\overline{M_0G_0}$ povećala). Tako nakrcan brod bit će prestabilan, što znači previše živ na valovima (kratak period ljuhanja). Takva stabilnost nije dobra jer uzrokuje da se teret pomiče i brodska konstrukcija više napreže, zatim otežava kormilarenje i nepovoljno utječe na posadu. Da bi se stabilnost poboljšala (dovela $\overline{M_0G_0}$ u normalne granice), treba teže terete pomaknuti prema gore ili napuniti visoke balastne tankove, ako ih brod ima i ako za to postoji mogućnost, jer brod ne smije uroniti preko oznake nadvođa. Ako brod ima međupalublje, najbolje je dio težeg tereta ukrcati u taj teretni prostor. Brodovi za rasuti teret i brodovi za prijevoz ruda katkada imaju posebne, tzv. visoke ili palubne tankove (engl. *top tanks*), u koje mogu ukrcati teret ili balast.

10.2.3. Račun stabilnosti. Račun stabilnosti svodi se, u stvari, na izračunavanje početne metacentarske visine na osnovi spomenutog računa centracije, tako što se početna metacentarska visina $\overline{M_0G_0}$ računa za brod u odlasku i za brod u dolasku, a ponekad i za sredinu puta. Dobivena vrijednost početne metacentarske visine mora se ispraviti zbog štetnog utjecaja slobodnih površina u brodskim tankovima, a kad brod prevozi žitarice i pri tome se koristi napajcima za žito (engl. *feeders*), tada se izračunata vrijednost $\overline{M_0G_0}$ mora ispraviti i za slobodne površine u napajcima ($\Delta \overline{MG}_t$), kako je to već bilo objašnjeno u t. 4.7.

Račun se centracije posebno računa za prazan brod i brodski teret (komercijalni teret, dakle korisna nosivost), jer on ostaje nepromijenjen za brod u polasku i za brod u dolasku (tablica I). Međutim, račun centracije za brodske zalihe bit će različit za brod u odlasku, za sredinu puta i za brod u dolasku, pa se kao takav uklapa u račun stabilnosti broda (tablica II).

Kako se obavlja kontrola poprečne stabilnosti broda, najbolje će pokazati ovaj primjer.

Primjer

Tramper »X« treba da u američkoj luci Baltimore ukrca 11 420 t pšenice za London. Glavne značajke broda su: $L = 153,6$ m, $B = 18,8$ m i $T = 9,02$ m; ukupna nosivost broda je $N_u = 12 986$ t. Brod ima ukupno pet skladišta za teret, pet međupalubnih prostorija za teret i dva duboka tanka, smještena u sredini broda, jedan na desnoj, a drugi na lijevoj strani broda. Masa tereta

brodskih zaliha (posredna nosivost) na početku putovanja iznosi 647 tona. Potrebni podaci za prazan brod i pojedine tankove nalaze se u knjizi trima i stabilnosti broda i u kapacitetnom planu broda. Ukupna korekcija početne metacentarske visine zbog slobodnih površina u svim napajачima za žito (engl. *feeder's correction*) je $\Delta \overline{MG}_t = 0,25$ m.

Teret pšenice raspoređen je u pojedina skladišta, duboke tankove i međupalubne prostorije onako kako je to pokazano u tablici I. Vrijednosti \overline{KM}_0 ($\overline{KM}_0 = \overline{KF}_0 + \overline{M}_0\overline{F}_0$) izračunate su prema dijagramnom listu broda.

Na temelju spomenutih podataka i plana tereta treba obaviti račun stabilnosti za brod u odlasku (engl. *departure*), na sredini puta (engl. *intermediate*) i u dolasku (engl. *arrival*).

Rješenje

Vidi tablicu I i tablicu II!

Tablica I

RAČUN CENTRACIJE: PRAZAN BROD I TERET

Naziv	Masa (t)	Udaljenost težišta od osnovke (z) (m)	Moment po visini (t m)
Prazan brod	4 800	8,02	38 496,00
Skladište broj 1	1 296	5,70	7 387,20
Skladište broj 2	2 372	5,40	12 809,00
Skladište broj 3	1 265	5,40	7 231,00
Duboki tankovi	980	5,40	5 292,00
Skladište broj 4	2 050	5,80	11 840,00
Skladište broj 5	1 083	6,80	7 360,40
Međupaluba broj 1	67	11,70	783,90
Međupaluba broj 2	380	11,10	4 218,00
Međupaluba broj 3	815	10,80	8 802,00
Međupaluba broj 4	985	11,00	10 835,00
Međupaluba broj 5	127	11,30	1 435,00
Ukupno: prazan brod i komercijalni teret	16 220	—	116 277,00

Tablica II

RAČUN STABILNOSTI

Naziv	Brod u polasku			Brod na sredini puta			Brod u dolasku		
	Masa (t)	Udaljenost težišta od osnovke (z) (m)	Moment po visini (t m)	Masa (t)	Udaljenost težišta od osnovke (z) (m)	Moment po visini (t m)	Masa (t)	Udaljenost težišta od osnovke (z) (m)	Moment po visini (t m)
Prambani plik	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tank dvodna br. 1 — balast	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tankovi dvodna br. 2 — LID — balast	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tankovi dvodna br. 3 — LID — teško ulje	122,00	0,70	85,40	122,00	0,70	85,40	82,00	0,50	41,00
Tankovi dvodna br. 4 — LID — teško ulje	113,00	1,10	124,30	113,00	1,10	124,30	60,00	0,60	36,00
Tankovi dvodna br. 5 — LID — dizel ulje	27,00	1,10	30,00	27,00	1,10	30,00	7,00	0,35	2,45
Tankovi dvodna br. 6 — LID — pitka voda	100,00	1,10	110,00	50,00	0,55	27,50	20,00	0,30	6,00
Tankovi dvodna br. 7 — LID — teško ulje	240,00	0,70	168,00	130,00	0,38	49,40	110,00	0,35	38,50
Krmeni plik	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gornji krmeni plik	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ostale težine	45,00	9,00	405,00	44,00	9,00	396,00	43,00	9,00	387,00
Ukupno	647,00	—	522,70	486,00	—	712,60	322,00	—	510,95
Prazan brod i teret	16 220,00	—	116 277,00	16 220,00	—	116 277,00	16 220,00	—	116 277,00
Svega ukupno	16 867,00	—	117 199,70	16 706,00	—	116 989,60	16 542,00	—	116 787,95

$\overline{M}_0\overline{G}_0 = \overline{KM}_0 - \overline{KG}_0$	$\overline{M}_0\overline{G}_0 = \overline{KM}_0 - \overline{KG}_0$	$\overline{M}_0\overline{G}_0 = \overline{KM}_0 - \overline{KG}_0$
$\overline{KG}_0 = \frac{\sum M}{D} = \frac{117 200}{16 867} = 6,9$ m	$\overline{KG}_0 = \frac{\sum M}{D} = \frac{116 980}{16 706} = 7,0$ m	$\overline{KG}_0 = \frac{\sum M}{D} = \frac{116 788}{16 542} = 7,1$ m
$\Delta \overline{MG}_t = \frac{\sum Z}{D} = \frac{2 716}{16 867} = 0,16$ m	$\Delta \overline{MG}_t = \frac{\sum Z}{D} = \frac{2 716}{16 706} = 0,16$ m	$\Delta \overline{MG}_t = \frac{\sum Z}{D} = \frac{2 718}{16 542} = 0,16$ m
$\overline{M}_0\overline{G}_0 = 1,29$ m	$\overline{M}_0\overline{G}_0 = 1,50$ m	$\overline{M}_0\overline{G}_0 = 1,30$ m
	$\Delta \overline{MG}_t = 0,25$ m	$\Delta \overline{MG}_t = 0,25$ m
	$\Delta \overline{MG}_t = 0,16$ m	$\Delta \overline{MG}_t = 0,16$ m
	$\overline{M}_0\overline{G}_0 = 1,09$ m	$\overline{M}_0\overline{G}_0 = 0,89$ m

10.3. KONTROLA TRIMA BRODA

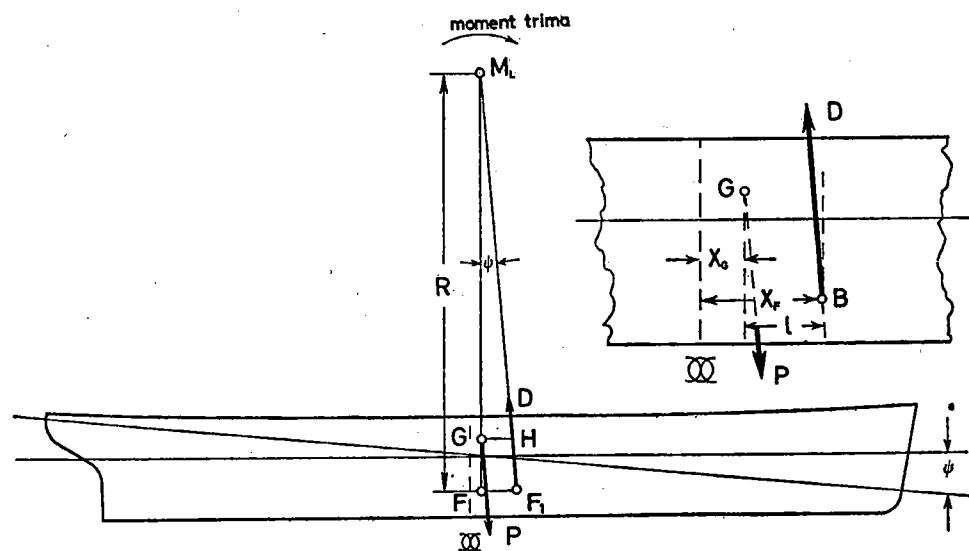
10.3.1. Općenito o kontroli trima broda. Već je u t. 10.1.2. napomenuto da se često uz kontrolu stabilnosti broda mora obaviti i kontrola trima broda. Sve se obavlja unaprijed na temelju sastavljenog plana tereta, i to za brod u polasku i za brod u dolasku, a ponekad i za brod na sredini puta.

10.3.2. Račun centracije za moment tereta po duljini broda (sl. 10.3.1). Trim broda za slučajeve navedene u t. 10.3.1. računa se po formuli:

$$t = \frac{D \cdot l}{M_x}$$

U formuli je $D \cdot l$ moment trima, a M_x onaj moment koji uzrokuje promjenu trima broda za 1 m. Iz formule izlazi da je za izračunavanje trima broda potrebno poznavati deplasman broda D , polugu trima l kao razliku $x_G - x_F$ i moment trima za 1 m.

Udaljenost x_G i x_F mogu se računati od krmene okomice ili od glavnog rebra, što je u biti svejedno. Vrijednost x_F i M_x izvadi se iz dijagramnog lista, dok je x_G potrebno odrediti računom centracije, s tim što se sada momenti računaju po duljini, uzimajući kao os momenta glavno rebro ili krmenu okomicu.



Sl. 10.3.1. Proračun trima pri kontroli trima broda

Za proračunavanje udaljenosti težišta sistema x_G od osi momenta važna je formula:

$$D \cdot x_G = D_0 \cdot x_{G_0} + p_1 \cdot x_{G_1} + p_2 \cdot x_{G_2} + \dots + p_n \cdot x_{G_n}$$

Iz formule dalje izlazi da je:

$$x_G = \frac{D_0 \cdot x_{G_0} + \sum p \cdot x_G}{D}$$

U formuli je D_0 deplasman praznog broda, x_{G_0} udaljenost težišta sustava praznog broda od osi momenta, a $\sum p \cdot x_G$ zbroj statičkih momenata po duljini svih masa tereta u odnosu prema osi momenta. Prema tome $D_0 \cdot x_{G_0}$ je moment praznog broda, dok u sumu momenata $\sum p \cdot x_G$ treba ubrojiti i momente svih tankova, uključujući balastne tankove i momente svih tereta koji čine brodske zalihe.

10.3.3. Proračun trima broda. Proračun trima broda obavlja se na temelju računa centracije, objašnjenog u t. 10.3.2. Račun centracije i ovdje se posebno računa za prazan brod i brodski teret (korisna nosivost), jer ostaje nepromijenjen za brod u polasku i za brod u dolasku (tablica III), dok će račun centracije za brodske zalihe biti različit za brod u odlasku, za sredinu puta i za brod u dolasku, pa se kao takav uklapa u proračun trima broda (tablica IV).

Tablica III

RAČUN CENTRACIJE: PRAZAN BROD I TERET

Naziv	Masa (t)	Udaljenost težišta od krmene okomice (x) (m)	Moment po duljini (tm)
Prazan brod	4 800	65,00	312 000,00
Skladište broj 1	1 296	131,00	169 776,00
Skladište broj 2	2 372	108,50	257 362,00
Skladište broj 3	1 265	94,00	118 910,00
Duboki tankovi	980	79,00	77 420,00
Skladište broj 4	2 050	47,00	96 350,00
Skladište broj 5	1 083	28,50	30 865,50
Međupaluba broj 1	87	131,00	877,00
Međupaluba broj 2	380	108,50	41 230,00
Međupaluba broj 3	815	94,00	76 610,00
Međupaluba broj 4	985	47,00	46 295,00
Međupaluba broj 5	127	28,50	3 619,50
Ukupno: prazan brod i teret	16 220	—	1 231 315,00

PRORACUN TRIMA

Naziv	Brod u polasku		Brod na sredini puta		Brod u dolasku	
	Masa (t)	Udaljenost težišta od krmene okomice (x) (m)	Masa (t)	Udaljenost težišta od krmene okomice (x) (m)	Masa (t)	Udaljenost težišta od krmene okomice (x) (m)
Pramčani pik	—	—	—	—	—	—
Tank dvodna br. 1 — balast	—	—	—	—	—	—
Tankovi dvodna br. 2—L i D — balast	—	—	—	—	—	—
Tankovi dvodna br. 3—L i D — teško ulje	122,00	71,00	122,00	71,00	82,00	71,00
Tankovi dvodna br. 4—L i D — teško ulje	113,00	69,00	113,00	69,00	60,00	69,00
Tankovi dvodna br. 5—L i D — dizel ulje	27,00	69,00	27,00	69,00	7,00	69,00
Tankovi dvodna br. 6—L i D — pitka voda	100,00	37,50	50,00	37,50	20,00	37,50
Tankovi dvodna br. 7—L i D — teško ulje	240,00	35,00	130,00	35,00	110,00	35,00
Krmeni pik	—	—	—	—	—	—
Gornji krmeni pik	—	—	—	—	—	—
Ostale težine	45,00	80,00	44,00	80,00	43,00	80,00
Ukupno	647,00	—	496,00	—	322,00	—
Prazni brod i teret	16 220,00	—	16 220,00	—	16 220,00	—
Svega ukupno	16 867,00	—	16 706,00	—	16 542,00	—

$$x_G = \frac{\sum M}{D} = \frac{1\ 265\ 387}{16\ 867} = 75,02\ \text{m}$$

$$l = x_G - x_F = 75,02 - 75,55 = -0,53\ \text{m}$$

$$t = \frac{D \cdot l}{M_x} = \frac{16\ 867 \cdot (-0,53)}{20\ 500} = -0,44\ \text{m (krmeni trim)}$$

$$x_G = \frac{\sum M}{D} = \frac{1\ 259\ 647}{16\ 706} = 75,41\ \text{m}$$

$$l = x_G - x_F = 75,41 - 75,55 = -0,14\ \text{m}$$

$$t = \frac{D \cdot l}{M_x} = \frac{16\ 706 \cdot (-0,14)}{20\ 300} = -0,12\ \text{m (krmeni trim)}$$

$$x_G = \frac{\sum M}{D} = \frac{1\ 249\ 855}{16\ 542} = 75,56\ \text{m}$$

$$l = x_G - x_F = 75,56 - 75,55 = 0,01\ \text{m}$$

$$t = \frac{D \cdot l}{M_x} = \frac{16\ 542 \cdot 0,01}{20\ 150} = 0,01\ \text{m (pram. trim)}$$

Kao praktični primjer proračunavanja trima broda uzet je isti slučaj, tj. isti brod s istim teretom koji je objašnjen u praktičnom primjeru iz t. 10.2.3.

Primjer:

Tramper »X« treba da u američkoj luci Baltimore ukrci 11 420 t pšenice za London.

Na temelju sastavljenog plana tereta potrebno je izračunati trim broda za brod u odlasku, na sredini puta i u dolasku.

Potrebni podaci za prazan brod i pojedine tankove nalaze se u knjizi trima i stabilnosti broda i u kapacitetnom planu broda. Vrijednosti jediničnog momenta trima za razliku gaza od 1 metra (M_x), a isto tako i udaljenosti težišta uzgona od krmene okomice izračunate su prema dijagramnom listu broda.

Rješenje

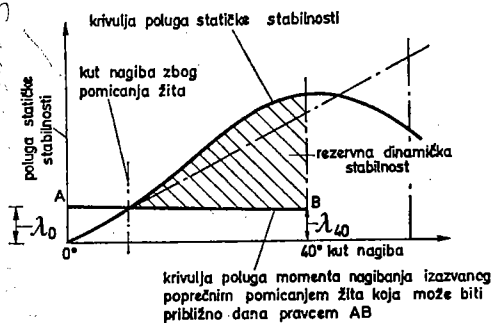
Vidi tablicu III i tablicu IV!

11. STABILNOST PRI PRIJEVOZU ŽITARICA

11.1. **Odredbe Konvencije SOLAS.** Rasute žitarice, kao brodski teret ubrajaju se u tzv. sipke terete, a to su takvi rasuti tereti kojima je kut prirodnog priklona jednak ili manji od 35 stupnjeva. Kut prirodnog priklona je kut između vodoravne ravnine i izvodnice konusa koji se dobije slobodnim sipanjem rasutog tereta na tu ravninu. Svim rasutim teretima kojima je kut prirodnog priklona jednak ili manji od 35 stupnjeva svojstveno je da im se površinski dio lako presipa. Upravo to svojstvo žitarica da se lako presipaju može u nekim uvjetima pomorskih prijevoza prouzrokovati opasna naginjanja broda. Uzevši u obzir činjenicu da početna metacentarska visina broda kad prevozi žitarice nije osobito velika, svako naginjanje broda prouzrokovano presipanjem tereta može ozbiljno ugroziti sigurnost broda. To je razlog što je Međunarodna konvencija o zaštiti ljudskog života na moru (Konvencija SOLAS) u VI glavi propisala posebne odredbe o prijevozu žitarica. Naziv »žito« u Konvenciji uključuje pšenicu, kukuruz, zob, raž, ječam, rižu, sve vrste grahorica, sjemenje, a isto tako i sve njihove prerađevine koje se ponašaju na sličan način kao i žitarice u svom izvornom prirodnom obliku. U nekim uvjetima prevoženja žitarica Konvencija je propisala postavljanje žitnih pregrada u teretnim prostorijama broda.

11.2. **Uvjeti stabilnosti broda pri prijevozu žitarica po odredbama Konvencije SOLAS.** Prema odredbama VI glave Konvencije SOLAS iz 1974. godine svaki brod koji prevozi žitarice treba da kroz čitavo putovanje broda zadovolji ove uvjete stabilnosti:

- 1) Kut nagiba broda zbog pomicanja žita ne smije biti veći od 12 stupnjeva.
- 2) Rezerva dinamičke stabilnosti broda prikazana na sl. 11.1. šrafiranim dijelom između krivulje momenta nagiba i krivulje statičke stabilnosti broda



Sl. 11.1. Rezerva dinamička stabilnost pri prijevozu žitarica

Rakovanje B

do kuta pri kojem je veličina razlika ordinata ovih krivulja najveća ili do kuta nagiba $\varphi = 40^\circ$, odnosno do tzv. kuta naplavlivanja (engl. *angle of flooding*), prema tome koji je od tih kutova najmanji, ne smije ni u jednom slučaju biti manja od 0,075 metar-radijana. Kut naplavlivanja, koji se ovdje spominje, označava kut nagiba broda, pri kojem uronjavaju u vodu otvori u trupu broda, nadgrađima ili palubnim kućicama, koji se ne mogu nepropusno zatvoriti.

3) Početna metacentarska visina, nakon ispravka za učinak slobodnih površina tekućina u tankovima, ne smije biti manja od 0,30 m.

U 10. pravilu Konvencija izričito napominje da svaki brod koji prevozi žito ili neki drugi sipki teret mora posjedovati »potvrdu o sposobnosti broda za krcanje sipkog tereta«. Takvu potvrdu izdaje brodu organizacija koja je za to priznata i ovlaštena od strane one vlade koja je potpisnica Konvencije SOLAS iz 1974. (npr. u SFRJ takvu potvrdu izdaje Jugoregistar).

Ukoliko brod koji prevozi žitarice i sličan sipki teret, zbog bilo kojih razloga, ne može udovoljiti prvom uvjetu stabilnosti, tj. nije sposoban izdržati nagib do 12 stupnjeva, tada to u spomenutoj potvrdi mora biti izričito naglašeno. Pri tome u potvrdi treba naznačiti koliki je najveći dopušteni kut nagiba za spomenuti brod. Takav dopušteni kut nagiba može se ograničiti do onog kuta nagiba pri kojem bi rub gornje palube bio uronjen pri mirnoj vodi.

Konvencija izričito napominje da je zapovjednik broda dužan udovoljiti zahtjevu lučkih vlasti gdje brod krca žito i još prije početka krcanja rasutog žita predočiti im sve obavljene proračune kojima se dokazuje da su sva tri prije spomenuta uvjeta stabilnosti zadovoljena. Lučke vlasti u nekim zemljama, poznatim izvoznicama žita, poimence u SAD i Kanadi, predaju brodovima već tiskane obrasce koji im na pregledan način omogućuju da obave sve potrebne proračune koji dokazuju jesu li sva tri uvjeta Konvencije zadovoljena (početna metacentarska visina, kut nagiba i rezervna dinamička stabilnost).

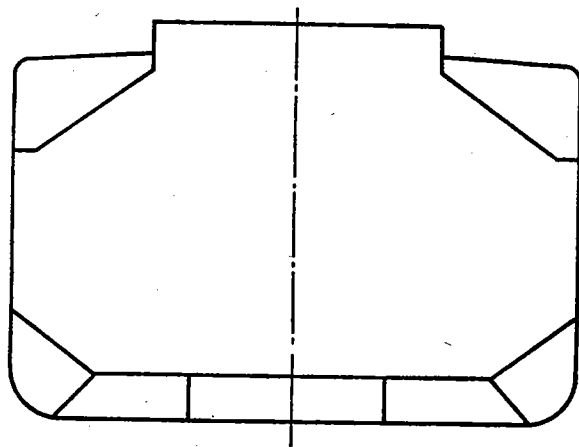
11.3. **Proračunavanje početne metacentarske visine.** Izračunavanje početne metacentarske visine M_0G_0 obavlja se računom centracije i računom stabilnosti na već opisani način u t. 10.2.2. i 10.2.3. Sve se to radi na temelju sastavljenog plana tereta iz koga se točno vidi koliko se tona žita treba ukrcati u svako pojedino skladište, odnosno teretni prostor broda. Početna metacentarska visina korigirana za slobodne površine mora se izračunati za brod u odlasku i za brod u dolasku.

1. **Volumetrički i nagibni moment žita.** Da bismo se upoznali s pojmovima volumetrički moment (engl. *volumetric moment*) i nagibni moment (engl. *heeling moment*) pogledajmo prvo izgled teretnih prostorija na jednom suvremenom brodu za rasuti teret (engl. *bulk carrier*). Na sl. 11.2. vidi se presjek glavnog rebra na jugoslavenskom brodu za rasuti teret »DINARA«, sagrađenom 1973. godine. Oblik skladišta sa kosim stijenkama od bokova broda prema grotnu jasno pokazuje da će se slobodna površina nakrcanog žita i učinak presipanja sve više smanjivati što je skladište punije, dok će se u potpuno nakrcanom skladištu zbog prirodnog slijeganja žita, to presipanje javiti samo

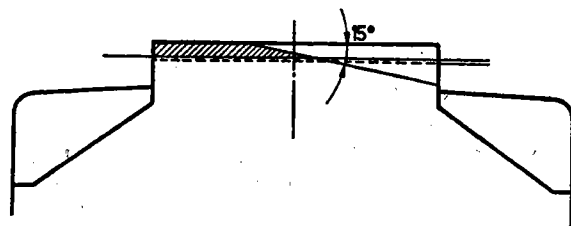
u prostoru ispod poklopca grotla. Kose stijenke skladišta od bokova broda prema dvodnu olakšavaju manipuliranje teretom. Kao što se na sl. 11.2. vidi, na vrhu svakog skladišta i bočno, nalaze se tzv. desni i lijevi krilni ili potpalubni tank (engl. *wing tank*) u koje se također krca teret i služe prvenstveno za regulaciju stabilnosti (engl. *gravity filling*). Skladišta i potpalubni tankovi mogu biti do vrha puni (engl. *entirely filled*) ili samo djelomično puni (engl. *partly filled*).

Izračunavanje volumetričkog momenta pomaka žita obavlja se posebno za puna skladišta, a posebno za djelomično puna skladišta. Pri tome se polazi od pretpostavke da će pri punim teretnim prostorima (skladišta i potpalubni tankovi) nagib površine žita prema horizontali biti 15 stupnjeva, a pri djelomično punim prostorima taj će nagib biti 25 stupnjeva. U oba će se slučaja pojaviti jedan uzdignuti i jedan spuštenu klin prouzročen presipanjem tereta, odnosno jedan lijevi klin (engl. *wedge port*) i jedan desni klin (engl. *wedge starboard*); koji će od njih biti uzdignut, a koji spušten, zavisi od toga na koju stranu je brod nagnut.

Kad su skladišta puna (sl. 11.3), treba izračunati volumen klina, tj. nastalog praznog prostora prouzročenog pomicanjem žita u grotlu i udaljenost te-

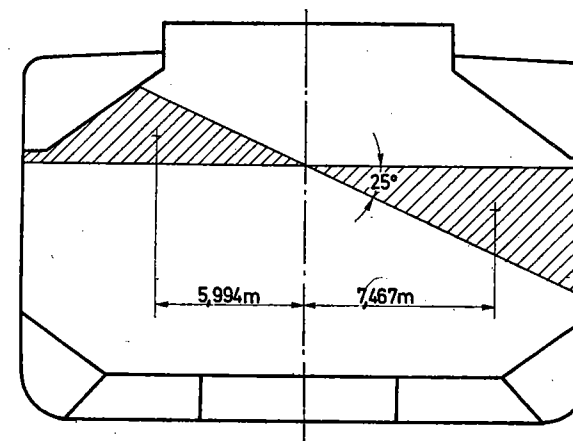


Sl. 11.2. Presjek glavnog rebra suvremenog broda za prijevoz rasutog tereta (žitarica)



Sl. 11.3. Volumetrički moment do vrha punog skladišta na brodu za prijevoz rasutog žita

žišta toga praznog prostora od simetrale broda kao osi momenta. Umnožak tako izračunatog volumena klina u m^3 s udaljenošću težišta klina od simetrale broda u metrima dat će nam volumetrički moment punog skladišta u m^4 ; dimenzija volumetričkog momenta je dakle m^4 . Ako se sada ovako dobiveni volumetrički moment nekog skladišta do vrha nakrcanog žitom pomnoži specifičnom gustoćom tereta ili pak podijeli faktorom slaganja tereta (žita), dobije se stvarni, tj. nagibni moment (engl. *heeling moment*) žita za to skladište u t m, koji je prouzrokovan pomakom žita. U ovom slučaju nagibni moment odnosi se na skladište koje je do vrha puno žitom.

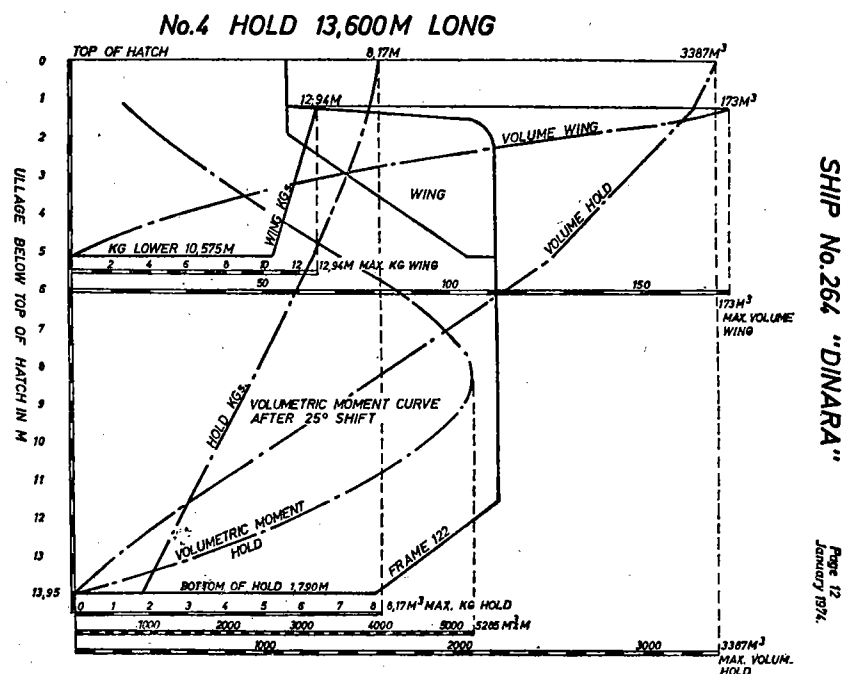


Sl. 11.4. Volumetrički moment djelomično punog skladišta na brodu za prijevoz rasutog žita

Kad je skladište djelomično puno (sl. 11.4), polazi se, kao što smo vidjeli, od pretpostavke da je bočni pomak žita prouzročio nagib površine žita prema horizontali za 25°. Kako se na slici vidi, zbog oblika skladišta volumeni klina ne će biti jednaki pa, prema tome, ne će ni udaljenosti njihovih težišta od simetrale broda biti jednake. Ako sada izračunamo volumene desnog i lijevog klina, pa te volumene pomnožimo udaljenošću njihovih težišta od simetrale broda, dobit ćemo volumetrički moment desnog i lijevog klina, a njihov zbroj bit će volumetrički moment (engl. *total volumetric moment*) toga skladišta. Iz sl. 11.4. jasno proizlazi da će veličina volumetričkog momenta djelomično nakrcanog skladišta zavisiti od toga do koje visine je žito nakrcano u tome skladištu. Kad se ovako dobiveni volumetrički moment djelomično punog skladišta pomnoži specifičnom gustoćom žita (ili) podijeli njegovim faktorom slaganja, dobije se nagibni moment žita u skladištu.

Na sličan način se izračunavaju i volumetrički, odnosno nagibni momenti žita u desnim i lijevim potpalubnim tankovima, a kako su ti tankovi skoro redovito samo djelomično nakrcani žitom, pri proračunima se polazi od pretpostavke da se površina žita u tankovima naginje prema horizontali za 25°; pri tome se u svakom tanku javljaju dva klina, koja zbog specifičnog oblika tankova nemaju iste volumene.

Da bi se pomorcima olakšao rad pri proračunima nagibnih momenata žita djelomično nakrcanih skladišta i potpalubnih tankova, stoji im na raspolaganju posebni dijagram za svako skladište (zajedno sa potpalubnim tankovima) iz kojeg se, na temelju visine nakrcanog žita u skladištu, može brzo i jednostavno izračunati volumetrički moment žita. Tako npr. sl. 11.5. pokazuje izgled spomenutog dijagrama za skladište broj 4 na jugoslavenskom brodu za rasuti teret »DINARA«. Ovakvi su dijagrami sastavni dio tzv. informacije za žito (t. 11.5), a u njima su navedeni i volumetrički momenti za sva brodska skladišta i ostale teretne prostore kad su do vrha puni žitom.



Sl. 11.5. Dijagram za proračunavanje volumetričkog momenta žita u skl. broj 4 jugoslavenskog broda za rasuti teret »DINARA«

11.5. Informacije za krcanje žita. Konvencija SOLAS je izričito propisala da svaki brod koji je građen za prijevoz žita mora imati potpunu dokumentaciju ili tzv. informacije (kao što su npr. »Loading manual«, »Carriage of grain cargo« i sl.) koje će omogućiti zapovjedniku broda da u svim uvjetima prijevoza i krcanja žitarica može bez poteškoća odrediti momente nagiba (engl. *heeling moments*) prouzročene pomicanjem žita. Te informacije između ostalog mora-

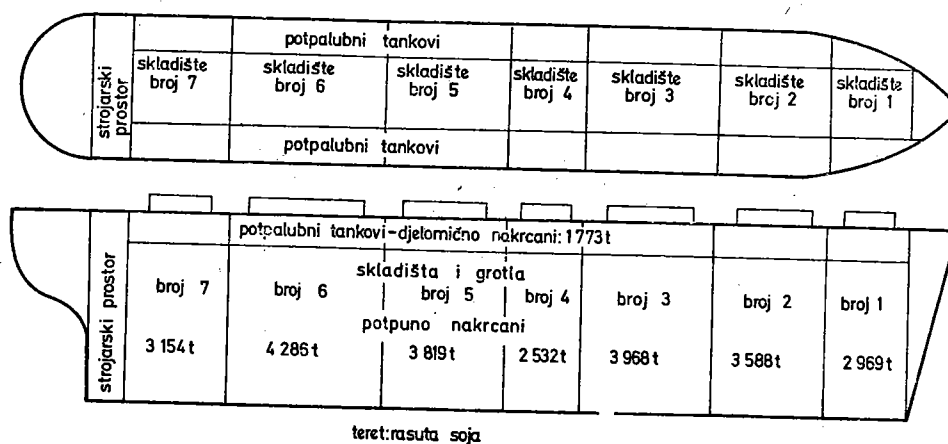
ju sadržavati dijagrame ili tablice momenata nagiba zbog žita za sve pune ili djelomično pune teretne prostore na brodu, tablice najvećih dopuštenih momenata nagiba, zatim knjigu stabilnosti za tipična stanja tereta sa svim potrebnim priložima koje taj dokument mora sadržavati, kako je to već objašnjeno u t. 10.15.

Stoga brodogradilišta, koja grade ovakve brodove, dužna su brodovlasniku zajedno s dovršenim brodom isporučiti i svu potrebnu dokumentaciju, o kojoj je ovdje riječ. Konvencija, nadalje, izričito nalaže da sva ta dokumentacija i informacije moraju biti službeno potvrđene od »uprave«, što — kad je riječ o jugoslavenskim brodovima — znači, da sve mora biti pregledano i potvrđeno od strane Jugoslavenskog registra brodova.

brod: M/b »DINARA«

PLAN TERETA

putovanje: _____
datum polaska: _____



Sl. 11.6. Plan tereta za M/b »DINARA« za putovanje Baie Comeau — Valencia pri prijevozu rasute soje

11.6. Proračunavanje kuta nagiba bređa pri prijevozu žitarica. Da bi se mogao zadovoljiti drugi uvjet stabilnosti za žitarice, kako je to već objašnjeno u t. 11.2, potrebno je proračunati kut bočnog nagiba φ koji bi mogao biti prouzročen pomicanjem žita u datim uvjetima punoće pojedinih skladišta i ostalih teretnih prostorija broda. Taj kut kao $\text{tg } \varphi$ (engl. *tangent angle of heel*) računa se ovako:

$$\text{tg } \varphi = \frac{\text{Ukupni moment nagiba}}{D \cdot M_0 G_0}$$

Ukupni moment nagiba (engl. *total heeling moment*) dobije se na već opisan način u t. 11.4.

Prema Konvenciji SOLAS pretpostavlja se da se težište nekoga teretnog prostora koje je do vrha puno žitom nalazi u volumetričkom težištu čitavoga teretnog prostora. Međutim, prema slovu Konvencije »uprava« može zahtijevati da se kod nekog broda uzmu u obzir potpalubne praznine ili neke druge praznine u skladištima, pa je tada težište prostora nešto niže od volumetričkog težišta. U tom slučaju mora se uzeti u obzir nepovoljni učinak vertikalnog pomicanja tereta. Da bi se tako postupilo, mora se moment nagiba svakog skladišta, odnosno teretnog prostora, pomnožiti tzv. faktorom C.

Spomenuti faktor C iznosi:

- za puna skladišta, odnosno pune teretne prostore $C = 1,06$;
- za djelomično puna skladišta, odnosno djelomično pune teretne prostore $C = 1,12$.

U praksi se u ovom slučaju postupa tako da se posebno izračuna ukupni moment nagiba za sva puna skladišta i tako dobiveni ukupni moment pomnoži sa 1,06. Isti postupak se ponovi za sva djelomično puna skladišta i tako dobiveni ukupni moment pomnoži sa 1,12. Ako sada zbrojimo ove momente, dobit ćemo ukupni moment nagiba broda ispravljen za faktor C.

11.7. Proračun rezerve dinamičke stabilnosti pri prijevozu žitarica. Radi provjeravanja trećeg uvjeta stabilnosti pri prijevozu žitarica, a prema objašnjenju datom u t. 11.2, potrebno je na milimetarskom papiru ili na tzv. kanadskom formularu (sl. 11.7) konstruirati krivulju statičke stabilnosti broda do kuta nagibanja $\varphi = 40^\circ$ i krivulju momenta nagiba, također do kuta nagiba $\varphi = 40^\circ$. Površina između tako dobivene krivulje statičke stabilnosti i krivulje momenta nagiba predstavlja rezervu dinamičke stabilnosti (engl. *residual dynamic stability*), što nam je i otprije poznato, ako se prisjetimo tumačenja u t. 9.2. i 9.3. Ova rezerva dinamičke stabilnosti, prikazana kao površina, mora se prema Konvenciji SOLAS izraziti u metar-radijanima, što će biti podrobno opisano u praktičnom primjeru na kraju.

Krivulju statičke stabilnosti broda konstruirat ćemo na temelju dobivenog deplasmana broda (račun stabilnosti) i dijagrama S krivulja, na način kako je to već objašnjeno u t. 6.3.

Krivulja momenta nagiba ili, točnije, krivulja poluge momenta nagiba konstruira se tako da se proračuna poluga nagiba za ravan brod (λ_0) i za kut nagiba od 40° (λ_{40}). Tako dobivene vrijednosti za λ_0 i λ_{40} unesu se u isti koordinatni sustav na kome se crta krivulja poluge statičke stabilnosti, jer se na apscisi nalaze kutovi nagiba broda za svakih 5 ili 10 stupnjeva, dok se na ordinati nanesu linearne vrijednosti poluge momenta nagiba u metrima (pri konstrukciji krivulje statičke stabilnosti na ordinatu nanosimo vrijednosti \overline{GH} poluga, također u metrima).

Poluga momenta nagiba za ravan brod računa se po ovoj formuli:

$$\lambda_0 = \overline{M_0 G_0} \cdot \text{tangens kuta nagiba}$$

Međutim, poluga momenta nagibanja za kut nagiba broda od 40 stupnjeva računa se ovako:

$$\lambda_{40} = 0,80 \cdot \lambda_0$$

Ukoliko je pri proračunu kuta nagiba bio uzet u obzir i faktor C, tada ga treba uzeti u obzir i pri proračunu poluge momenta nagiba za $\varphi = 40^\circ$. U tom slučaju faktor C računa se tako da se prvo izračuna njegova vrijednost za puna skladišta, a zatim za djelomično puna skladišta, odnosno teretne prostore.

U ovom slučaju faktor C za puna skladišta računa se ovako:

$$\text{Faktor } C = \frac{0,08843}{D} \cdot \text{ukupni nagibni moment za puna skladišta}$$

dok se taj isti faktor za djelomično puna skladišta računa na ovaj način:

$$\text{Faktor } C = \frac{0,15389}{D} \cdot \text{ukupni nagibni moment za djelomično puna skladišta.}$$

Ovako dobivene vrijednosti za faktor C moraju se zbrojiti i zatim pribrojiti proračunatoj vrijednosti poluge λ_{40} . Kada vrijednosti za λ_0 i λ_{40} unesemo u koordinatni sustav (sl. 11.7), dobijemo dvije točke koje obilježimo sa A i B. Kada se na koordinatnom sustavu ove dvije točke spoje, dobije se krivulja poluge momenta nagiba AB. Kada bismo htjeli što točnije konstruirati krivulju momenta nagiba, tada bismo trebali izračunavati poluge momenta nagiba i za kutove $\varphi = 10^\circ$, $\varphi = 20^\circ$ i $\varphi = 30^\circ$ (poluge λ_{10} , λ_{20} i λ_{30}). U tom slučaju spojnica AB bila bi blaga krivulja.

Ako se konstruirane krivulje statičke stabilnosti i momenta nagiba sijeku kod proračunatog kuta nagiba, to služi kao dokaz da je proračun pretpostavljenog nagiba broda bio točan.

Primjer

Brod za rasuti teret M/b »DINARA« treba da u kanadskoj luci Baie Comeau (šire područje luke Montreal) ukrca 26 000 tona soje za španjolsku luku Valencia. Prevaljeni put iznosi 3 600 nm, a trajanje putovanja deset dana. Maksimalni dopušteni deplasman broda je 33 376 tona, a srednji gaz broda je $T_s = 10,533$ m.

Dimenzije broda su: duljina među okomicama $L = 171,7$ m, širina $B = 22,4$ m i gaz $T = 10,53$ m. Ukupna nosivost broda je 26 962 t, bruto registarska zapremina je 15 398 BRT i neto registarska zapremina 10 986 NRT. Ekonomska brzina broda je 16 čv, a utrošak goriva za 24 sata je 36 t (teško ulje).

Teret je homogen, i to rasuta soja, čiji faktor slaganja je $f_s = 1,36$ m³, a specifična gustoća $\rho' = 0,73527$.

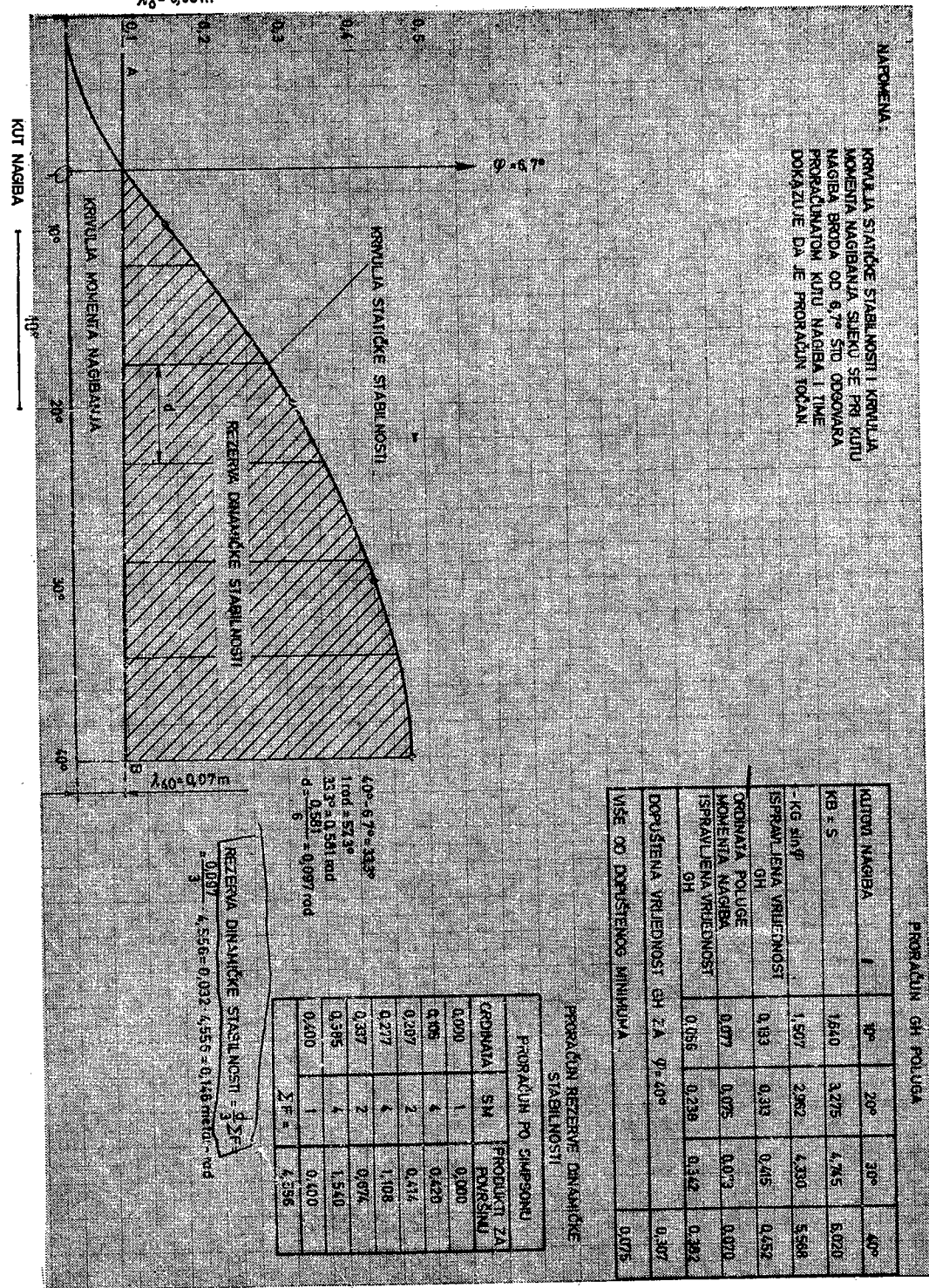
Brod ima ukupno sedam skladišta za teret, čiji je ukupni kapacitet za žito 31 431 m³, zatim sedam prostranih grotala ukupnog kapaciteta za žito 1 103 m³ i 14 potpalubnih (krilnih) tankova čiji je ukupni kapacitet za žito 3 216 m³, s tim što na svako skladište otpada po jedan potpalubni tank lijevo i desno.

Kapacitet za žito pojedinih skladišta iznosi:

Skladište broj 1	3 834 m ³
Skladište broj 2	4 637 m ³
Skladište broj 3	5 121 m ³
Skladište broj 4	3 278 m ³
Skladište broj 5	4 924 m ³
Skladište broj 6	5 537 m ³
Skladište broj 7	4 100 m ³
Ukupno skladišta	31 431 m³

Handwritten notes:
 $f_s = 1,36$
 $\rho' = 0,73527$

Handwritten notes:
 106
 106
 106



Sl. 11.7. Proračun rezerve dinamičke stabilnosti pri prijevozu žitarica obavljen na milimetarskom papiru

M/B „DINARA“ PRORAČUN REZERVE DINAMIČKE STABILNOSTI

Ukupni kapacitet balasta (tankovi dvodna broj 1 do 6, pramčani pik ank, dva krmena pik tanka, dva duboka tanka i skladište broj 4 s grotom) je 7 976 m³ odnosno 8 177 t morske vode. Kad se uračunaju i potpalubni tankovi, tada je ukupni kapacitet balasta 11 192 m³ odnosno 11 473 t morske vode.

Potrebno je:

- 1) Sastaviti plan tereta
- 2) Obaviti sve potrebne proračune i provjeriti sve uvjete stabilnosti za bitarice prema odredbama VI glave Konvencije SOLAS. Prema tome, potrebno je proračunati:
 - a) početnu metacentarsku visinu za brod u odlasku i za brod u dolasku;
 - b) kut stalnog nagiba broda zbog pomicanja žita;
 - c) rezervu dinamičke stabilnosti broda.

Tablica V

RAČUN CENTRACIJE: PRAZAN BROD I TERET

Naziv	Masa (t)	Udaljenost težišta od osnovke (z) (m)	Moment po visini (t m)
Prazan brod	6 414	9,33	59 843
Oprema	150	12,69	1 904
Skladište broj 1	2 864	8,33	23 857
Skladište broj 2	3 466	7,83	27 139
Skladište broj 3	3 829	7,85	30 058
Skladište broj 4	2 451	7,94	19 461
Skladište broj 5	3 680	7,85	28 888
Skladište broj 6	4 139	7,84	32 450
Skladište broj 7	3 049	7,95	24 239
Grotlo broj 1	105	15,46	1 623
Grotlo broj 2	122	15,16	1 849
Grotlo broj 3	139	15,16	2 107
Grotlo broj 4	81	15,16	1 228
Grotlo broj 5	139	15,16	2 107
Grotlo broj 6	147	15,16	2 228
Grotlo broj 7	105	15,16	1 592
Potpalubni tankovi	1 773	13,01	23 067
Ukupno	32 653	—	283 640

Tablica VI

RAČUN STABILNOSTI

Naziv	ODLAZAK BAIE COMEAU			DOLAZAK VALENCIA		
	Masa (t)	Udaljenost težišta od osnovke (z) (m)	Moment tromosti po visini slob. povr. (t m)	Masa (t)	Udaljenost težišta od osnovke (z) (m)	Moment tromosti po visini slob. povr. (t m)
Tank broj 5 — teško ulje	70	0,90	63	—	—	—
Tank broj 6 — teško ulje	346	0,90	311	73	0,20	15
Tank broj 59 — teško ulje	31	12,62	391	30	12,62	379
Tank broj 60 — teško ulje	57	12,66	722	55	12,66	698
Tank broj 61 — teško ulje	23	12,60	290	22	12,60	277
Tank broj 58 — plinsko ulje	45	12,63	568	25	12,20	305
Tank broj 62 — plinsko ulje	10	12,65	126	10	12,65	126
Tank broj 63 — plinsko ulje	10	12,66	127	10	12,66	127
Tank broj 64 — ulje za podmazivanje	13	12,67	165	13	12,67	165
Tank broj 65 — ulje za podmazivanje	17	12,68	215	17	12,68	215
Tank broj 67 — ulje za podmazivanje	5	12,70	63	2	12,70	25
Tank broj 16 — pitka voda	60	12,90	774	60	12,90	774
Tank broj 51 — pitka voda	12	1,10	13	12	1,10	13
Tank broj 57 — pitka voda	9	1,05	9	9	1,05	9
Napojni tank pitke vode	15	20,70	310	12	20,70	248
Ukupno	723	—	4 147	350	—	3 374
Prazan brod i teret	32 653	—	283 640	32 653	—	283 640
Svega ukupno	33 376	—	287 787	33 003	—	287 014

$$\begin{aligned} M_0G_0 &= KM_0 - KG_0 \\ KG_0 &= \frac{\sum M}{D} = \frac{287\,787}{33\,376} = 8,62 \text{ m} \\ \Delta MG &= \frac{\sum z}{D} = \frac{1\,378}{33\,376} = 0,04 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_0G_0 &= KM_0 - KG_0 \\ KG_0 &= \frac{\sum M}{D} = \frac{287\,014}{33\,003} = 8,66 \text{ m} \\ \Delta MG &= \frac{\sum z}{D} = \frac{928}{33\,003} = 0,03 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} KM_0 &= 9,41 \text{ m} \\ KG_0 &= 8,62 \text{ m} \\ \Delta MG &= 0,04 \text{ m} \\ M_0G_0 &= 0,78 \text{ m} \end{aligned}$$

Napomena

Pri proračunima potrebno je uzeti u obzir tzv. faktor C zbog vertikalnog pomicanja tereta žita.

Rješenje

*Ad 1) Plan rasporeda tereta soje pokazuje sl. 11.6.

Ad 2)

a) Vidi tablice V i VI!

Kako se iz računa stabilnosti vidi, početna metacentarska visina broda u polasku je $M_0G_0 = 0,78 \text{ m}$, a broda u dolasku $M_0G_0 = 0,72 \text{ m}$, što znači da je u potpunosti zadovoljen treći uvjet 4. pravila VI glave Konvencije SOLAS.

b) Proračun ukupnog momenta nagiba za M/b »DINARU« u ovom konkretnom slučaju je ovakav:

Teretna prostorija	Visina žita	Faktor slaganja (m ³)	Volumetrički moment (m ⁴)	Nagibni moment (t m)
Skladište br. 1	puno	1,36	482	354,4
Skladište br. 2	puno	1,36	414	304,4
Skladište br. 3	puno	1,36	464	341,2
Skladište br. 4	puno	1,36	304	223,5
Skladište br. 5	puno	1,36	448	329,4
Skladište br. 6	puno	1,36	492	361,8
Skladište br. 7	puno	1,36	372	273,5
Krilni tank. 1	26% praz.	1,36	103	75,7
Krilni tank. 2	26% praz.	1,36	137	100,7
Krilni tank. 3	26% praz.	1,36	146	107,4
Krilni tank. 4	26% praz.	1,36	95	69,4
Krilni tank. 5	26% praz.	1,36	140	102,9
Krilni tank. 6	26% praz.	1,36	157	115,4
Krilni tank. 7	26% praz.	1,36	118	86,8
Ukupno:			3 872	2 847,0

Pretpostavljeni kut nagiba broda, ne uzimajući u obzir faktor C, bit će:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\text{Ukupni moment nagiba}}{D \cdot M_0G_0}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\,847}{33\,376 \cdot 0,78}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = 0,109\,36$$

Kut nagiba (engl. *angle of heel*) je:

$$\varphi = 6,3^\circ$$

Ako želimo uzeti u obzir vertikalnu komponentu, tj. faktor C , tada moramo izračunati ukupni moment nagiba za puna skladišta, odnosno teretne prostorije broda, a potom ukupni moment nagiba za djelomično puna skladišta.

Taj će proračun u ovom konkretnom slučaju biti:

- ukupni moment nagiba za puna skladišta = $1,06 \cdot 2\,188,2 = 2\,319,5 \text{ t m}$
- ukupni moment nagiba za djelomično pune prostore = $1,12 \cdot 658,5 = 737,8 \text{ t m}$

$$\text{Ukupni moment nagiba ispravljen za faktor } C = 3\,057,3 \text{ t m}$$

Sada će kut nagiba biti:

$$\text{tg } \varphi = \frac{\text{ukupni moment nagiba ispravljen za faktor } C}{D \cdot M_0 G_0}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{3\,057,3}{33\,376 \cdot 0,78} = 0,117\,43$$

$$\varphi = 6,7^\circ$$

Budući da je pretpostavljeni kut stalnog nagiba broda zbog pomicanja žita manji od 12 stupnjeva, to znači da je zadovoljen i prvi uvjet Konvencije SOLAS.

c) Konstrukcija krivulje momenta nagiba i krivulje statičke stabilnosti za ovaj konkretni slučaj prikazana je na sl. 11.7. Šrafirana površina na slici predstavlja rezervu dinamičke stabilnosti broda.

Međutim, da bismo mogli konstruirati krivulju momenta nagiba bilo je potrebno proračunati vrijednosti poluga nagiba λ_0 i λ_{40} .

Polugu nagiba za ravan brod (λ_0) izračunali smo ovako:

$$\lambda_0 = \overline{M_0 G_0} \cdot \text{tg } \varphi = 0,78 \cdot 0,109\,36$$

$$\lambda_0 = 0,0853 \text{ m}$$

$$\lambda_0 = 0,08 \text{ m}$$

Polugu nagiba za $\varphi = 40^\circ$ izračunali smo ovako:

$$\lambda_{40} = 0,80 \cdot \lambda_0 = 0,80 \cdot 0,08$$

$$\lambda_{40} = 0,0640 \text{ m}$$

$$\lambda_{40} = 0,06 \text{ m}$$

= 26033,28

Međutim, kako moramo uzeti u obzir i faktor C , potrebno je i njega izračunati, i to posebno za puna skladišta, a posebno za djelomično puna skladišta.

Taj faktor za puna skladišta bit će $\bar{C} = \frac{0,088\,43}{D} \cdot \text{ukupni moment nagiba za puna skladišta}$, prema tome:

$$C = \frac{0,088\,43}{33\,376} \cdot 2\,319,5$$

$$C = 0,0058$$

Taj isti faktor za djelomično puna skladišta bit će:

$$C = \frac{0,153\,89}{D} \cdot \text{ukupni moment nagiba za djelomično puna skladišta}$$

$$C = \frac{0,153\,89}{33\,376} \cdot 737,8$$

$$C = 0,0034$$

Ukupni faktor $C = 0,0058 + 0,0034 \approx 0,01$

U ovom slučaju poluga momenta nagiba za $\varphi = 40^\circ$ bit će:

$$\lambda_{40} = 0,06 + 0,01 = 0,07 \text{ m}$$

$$\lambda_{40} = 0,07 \text{ m}$$

Kada se na dijagramu, tj. na koordinatnom sustavu, ucrtanom na milimetarskom papiru, (sl. 11.8) nanese u odgovarajućem mjerilu vrijednosti za poluge λ_0 i λ_{40} i spoje točke A i B, dobije se krivulja poluge momenta nagiba. Iz tako dobivene krivulje izvade se vrijednosti za λ_{10} , λ_{20} i λ_{30} i upišu u tablicu proračuna GH poluga na samom dijagramu (sl. 11.7). Ove su nam vrijednosti potrebne kako bismo mogli korigirati GH poluge i tako nacrtati na istom dijagramu dio krivulje statičke stabilnosti do kuta nagiba broda $\varphi = 40^\circ$, iako se taj dio krivulje može zasebno konstruirati na temelju punih vrijednosti GH poluga za $\varphi = 10^\circ$, 20° , 30° i 40° .

Nakon ucrtavanja krivulje momenta nagiba i krivulje statičke stabilnosti, moramo pomoću I Simpsonove formule izračunati površinu između ovih dviju krivulja (šrafirani dio na sl. 11.7), što, u stvari, predstavlja rezervu dinamičke stabilnosti broda.

U našem slučaju ovu površinu što predstavlja rezervu dinamičke stabilnosti podijelili smo u šest pojasa, što znači da imamo sedam ordinata i tako stvorili uvjet za proračun po I Simpsonovoj formuli (vidi posebnu tablicu za proračun po Simpsonu na sl. 11.7).

Budući da ordinate imaju linearnu vrijednost u metrima, njihovu vrijednost izvadimo iz konstruiranog dijagrama u mjerilu ordinate koordinatnog sustava. Međutim, razmak među ordinatama (d) moramo izraziti u radijanima ($1 \text{ radijan} = 57,3^\circ$), zbog čega je i dobiveni rezultat izražen u metar-radijanima.

Budući da u našem slučaju rezerva dinamičke stabilnosti iznosi 0,146 metar-radijana (sl. 11.7), to znači da je u potpunosti zadovoljen i treći uvjet konvencije SOLAS koji se odnosi na stabilnost kod prijevoza žitarica.

Iz konstruiranog dijagrama nadalje se vidi da se krivulja momenta nagiba i krivulja statičke stabilnosti sijeku kod kuta nagiba broda od 6,7°, što je dokaz da je proračun pretpostavljenog kuta nagiba broda bio točan.

11.8. Proračun uvjeta stabilnosti za žitarice po tzv. američkoj metodi. Konvencija za zaštitu ljudskih života na moru, propisujući uvjete stabilnosti broda pri pomorskom prijevozu žitarica, nije se upuštala u to na koji način će se ti uvjeti proračunavati, što je i razumljivo. Način proračuna tih uvjeta kakav je predočen u praktičnom primjeru u prethodnoj točki 11.7. je kanadska metoda proračuna i obvezan je za brodove svih zastava kada krcaju bilo koje žitarice ili sličan rasuti teret (npr. stočna hrana kao što su »citrusne kuglice« [engl. *citrus pulp pellets*] i sl.) u bilo kojoj kanadskoj luci, a Kanada je poznat izvoznik žitarica.

Kada proanaliziramo kanadsku metodu proračunavanja uvjeta stabilnosti za žitarice, vidimo da nešto više glavobolje zadaje pomorcima način proračunavanja rezerve dinamičke stabilnosti, dakle proračunavanje drugog uvjeta stabilnosti. Za proračunavanje ostalih dvaju uvjeta, a to je početna metacentarska visina i kut nagiba za brod u polasku i za brod u dolasku, tu je metoda proračunavanja ista, jer drukčije ne može ni biti, bez obzira na to o kojoj se pomorskoj zemlji, izvoznici žitarica radi. Na sl. 11.8. vidi se dio propisanoga kanadskog formulara za proračun uvjeta stabilnosti za žitarice koji se odnosi na proračun rezerve dinamičke stabilnosti.

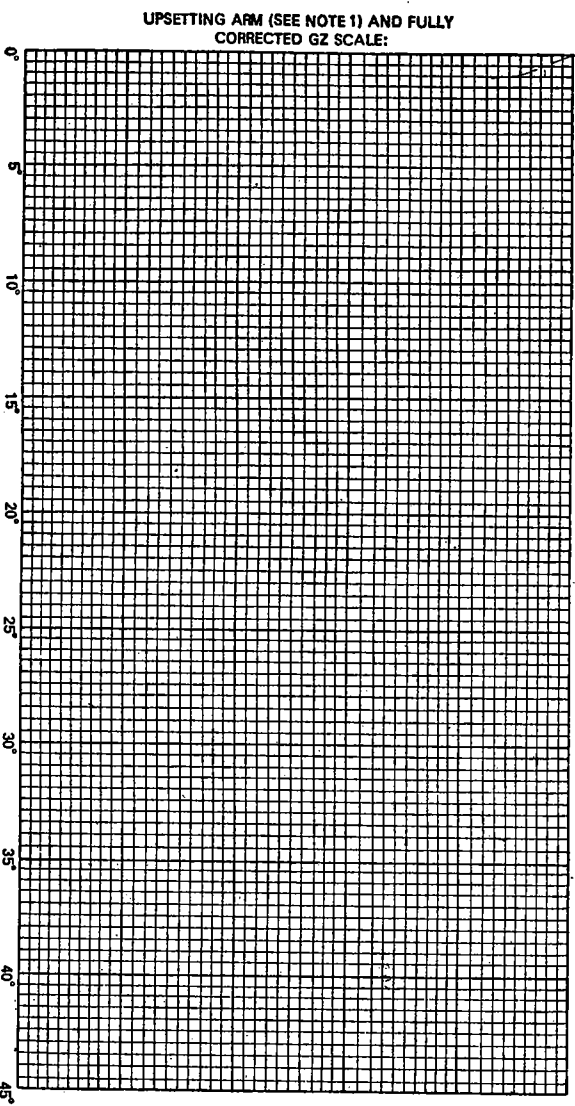
Međutim, napomenimo da po kanadskim propisima nije potrebno posebno proračunavati rezervu dinamičke stabilnosti na način prikazan u primjeru u t. 11.7. i na sl. 11.7 ako vrijednost poluge \overline{GH} pri kutu nagiba broda od 40°, ispravljena za vrijednost poluge momenta nagiba, iznosi više od 0,307 m, jer se smatra da brod tada ima zadovoljavajuću vrijednost rezerve dinamičke stabilnosti. Osim toga, dobiveni rezultat mora biti približno sličan tipičnom primjeru krcanja iz instruktorske knjige za žito. Ako je korigirana poluga \overline{GH} manja ili ako nije slična tipičnom primjeru krcanja iz instruktorske knjige, tada je potrebno crtati krivulju poluga momenta statičke stabilnosti i krivulju poluga momenta nagiba i točno proračunati rezervu dinamičke stabilnosti onako kako je to prije objašnjeno i prikazano na sl. 11.7.

Američka metoda proračuna uvjeta stabilnosti za žitarice, koju je inače propisao Američki ured za teret (*National Cargo Bureau*) znatno je pojednostavila način proračunavanja rezerve dinamičke stabilnosti broda.

Po američkoj metodi rezerva dinamičke stabilnosti u metar-stupnjevima dobije se kao površina trokuta ABC na sl. 11.9. Na sl. 11.9. vidimo da odbijajući od 40° proračunati kut nagiba zbog pomicanja žita dobijemo pravac \overline{AB} izražen u stupnjevima. Ako sada od poluge momenta statičke stabilnosti za kut nagiba od 40° odbijemo vrijednost poluge momenta nagibanja (λ_{40}), dobit ćemo pravac \overline{BC} . Ako zatim pomnožimo ove dvije duljine i dobiveni produkt podijelimo sa dva, dobit ćemo površinu trokuta ABC u metar-stupnjevima. Iz slike vidimo da ta površina približno odgovara stvarnoj površini rezerve dinamičke stabilnosti. Iako američki propis predviđa da se proračunata vrijednost rezerve dinamičke stabilnosti izrazi u metar-stupnjevima, ona se može lako proračunati u metar-radijane, kako to predviđa Konvencija SOLAS.

TABLE IX

TO DETERMINE RESIDUAL AREA BETWEEN THE UPSETTING ARM CURVE AND RIGHTING ARM CURVE



SIMPSON'S PRODUCT FOR AREA	SELECTED PRODUCT FOR AREA
1	1
4	4
2	2
4	4
2	2
4	4
1	1
SUM OF PRODUCTS	

AREA UNDER CURVE = $\frac{\text{SELECTED INTERVAL} \times \text{SUM OF PRODUCTS}}{3}$

FT. DEGREES

MINIMUM REQUIREMENT = 14.104 FT. DEGREES

4.286 M. DEGREES

CORRECTION OF GZ VALUES	
ANGLES OF HEEL	5° 10° 15° 20° 25° 30° 35° 40° 45°
GZ VALUE FROM CROSS CURVES	
CORRECTIONS FOR DIFF. OF KG'S	
1st CORRECTED GZ VALUES (SEE NOTE III)	
UPSETTING ARM ORDINATES (SEE NOTE II)	
FULLY CORRECTED GZ VALUES	

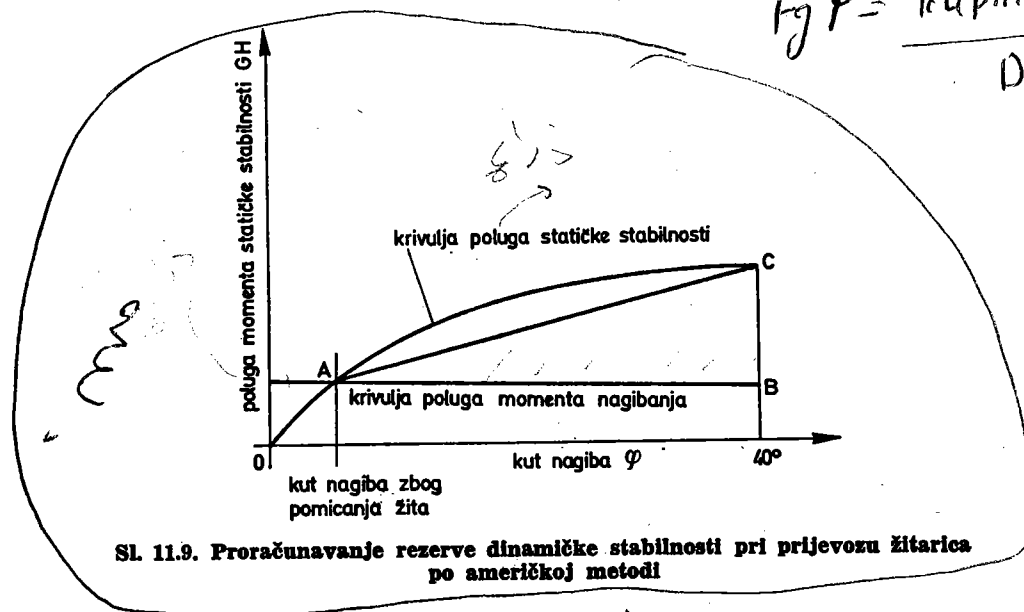
NOTE I THE UPSETTING ARM CURVE IS A STRAIGHT LINE CONSTRUCTED BETWEEN THE FOLLOWING TWO VALUES:
 AT 0° = GM (TABLE III) X TAN ANGLE OF HEEL.
 AT 40° = GM (TABLE III) X TAN ANGLE OF HEEL X .8

NOTE II USE ORDINATES FROM UPSETTING ARM CURVE TO CORRECT GZ VALUES
 NOTE III IF VESSEL IS PROVIDED WITH KN CURVES RATHER THAN GZ CURVES THE 1st CORRECTED GZ VALUES ARE OBTAINED BY:
 $GZ = KN - KG \sin \theta$

Sl. 11.8. Dio propisanog kanadskog formulara za proračun uvjeta stabilnosti za žitarice koji se odnosi na proračunavanje rezerve dinamičke stabilnosti

Ukoliko ovako proračunata vrijednost rezerve dinamičke stabilnosti ne zadovoljava zahtijevani minimum od 4,30 metar-stupnjeva, tada je potrebno konstruirati obje krivulje do kuta nagiba od 40° i točno izračunati rezervu dinamičke stabilnosti s pomoću Simpsonove formule na način već objašnjen u t. 11.7. i na sl. 11.7.

Na kraju napomenimo da Amerikanci rezervu dinamičke stabilnosti računaju u metar-stupnjevima iako Konvencija SOLAS zahtijeva da to bude u metar-radijanima. Međutim, to je u biti isto.



Primjer

Brod za rasuti teret M/b »DINARA« treba u američkoj luci Duluth (Lake Superior, savezna država Minnesota) da ukrca 14 864 tone sjemena suncokreta (engl. *sunflower*) za Rotterdam. Prevaljeni put iznosi 3 600 nm, a trajanje putovanja deset dana. Maksimalni dopušteni depasman broda pri ljetnoj teretnoj liniji je 33 376 t, srednji gaz broda 10,533 m i visina nadvođa 3,718 m. Planirani je datum isplovljenja 26. travnja 1978. godine. Brod će svratiti u usputnu luku Montreal radi nadopune zaliha (engl. *bunkering port*).

Teret je homogen, i to suncokretovo sjemenje, čiji je faktor slaganja $f_s = 2,31 \text{ m}^3$.

Brod ima ukupno sedam skladišta za teret, čiji je ukupni kapacitet za žito $31\,431 \text{ m}^3$, zatim sedam grotala ukupnog kapaciteta za žito $1\,103 \text{ m}^3$ i sedam lijevih i sedam desnih potpalubnih (krilnih) tankova, čiji je ukupni kapacitet za žito $3\,216 \text{ m}^3$.

Za ovo su putovanje sva skladišta, uključujući i grotla, i svi krilni tankovi do vrha puni teretom.

U svezi s ovim putovanjem broda potrebno je obaviti sve proračune i provjeriti uvjete stabilnosti za žitarice u skladu s odredbama VI glave Konvencije SOLAS, s tim što će se u proračunavanju primijeniti tzv. američka metoda proračunavanja.

U skladu s tim potrebno je proračunati:

1) Početnu metacentarsku visinu za brod u odlasku, za usputnu luku i za brod u dolasku.

2) Kut stalnog nagiba broda zbog pomicanja žita za brod u odlasku i brod u dolasku.

3) Rezervu dinamičke stabilnosti broda za brod u odlasku i brod u dolasku.

Rješenje

Ad 1) Vidi tablice VII i VIII!

Ad 2) Vidi tablice IX, X i XI!

Ad 3) Vidi tablice X i XI!

Tablica VII

RAČUN CENTRACIJE: PRAZAN BROD I TERET

Naziv	Masa (t)	Udaljenost težišta od osnovke (z) (m)	Moment po visini (t m)
Prazan brod	6 414	9,33	59 843
Oprema	143	12,97	1 855
Skladište broj 1	1 657	8,33	13 803
Skladište broj 2	2 005	7,83	15 699
Skladište broj 3	2 214	7,85	17 380
Skladište broj 4	1 417	7,94	11 251
Skladište broj 5	2 129	7,85	16 713
Skladište broj 6	2 394	7,84	18 769
Skladište broj 7	1 772	7,95	14 087
Grotlo broj 1	61	15,46	943
Grotlo broj 2	71	15,16	1 076
Grotlo broj 3	80	15,16	1 213
Grotlo broj 4	47	15,16	712
Grotlo broj 5	80	15,16	1 213
Grotlo broj 6	85	15,16	1 289
Grotlo broj 7	52	15,16	788
Krilni tankovi 1—7	800	13,01	10 408
Ukupno	21 421	—	187 051

RAČUN STABILNOSTI

NAZIV	ODLAZAK DULUTH			USPUTNA LUKA MONTREAL			DOLAZAK ROTTERDAM					
	Masa (t)	Udaljenost težišta od osnovke (z) (m)	Moment po visini (t m)	Moment tronosti slob. povr. (t m)	Masa (t)	Udaljenost težišta od osnovke (z) (m)	Moment po visini (t m)	Moment tronosti slob. povr. (t m)	Masa (t)	Udaljenost težišta od osnovke (z) (m)	Moment po visini (t m)	Moment tronosti slob. povr. (t m)
Tank broj 6 — teško ulje	6	1,22	34	1 209	300	0,90	180	504	45	1,22	55	1 209
Tank broj 7 — teško ulje	28	12,63	303	53	24	12,63	276	1 209	24	12,63	303	53
Tank broj 59 — teško ulje	55	12,63	633	130	50	12,63	633	130	50	12,63	633	130
Tank broj 60 — teško ulje	55	12,63	633	130	22	12,63	353	9	22	12,63	353	9
Tank broj 61 — teško ulje	55	12,63	633	130	9	12,63	114	18	9	12,63	114	18
Tank broj 62 — plin. ulje	901	12,63	101	16	8	12,63	101	16	8	12,63	101	16
Tank broj 63 — plin. ulje	91	12,63	316	114	50	12,63	631	114	25	12,63	316	114
Tank broj 64 — plin. ulje	91	1,05	26	46	50	1,05	53	46	25	1,05	26	46
Tank broj 65 — ulje za podmaz.	52	12,63	203	16	16	12,63	203	16	16	12,63	203	16
Tank broj 67 — ulje za podmaz.	52	12,70	63	5	5	12,70	63	4	5	12,70	63	4
Tank broj 16 — pitka voda	9	13,00	1 300	91	100	13,00	1 300	91	100	13,00	1 300	91
Tank broj 16 — sredinji — pitka voda	40	12,90	516	51	40	12,90	516	51	40	12,90	516	51
Napojni tank pitke vode	25	20,76	519	7	25	20,76	519	7	20	20,76	415	7
Tank broj 51 — pitka voda	17	1,10	19	2	17	1,10	19	2	17	1,10	19	2
Tank broj 57 — pitka voda	13	1,05	14	10	13	1,05	14	10	13	1,05	14	10
Francani pik-tank — balast	522	6,63	3 461	366	—	—	—	—	—	—	—	—
Tank broj 2 — balast	704	1,30	915	3 390	—	—	—	—	—	—	—	—
Ukupno	1 639	—	8 890	5 632	900	—	4 763	2 309	435	—	4 431	1 866
Prazan brod i teret	21 431	—	187 051	—	21 431	—	187 051	—	21 431	—	187 051	—
Svega ukupno	23 069	—	195 941	5 632	23 221	—	191 814	2 309	21 866	—	191 482	1 866

$$\begin{aligned} M_0G_0 &= KM_0 - KG_0 \\ KG_0 &= \frac{\sum M}{D} = \frac{195 941}{23 069} = 8,50 \text{ m} \\ \Delta MG &= \frac{\sum Y}{D} = \frac{5 632}{23 069} = 0,24 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_0G_0 &= KM_0 - KG_0 \\ KG_0 &= \frac{\sum M}{D} \\ KG_0 &= \frac{191 814}{23 221} = 8,26 \text{ m} \\ \Delta MG &= \frac{\sum Y}{D} \\ \Delta MG &= \frac{2 309}{23 221} = 0,10 \text{ m} \\ \Delta MG &= \frac{1 866}{21 846} = 0,08 \text{ m} \end{aligned}$$

Tablica IX

PRORAČUN UKUPNOGA NAGIBNOG MOMENTA

Teretna prostorija	Visina žita	Volumetrički moment (m³)	Faktor slaganja (m³)	Nagibni moment (t m)
Skladišta 1—7	do vrha puna	2 976,80	2,31	1 288,65
Krilni tankovi 1—7	do vrha puni	895,10	2,31	387,49
Ukupno	—	3 871,90	2,31	1 676,14

Tablica X

PRORAČUNI

M/b «DINARA»

ODLAZAK DULUTH

Napomena: U skladu s odredbama VI glave Konvencije SOLAS od 1974. godine plovidba se obavlja u uvjetima dopuštenoga ukupnog nagibnog momenta (ista klauzula na engl. jeziku: »To chapter VI, SOLAS 1974, when no maximum allowable heeling moments are provided«).

- Ukupni nagibni moment (1) 1 676,14 t m
- Deplasman (2) 23 060 t
- Početa metacentarska visina $\overline{M_0G_0}$ (3) 0,56 m
- Kut nagiba φ čiji je $\text{tg } \varphi = \frac{(1)}{(2) \cdot (3)}$ (4) 7,4°
- Poluga stat. mom. stabilnosti za $\varphi = 40^\circ$ (5) 1,00 m
- Poluga mom. nagiba $\lambda_0 = \frac{(1)}{(2)}$ (6) 0,07 m
- Poluga mom. nagiba $\lambda_{40} = 0,8 \cdot (6)$ (7) 0,06 m
- Poluga rez. dinamičke stab. kod $\varphi = 40^\circ$ je (5) — (7) (8) 0,94 m
- Opseg rez. din. stab. do kuta $\varphi = 40^\circ$ je $40^\circ - (4)$ (9) 32,6°
- Rezerva dinamičke stabilnosti = $\frac{(8) \cdot (9)}{2}$ (10) 15,3 metar-stupnja

Zahtijevani minimum prema Konvenciji SOLAS:

- (3) Mora biti veća od 0,3 m.
- (4) Mora biti manji od 12°.
- (10) Mora biti veća od 4,30 metar-stupnja, odnosno 0,075 metar-radijana.

PRORAČUNI

M/b »DINARA«

DOLAZAK ROTTERDAM

Napomena: U skladu s odredbama VI glave Konvencije SOLAS od 1974. godine plovidba se obavlja u uvjetima dopuštenoga ukupnog nagibnog momenta (ista klauzula na engl. jeziku: »To chapter VI, SOLAS 1974, when no maximum allowable heeling moments are provided«).

Ukupni nagibni moment	(1) . . .	1 676,14 t m
Deplasman	(2) . . .	21 846 t
Početna metacentarska visina $\overline{M_0G_0}$	(3) . . .	0,53 m
Kut nagiba φ čiji je $\text{tg } \varphi = \frac{(1)}{(2) \cdot (3)}$	(4) . . .	8,3°
Poluga stat. mom. stabilnosti za $\varphi = 40^\circ$	(5) . . .	1,00 m
Poluga mom. nagiba $\lambda_0 = \frac{(1)}{(2)}$	(6) . . .	0,08 m
Poluga mom. nagiba $\lambda_{40} = 0,8 \cdot (6)$	(7) . . .	0,06 m
Poluga rez. dinamičke stab. kod $\varphi = 40^\circ$ je (5) — (7)	(8) . . .	0,94 m
Opseg rez. din. stab. do kuta $\varphi = 40^\circ$ je 40° — (4)	(9) . . .	31,7°
Rezerva dinamičke stabilnosti $\frac{(8) \cdot (9)}{2}$	(10) . . .	14,90 metar- stupnjeva

Zahtijevani minimum prema Konvenciji SOLAS:

- (3) Mora biti veća od 0,3 m.
- (4) Mora biti manji od 12°.
- (10) Mora biti veća od 4,30 metar-stupnja, odnosno 0,075 metar-radiana.

PITANJA

1. Koji se rasuti tereti ubrajaju u sipke terete i što su to sipki rasuti tereti?
2. Koje svojstvo žitarica kao brodskog tereta nepovoljno utječe na stabilnost broda?
3. Koji su uvjeti stabilnosti broda pri prijevozu žitarica po odredbama VI glave Konvencije SOLAS?
4. Kakve su obveze zapovjednika broda prema lučkim vlastima u onim svjetskim lukama gdje brod krca žitarice?
5. Što je to volumetrički moment žita i kako se on računa za puna brodska skladišta?
6. Što je nagibni moment žita i kako se on računa?
7. Što su to »informacije« za krcanje žita predviđene Konvencijom SOLAS?
8. Tko u SFRJ mora potvrditi »informacije« za krcanje žita?
9. Na temelju kojih elemenata i na koji način se proračunava pretpostavljeni kut nagiba broda prouzrokovan pomicanjem, odnosno presipanjem tereta žitarica u brodskim skladištima?

10. Što je to učinak vertikalnog pomicanja tereta žita u brodskim skladištima i kada se smatra da taj učinak postoji?
11. Kako utječe učinak vertikalnog pomicanja tereta žita u brodskim skladištima na proračunavanje pretpostavljenog kuta nagiba broda?
12. Kako se konstruira krivulja nagibnog momenta za slučaj kad brod prevozi žitarice?
13. Što je to rezerva dinamičke stabilnosti broda pri prijevozu žitarica i kako se ona grafički prikazuje?
14. Kako se načelno crtaju na milimetarskom papiru krivulja statičke stabilnosti broda i krivulja nagibnog momenta?
15. Kako se proračunava rezerva dinamičke stabilnosti broda u metar-radijani-ma pri prijevozu žitarica pomoću I Simpsonove formule?
16. Kako se uzima u obzir učinak vertikalnog pomicanja tereta žita u brodskim skladištima pri konstrukciji krivulje nagibnog momenta broda?
17. U čemu je bit proračunavanja uvjeta stabilnosti za žitarice po tzv. američkoj metodi?

12. NAPLAVLJIVANJE BRODSKIH PROSTORA I PREGRADIVANJE TRGOVAČKIH BRODOVA

12.1. NAPLAVLJIVANJE BRODSKIH PROSTORA

12.1.1. Općenito o naplavlivanju brodskih prostora. Pod naplavlivanjem brodskih odjela razumije se ulazak vode u neki brodski prostor, bez obzira na to puni li se vodom namjerno cjevovodom ili voda ulazi zbog nastalog prodora na brodskom trupu.

Pri tome treba razlikovati tri mogućnosti:

a) Prostor ima vodonepropusni krov (paluba), a voda ispunjava cijeli taj prostor.

b) Prostor je s gornje strane otvoren (nema vodonepropusnog krova) ili je napunjen vodom samo djelomično, a nema spoja s vanjskom vodom (podvodni su ventili zatvoreni).

c) Prostor ima stalan spoj s vanjskom vodom, tj. ima prodor ili je podvodni ventil otvoren; prostor pri tome nema vodonepropusnog krova ili se on nalazi visoko pa se voda može slobodno širiti u visinu.

Prodor vode (engl. *leak*) posljedica je nastalih oštećenja na vanjskoj oplati broda zbog nasukanja, sudara, dotrajalosti brodske konstrukcije ili njezina preopterećenja, dok u ratnim uvjetima takva oštećenja mogu nastati zbog udara različitih oružja, kao što su artiljerijska zrna, mine, torpeda, avionske bombe ili rakete. Pri prodoru vode u brod može doći do osjetnog smanjenja stabilnosti, a u težim slučajevima i do potonuća broda.

Činjenica je, međutim, da se zbog vode koja je zbog prodora ušla u brod gubi dio istisnine broda, jer voda koja je ušla u neki brodski prostor ostaje u vezi s vanjskom vodom u kojoj brod plovi. Izgubljena istisnina mora se nadoknaditi većim uronjavanjem broda, tako da novi uronjeni volumen neoštećenog dijela broda bude jednak prijašnjem volumenu podvodnog dijela broda prije nastalog prodora vode. Težine se, dakle, na brodu nisu promijenile, pa prema tome ni uzgon. Ako se s povećanim utonućem ili odgovarajućim trimom broda može nadoknaditi izgubljena istisnina, tj. nova dodatna masa vode koja je prodrla u brod, brod će i nadalje ploviti u novom položaju. Međutim, ovo će biti moguće samo ako brod raspolaže s dovoljnom nadvodnom visinom, tj. s dovoljnom rezervom uzgona. Ako je prodor vode bio toliki da ga rezervna istisnina, odnosno rezervni uzgon iz nadvodnog dijela broda ne može kompenzirati, brod će potonuti.

Jednako kao što prodrli vodu u brod možemo smatrati izgubljenom istisninom, možemo je smatrati i ukrcanim teretom. Međutim, o tome se detaljnije govori u t. 12.1.4.

Radi lokaliziranja prodora vode, da bi se on ograničio samo na prostor između dviju susjednih pregrada, čitava je unutrašnjost broda podijeljena sistemom poprečnih, a ponekad i uzdužnih pregrada u više vodonepropusnih prostora (odjeljenja) broda.

Napomenimo da nova vodena linija, koju treba izračunati za slučaj prodora vode u bilo koji prostor broda, ne smije prelaziti preko tzv. pregradne palube, tj. do one palube do koje dopiru nepropusne pregrade. Isto tako kutovi nagiba broda pri nesimetričnom prodoru ne smiju biti toliki da pod vodu dođu otvori koji se ne mogu nepropusno zatvoriti. Nadalje, stabilnost broda mora biti tolika da se brod ne prevrne zbog djelovanja vjetra i valova.

12.1.2. Prva mogućnost: prostor ima vodonepropusni krov, a voda ispunjava cijeli taj prostor. To se događa pri naplavlivanju tankova (čelija) dvodna, balastnih tankova ili bilo kojeg prostora pod glavnom palubom. U tim slučajevima svejedno je je li poplava prostora nastala zbog prodora ili je prostor namjerno napunjen vodom pomoću cjevovoda i ventila na dnu prostora koji se nakon naplavlivanja zatvore. U svakom slučaju naplavljeni je prostor sada do vrha pun i nema spoja s vanjskom vodom, jer su ventili za naplavlivanje zatvoreni, odnosno zatvorena je rupa na oplati kroz koju je voda prodirala u brod.

U ovim slučajevima voda se ne može premještati i treba je smatrati kao tvrdi teret mase $p = v \cdot \rho$ kojega se težište nalazi u središtu volumena (v) prostora. Stoga se svi potrebni elementi, kao što su promjena gaza, stabilnosti, kuta nagiba i promjena trima, računaju prema objašnjenjima u t. 3.2. i 3.3. Prema tome, pojedini elementi računaju se po ovim formulama:

a) povećanje gaza $\varepsilon = \frac{v}{F_{VL}}$

b) spuštanje težišta sistema $\overline{G_0G_1} = \frac{p \cdot h}{D + p}$

c) novi položaj težišta deplasmana $z_{F_1} = \frac{z_F \cdot D + p \left(T + \frac{\varepsilon}{2} \right)}{D + p}$

d) promjena metacentarskih polumjera
 $\overline{M_0F_1} = \frac{I_B}{V + v}$ i $\overline{M_L F} = \frac{I_L}{V + v}$

e) nagib $\text{tg } \varphi = \frac{p \cdot b}{(D + p) \cdot \overline{M_0G_1}}$

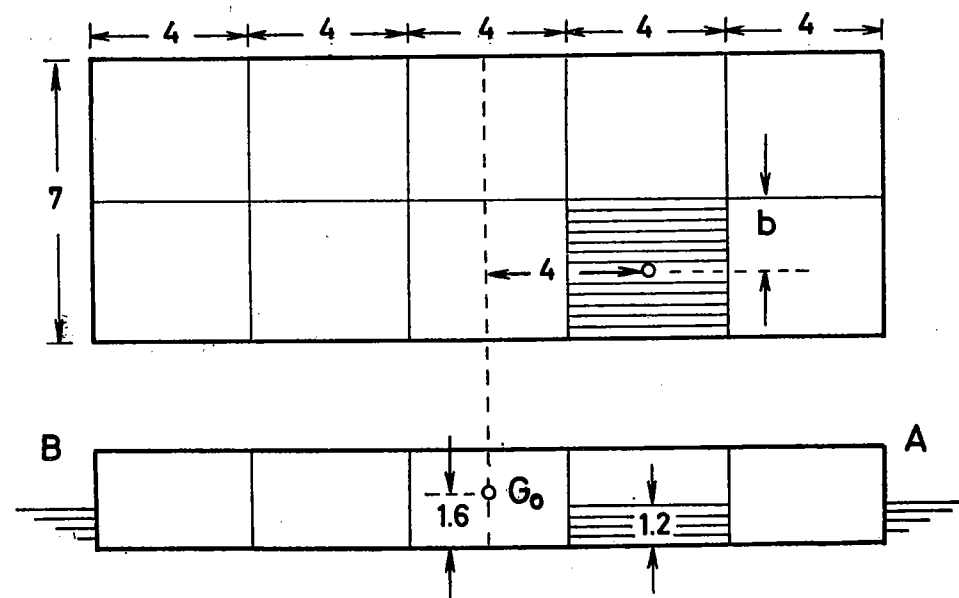
f) promjena trima $u = \frac{p \cdot d \cdot L}{(D + p) \overline{M_L G_1}}$

12.1.3. Druga mogućnost: prostor je s gornje strane otvoren ili je napunjen vodom djelomično, a nema spoja s vanjskom vodom. U ovom slučaju voda u prostoru može se slobodno premještati, zbog toga se javlja slobodna površina koja smanjuje početnu stabilnost broda. Ovdje se promjena gaza, tj. visina dodatnog sloja ε , promjena metacentarske visine zbog spuštanja težišta sustava

$\overline{G_0G_1}$ i promjena visine težišta deplasmana z_{F1} računaju slično kao u t. 12.1.2. Međutim, novi i smanjeni metacentarski polumjeri računaju se ovako:

$$\overline{M_0F_1} = \frac{I_B - i}{V + v} \quad \text{i} \quad \overline{M_L F_1} = \frac{I_L - j}{V + v}$$

U formulama su i i j momenti tromosti površine vode u odjelu s obzirom na poprečnu odnosno uzdužnu os ove površine.



Sl. 12.1.1. Proračun promjene trima i kuta nagiba prilikom naplavlivanja prostora jednog odjela pravokutnog pontona

Primjer (sl. 12.1.1)

Pravokutni ponton ima dimenzije: $L = 20$ m, $B = 7$ m, $T = 1,2$ m i $H = 3,6$ m. Težište sustava pontona nalazi se na visini od 1,6 m. Ponton ima jednu simetralnu i četiri poprečne vodonepropusne pregrade. Koliki će biti nagib, a kolika promjena trima pontona kada se jedan od srednjih odjela ispuni vodom do visine 1,2 m (sl. 12.1.1)? Podaci potrebni za proračunavanje:

$$\begin{aligned} V &= 20 \cdot 7 \cdot 1,2 = 168,0 \text{ m}^3 \\ D &= 168,0 \cdot 1,025 = 172 \text{ t} \\ v &= 4 \cdot 3,5 \cdot 1,2 = 16,8 \text{ m}^3 \\ p &= 16,8 \cdot 1,025 = 17,2 \text{ t} \\ F_{VL} &= 20 \cdot 7 = 140 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{L \cdot B^3}{12} = \frac{20 \cdot 7^3}{12} = 573 \text{ m}^4 \\ I_L &= \frac{B \cdot L^3}{12} = \frac{7 \cdot 20^3}{12} = 4660 \text{ m}^4 \\ i &= \frac{l \cdot b^3}{12} = \frac{4 \cdot 3,5^3}{12} = 14,3 \text{ m}^4 \\ j &= \frac{b \cdot l^3}{12} = \frac{3,5 \cdot 4^3}{12} = 18,7 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

Rješenje

Povećanje srednjeg gaza:

$$\varepsilon = \frac{v}{F_{VL}} = \frac{16,8}{140} = 0,12 \text{ m}$$

$$\text{Spuštanje težišta sustava } \overline{G_0G_1} = \frac{p \cdot h}{D + p} = \frac{17,2 \cdot 1,0}{189,2} = 0,09 \text{ m}$$

$$\text{Novi položaj težišta deplasmana za ponton je: } z_{F1} = \frac{T + \varepsilon}{2} = 0,66 \text{ m}$$

Novi poprečni metacentarski polumjer:

$$\overline{M_0F_1} = \frac{I_B - i}{V + v} = \frac{573 - 14,3}{184,8} = 3,02 \text{ m}$$

Novi uzdužni metacentarski polumjer:

$$\overline{M_L F_1} = \frac{I_L - j}{V + v} = \frac{4660 - 18,7}{184,8} = 25,1 \text{ m}$$

Nova metacentarska visina:

$$\overline{M_0G_1} = \overline{KM_1} - \overline{KG_0} = \overline{KF_1} + \overline{M_0F_1} - \overline{KG_0} = 0,66 + 3,02 - 1,51 = 2,17 \text{ m}$$

Nova uzdužna metacentarska visina:

$$\overline{M_L G_1} = 0,66 + 25,1 - 1,51 = 24,16 \text{ m}$$

Kut nagiba:

$$\begin{aligned} \text{tg } \varphi &= \frac{p \cdot b}{(D + p) \cdot \overline{M_0G_1}} = \frac{17,2 \cdot 1,75}{189,2 \cdot 2,17} = 0,0732 \\ \varphi &= 4,2^\circ \end{aligned}$$

Promjena trima:

$$u = \frac{p \cdot d \cdot L}{(D + p) M_L G_1} = \frac{17,2 \cdot 4 \cdot 20}{189,2 \cdot 24,16} = 0,30 \text{ m}$$

Povećanje gaza kraja:

$$A = \varepsilon + \frac{u}{2} = 0,12 + 0,15 = 0,27 \text{ m}$$

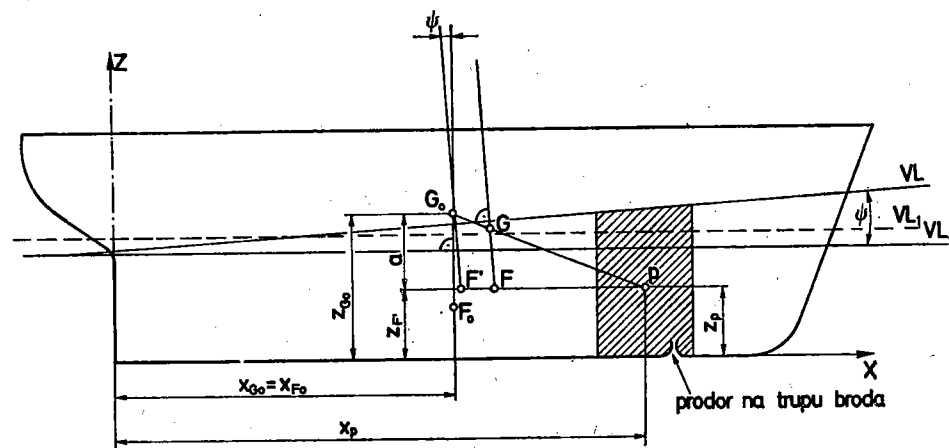
Smanjenje gaza kraja:

$$B = \varepsilon - \frac{u}{2} = 0,12 - 0,15 = -0,03 \text{ m}$$

12.1.4. Treća mogućnost: prostor zbog prodora vode ili otvorenog ventila ima stalan spoj s vanjskom vodom koja se može slobodno širiti u visinu. U ovom slučaju voda će u naplavljenom prostoru imati jednaku razinu kao i vanjska voda.

Već smo spomenuli da prodrlu vodu u brod možemo smatrati ukrcanim teretom ili izgubljenom istisninom. U oba slučaja dolazimo do istog rezultata.

Za razmatranje i jednog i drugog slučaja neka nam posluži sl. 12.1.2.



Sl. 12.1.2. Objašnjenje za tumačenje da se prodrla voda u brod može smatrati ili kao ukrcani teret ili kao izgubljena istisnina

Razmotrimo prvi slučaj.

Zbog prodrla vode mase p u pregrađeni prostor broda i momenta trima koji je taj prodor prouzrokovao, brod je prešao s vodene linije VL_0 na vodenu liniju VL . Zbog istog razloga pomaklo se i težište sustava broda iz G_0 u G , a težište istisnine iz F_0 u F . Novi smjer uzgona prolazi kroz F i kroz G , okomito na novu vodenu liniju VL .

Na sl. 12.1.2. postavili smo koordinatni sustav tako da se os X poklapa s osnovkom broda, a os Z s krmenom okomicom (prolazi kroz osovinu kormila), zbog čega apscise pojedinih točaka označujemo sa x , a ordinate sa z . Tako, na primjer, za točku F te oznake su x_F i z_F , a za točku G oznake su x_G i z_G itd.

Kada prodrlu vodu promatramo kao ukrcani teret, jednadžbe momenata bit će:

$$D_0 \cdot x_{G_0} + p \cdot x_p = (D_0 + p) \cdot x_G$$

$$D_0 \cdot z_{G_0} + p \cdot z_p = (D_0 + p) \cdot z_G \quad (1)$$

U prednjim jednadžbama $D_0 = V_0 \cdot \rho$ je istisnina broda na vodenoj liniji VL_0 , dok je $p = v \cdot \rho$ masa prodrla vode do vodene linije VL , jer je v volumen naplavljenog prostora broda.

Ako smatramo prodrlu vodu izgubljenom istisninom, tada težište sustava G_0 ostaje na svome mjestu, jer se na masama ništa nije promijenilo, međutim težište istisnine pomiče se iz F u F' , gdje je F težište istisnine oštećenog broda na vodenoj liniji VL . Prema tome, u ovom slučaju kada prodrlu vodu smatramo izgubljenom istisninom, tada jednadžbe momenata glase:

$$V_0 \cdot x_{F'} + v \cdot x_p = (V_0 + v) \cdot x_F \quad (2)$$

$$V_0 \cdot z_{F'} + v \cdot z_p = (V_0 + v) \cdot z_F$$

Uvedemo li skraćene oznake:

$$z_{G_0} - z_{F'} = a$$

$$z_G - z_F = a_1$$

dobivamo:

$$x_{F'} = x_{G_0} + a \cdot \operatorname{tg} \psi$$

$$x_F = x_G + a_1 \cdot \operatorname{tg} \psi$$

Uvrstimo li vrijednosti za $x_{F'}$ i x_F u jednadžbu (2), dobivamo:

$$V_0 (x_{G_0} + a \cdot \operatorname{tg} \psi) + v \cdot x_p = (V_0 + v) \cdot (x_G + a_1 \cdot \operatorname{tg} \psi) \quad (3)$$

Iz jednadžbe momenata s obzirom na točku p slijedi:

$$V_0 \cdot (x_p - x_{G_0}) = (V_0 + v) \cdot (x_p - x_G)$$

Iz sličnosti trokuta pG_0F' i pGF slijedi

$$\frac{\overline{F'p}}{\overline{Fp}} = \frac{\overline{G_0F'}}{\overline{GF}}$$

odnosno

$$\frac{x_p - x_{G_0}}{x_p - x_G} = \frac{a}{a_1}$$

iz čega, nadalje, slijedi:

$$V_0 \cdot a = (V_0 + v) \cdot a_1$$

Ako taj izraz uvrstimo u jednadžbu (3), dobijemo:

$$V_0 \cdot x_{G_0} + V_0 \cdot a \cdot \operatorname{tg} \psi + v \cdot x_p = (V_0 + v) \cdot x_G + V_0 \cdot a \cdot \operatorname{tg} \psi.$$

Ako sada ovu jednadžbu pomnožimo specifičnom gustoćom morske vode ρ , tada ta jednadžba prelazi u jednadžbu (1), dakle:

$$D \cdot x_{G_0} + p \cdot x_p = (D_0 + p) \cdot x_G$$

Analognim postupkom mogli bismo dokazati da se i druga od jednadžba (1) može dobiti sličnom transformacijom druge jednadžbe (2). Sve ovo potvrđuje da dobivamo iste rezultate ako prodrļu vodu smatramo ukrcanim teretom ili izgubljenom istisninom, što je bila i svrha ovog razmatranja.

12.1.5. Proračunavanje početne stabilnosti pri prodoru vode. Ako prodrļu vodu smatramo ukrcanim teretom sa slobodnom površinom, tada taj teret mase $p = v \cdot \rho$ mijenja položaj sustava iz G_0 u G (sl. 12.1.2). Nova će metacentarska visina u tom slučaju biti:

$$\overline{M_1G} = \overline{M_1F_1} + \overline{KF_1} - \overline{KG}$$

$$\overline{M_1G} = \frac{I_{B_1} - i_{B_1}}{V_0 + v} + \overline{KF_1} - \overline{KG}$$

U ovoj formuli je I_{B_1} moment tromosti površine vodene linije VL_1 , dok je i_{B_1} moment tromosti slobodne površine prodrle vode, a F_1 je težište istisnine broda na horizontalnoj vodenoj liniji VL_1 .

Vrijednost \overline{KG} nalazimo iz jednadžbe momenata, smatrajući osnovku kao os momenta. Prema tome:

$$(D_0 + p) \cdot \overline{KG} = D_0 \cdot \overline{KG_0} + p \cdot z_p$$

$$\overline{KG} = \frac{D_0 \cdot \overline{KG_0} + p \cdot z_p}{D_0 + p}, \text{ pa je:}$$

$$\overline{M_1G} = \frac{I_{B_1} - i_{B_1}}{D_0 + p} \cdot \rho + \frac{D_0 + p}{D_0 + p} \cdot \overline{KF_1} - \frac{D_0 \overline{KG_0} + p \cdot z_p}{D_0 + p}$$

$$\overline{M_1G} = \frac{1}{D_0 + p} \left[(I_{B_1} - i_{B_1}) \cdot \rho + (D_0 + p) \cdot \overline{KF_1} - D_0 \overline{KG_0} - p \cdot z_p \right] \quad (1)$$

Smatramo li, međutim, prodrļu vodu izgubljenom istisninom, tada težište sustava ostaje na istom mjestu, ali se težište istisnine pomaklo, jer se zbog nagiba promijenio oblik istisnine, iako joj je veličina ostala ista. Formula za početnu metacentarsku visinu u ovom slučaju glasi ovako:

$$\overline{M_1G_0} = \frac{1}{D_0} \left[(I_{B_1} - i_{B_1}) \cdot \rho + \overline{KF_1} (D_0 + p) - p \cdot z_p - D_0 \overline{KG_0} \right] \quad (2)$$

Vidimo da je izraz u uglatoj zagradi isti kao i u jednadžbi (1). Međutim, taj izraz u jednadžbi (1) treba podijeliti s $(D_0 + p)$, a u jednadžbi (2) s D_0 , stoga je metacentarska visina manja ako prodrļu vodu smatramo ukrcanim teretom, nego izgubljenom istisninom. Međutim, poznato nam je da je za ponašanje broda važan moment statičke stabilnosti, tj. produkt depasmana broda i metacentarske visine. U prvom slučaju moramo formulu (1) pomnožiti s $(D_0 + p)$, jer se istisnina broda D_0 povećala za masu prodrle vode p , a u drugom slučaju množimo formulu (2) s D_0 , jer je istisnina ostala ista. Vidimo, dakle, da je moment statičke stabilnosti u formulama (1) i (2) jednak izrazu u uglatoj zagradi, a on je u oba slučaja isti.

Iz formula (1) i (2) vidimo da će momenti početne stabilnosti u oba slučaja biti:

$$M_{st0} = D_0 \cdot \overline{M_1G_0} = (D_0 + p) \cdot \overline{M_1G}$$

U oba slučaja su, dakle, momenti početne stabilnosti jednaki iako je u oba slučaja početna metacentarska visina različita. To ujedno znači da nam u ovom slučaju početna metacentarska visina može biti karakteristična za početnu stabilnost samo pod uvjetom da točno znamo jesmo li prodrļu vodu smatrali ukrcanim teretom ili izgubljenom istisninom. Napomenimo da se u praksi redovito prodrļa voda smatra teretom sa slobodnom površinom.

12.1.6. Naplavljenost ili permeabilnost. U dosadašnjem razmatranju pretpostavljali smo da je volumen prodrle vode jednak volumenu nepropusnog odjela u koji je voda prodrļa. Međutim, u stvarnosti nije tako i volumen

prodrle vode je uvijek manji. Naime, zbog volumena konstrukcijskih elemenata od kojih je izgrađen trup broda, kao što su npr. rebra, sponje itd, a isto tako i zbog tereta ili drugih predmeta koji se nalaze u oštećenom prostoru, prodrila ga voda ne može potpuno ispuniti.

Da bismo dobili volumen prodrle vode, moramo volumen oštećenog prostora broda, do odgovarajuće vodene linije, pomnožiti jednim faktorom koji je manji od jedan. Taj se faktor zove **faktor naplavljivosti** ili **faktor permeabilnosti** i izražava se u postocima. Veličina faktora naplavljivosti ovisi o namjeni toga prostora, o veličini i broju konstrukcijskih elemenata koji u njemu strše, zatim o količini tereta i drugih predmeta smještenih u tom prostoru.

Prosječna vrijednost faktora naplavljivosti pojedinih brodskih prostora iznosi:

— skladišta za teret	60%
— prostorije za putnike i posadu	95%
— strojarnica motornih brodova	85%
— strojarnica parnih (turbinskih) brodova	80%

Za skladišta na teretnim brodovima, naplavljivost može biti vrlo različita i veličina od 60% predstavlja samo srednju vrijednost. Napomenimo da se naplavljivost ćelija dvodna i tankova za gorivo, kad su prazni, računa 95%, a kad su puni, naplavljivost im je, što je sasvim razumljivo, jednaka ničtici.

Pod naplavljenošću općenito smatramo omjer između volumena prodrle vode i volumena prostora u koji je voda prodrila, mjenog do razine vode u tom prostoru.

Pretpostavimo da je neko skladište na brodu bilo nakrcano rasutom sojom i da je u skladište prodrila voda. Faktor slaganja rasute soje je $1,36 \text{ m}^3$, što znači da jedna tona soje zaprema prostor od $1,36 \text{ m}^3$. Specifična gustoća soje je $0,73 \text{ t/m}^3$. To znači, kad bi se rasuta soja mogla složiti u brod tako da ne bi bilo nikakvih praznina, jedna tona soje bi zauzimala prostor od $\frac{1}{1,36} = 0,73 \text{ m}^3$. Razlika između $1,36$ i $0,73$, koja iznosi $0,63 \text{ m}^3$ predstavlja slobodan prostor koji može ispuniti naplavljena voda. Prema tome, naplavljenost prostora u kojem je smještena soja iznosi:

$$k = \frac{0,63}{1,36} = 0,463 \approx 46\%$$

12.2. PREGRADIVANJE BRODOVA

12.2.1. Općenito o pregrađivanju. Pregrađivanje je u najtješnjoj vezi s naplavlivanjem broda, a svrha mu je da se brodski prostor podijeli nepropusnim stijenama u vodonepropusne (kratica v/n) prostore ili ćelije (npr. ćelije dvodna). Time se postiže da u slučaju oštećenja vanjske oplata u brod uđe ograničena količina vode, a brod i dalje zadržava sposobnost plovljenja.

U brodova za prijevoz suhog tereta, pregrađivanje se obavlja uglavnom poprečnim pregradama, a u brodova za prijevoz tekućeg tereta, još i uzdužnim pregradama kako bi se smanjio štetan utjecaj slobodnih površina tekućina na stabilnost broda.

Pregrade daju brodu potrebnu poprečnu i uzdužnu čvrstoću pri naprezanju na valovima, pri dokovanju i pri naprezanjima u unutrašnjosti broda. Stoga se v/n pregrade ako nisu korugirane još i pojačavaju (ukrepljuju) okomitim, a katkada i vodoravnim ukrepama. Pregrade se spajaju s oplatom broda zavarivanjem.

Poprečne i uzdužne pregrade omogućuju da se na brodu dobiju razni tankovi, na primjer, tankovi za gorivo, balast, pitku vodu, biljna ulja i dr.

Pitanje pregrađivanja trgovačkih brodova koji obavljaju međunarodna putovanja regulirano je odredbama Međunarodne konvencije za zaštitu ljudskih života na moru od 1974. godine. Pa ipak je broj v/n pregrada u trgovačkih brodova načelno ograničen, jer su veličine brodskih skladišta i malena vlastita težina broda od velike važnosti za ekonomsku iskoristivost broda.

Za pregrađivanje ratnih brodova ne postoje neki određeni propisi, ali je u njih vodonepropusna podjela provedena u mnogo većoj mjeri. To je i potpuno razumljivo ako se uzme u obzir da borbena sredstva smještena u donjem dijelu ratnog broda (glavni i pomoćni strojevi, komore za municiju, centrale i sl.) moraju biti zaštićeni od prodora vode kako bi brod zadržao svoju borbenu sposobnost i pri jačem oštećenju vanjske oplata.

12.2.2. Pregrađivanje trgovačkih brodova. Pri određivanju broja v/n pregrada na trgovačkim brodovima treba istodobno zadovoljiti tri važna uvjeta:

- ekonomsku iskoristivost broskog prostora,
- čvrstoću broskog trupa,
- održavanje sposobnosti plovljenja.

Prva pravila o broju v/n pregrada na trgovačkim brodovima izdana su u Njemačkoj 1897. godine. Ta su tzv. pravila S. B. G.⁴ imala tablicu koja je određivala duljine odjela na putničkim i teretno-putničkim brodovima. Slična pravila bila su izdana u Velikoj Britaniji 1915. godine, a kasnije ih je prihvatila i Međunarodna konvencija za zaštitu ljudskih života na moru.

Međutim, sva poznata klasifikacijska društva imaju vlastite propise o pregrađivanju trgovačkih brodova, koji se, uglavnom, podudaraju s odredbama spomenute Konvencije.

Opća pravila o sigurnosti brodova dopuštaju da brod može uroniti do pregradne palube (paluba do koje pregrade dopiru u visinu) ako mu je naplavljen jedan, odnosno dva bilo koja susjedna odjela, već prema veličini i svrsi broda. Na toj se osnovi konstruiraju tzv. **krivulje pregrada** (sl. 12.2.1) na kojima se očitava dopuštena duljina odjela.

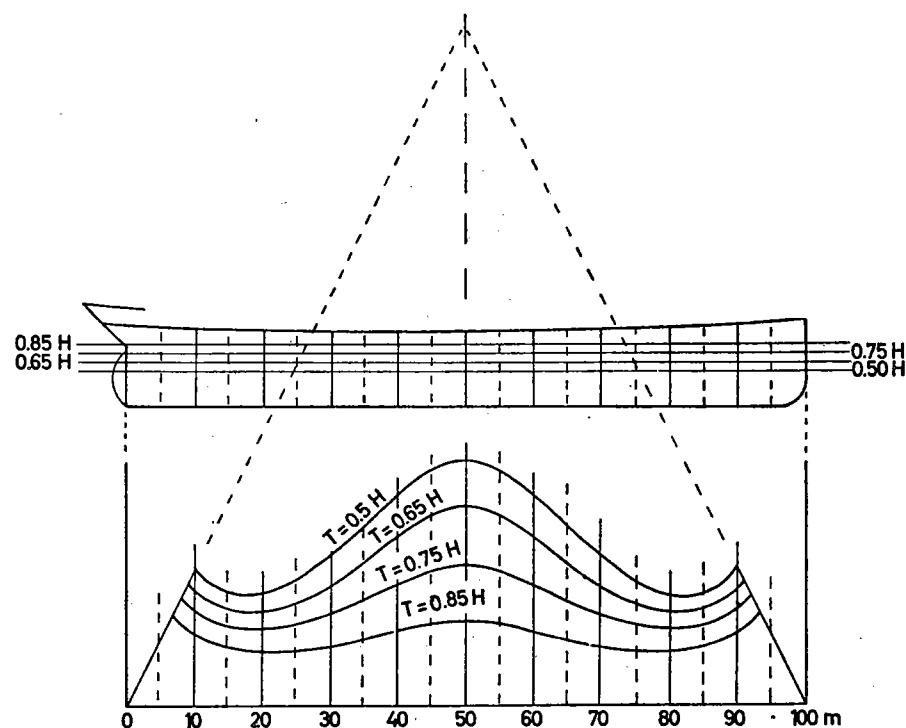
Svakom gazu broda, tj. određenom stanju tereta, odgovara jedna **pregradna krivulja**. Stoga se ta krivulja konstruira tako da se duljina broda podijeli u 20 dijelova i za svaki takav dio izračuna masa tereta koji bi, kad bi bio ukrcan, uronio brod do pregradne palube. Ta se masa zatim pretvara u volumen vode čije se središte nalazi u određenoj točki, a visina te točke uzima se za ordinatu krivulje. Kad se te točke spoje, dobije se **pregradna krivulja** koja

⁴ Pravila je izdalo njemačko pomorsko stručno udruženje poznato pod imenom »Se-berufsgenossenschaft« pa odatle i kratica S. B. G.

odgovara određenom gazu. Gazovi se obično uzimaju zavisno od visine broda, na primjer $T = 0,75 H$, $T = 0,50 H$ itd. (sl. 12.2.1). Pomoću krivulje pregrada može se odrediti položaj pregrada pri projektiranju broda, odnosno može se kontrolirati njihov razmještaj na već sagrađenim brodovima.

Iz sl. 12.2.1. vidi se da svakom gazu odgovara druga pregradna krivulja. Krajevi svih tih krivulja leže na dvama pravcima koji spajaju krajeve osi apscise duljine L s okomicom na tu os; okomica je postavljena u polovici osi apscise, a duljina joj je jednaka duljini L . Dopuštena duljina odjela otčitava se na ordinati dijagrama gdje je obično data u postocima duljine broda.

Iz slike se vidi da se s povećanjem gaza smanjuju ordinate pregradne krivulje, što znači da se smanjuju i dopuštene duljine v/n odjela broda. Prema tome, ako su na trgovačkom brodu v/n pregrade postavljene prema pregradnoj krivulji (obično za konstrukcijski gaz broda), brodu će biti osigurano određeno nadvođe i ujedno će se spriječiti da bude pretjerano opterećen.



Sl. 12.2.1. Pregradne krivulje trgovačkog broda

12.2.3. Najvažnije odredbe Konvencije SOLAS o pregrađivanju trgovačkih brodova. U glavi II ove Konvencije propisane su odredbe o pregrađivanju trgovačkih brodova.

U toj glavi date su točne definicije svih pojmova koji su u vezi s pregrađivanjem brodova. Tako je, na primjer, **pregradna teretna linija** vodena

linija prema kojoj je određena podjela broda na pregrade, a **pregradna paluba** najviša paluba do koje dopiru poprečne nepropusne pregrade, dok je **naplavljivost** jednog prostora (odjela) izražena postotkom volumena toga prostora koji voda može ispuniti.

Za svako mjesto broda duljina koja može biti naplavljena treba biti određena takvom računskom metodom koja uzima u obzir oblik, gaz i ostale karakteristike broda.

Konvencija, nadalje, propisuje da brodovi moraju biti pregrađeni što djelotvornije imajući na umu namjenu broda. Stupanj pregrađivanja mijenja se prema duljini i namjeni broda, tako da najpotpunije pregrađivanje imaju najdulji brodovi namijenjeni prijevozu putnika.

Najveća dopuštena duljina odjela, kojega je središte na bilo kojem mjestu brodske duljine, dobije se ako se duljina koja može biti naplavljena pomnoži jednim brojem koji se zove **pregradni faktor** (engl. *factor of subdivision*). Konvencija predviđa poseban pregradni faktor za teretne brodove i daje mu ime faktor A , dok se faktor za putničke brodove zove faktor B . Tako, na primjer, faktor A za teretne brodove dulje od 131 m iznosi:

$$A = \frac{58,2}{L - 60} + 0,18$$

Faktor B za putničke brodove dulje od 79 m iznosi

$$B = \frac{30,3}{L - 42} + 0,18$$

U obje formule L je duljina broda u metrima mjerena između okomica kroz krajnje točke najviše pregradne teretne linije.

Pregradni faktori za teretne brodove kraće od 131 m i putničke brodove kraće od 79 m određuju se po posebnim formulama, navedenim u Konvenciji.

Vrlo je važna ona odredba Konvencije u kojoj je naglašeno da brod mora biti sposoban izdržati potpuno naplavlivanje bilo kojeg odjela koji je u granicama propisane naplavljive duljine.

Svaki trgovački brod mora imati **pramčanu sudarnu pregradu** koja mora biti nepropusna sve do pregradne palube. Ta se pregrada ne smije postaviti na udaljenosti manjoj od 5% duljine broda, mjerenoj od pramčane okomice, ni većoj od 5% duljine broda više 3 m.

Nadalje, brodovi moraju imati i **pregradu krmenog pika** (krmeni trim-tank). Međutim, ne treba da se ta pregrada proteže do pregradne palube ako to dopušta stupanj sigurnosti broda.

Svi motorni i parni brodovi bezuvjetno moraju imati po jednu poprečnu nepropusnu pregradu na oba kraja strojarskog i kotlovnog prostora.

Osim toga brodovi s vijkom moraju imati i tzv. **pregradu brtvenice** koja se proteže na pogodnoj udaljenosti od krmene statve. Kao što je poznato, kroz statvenu cijev na krmenoj statvi prolazi osovina vijka i ona mora biti brtvljena. Međutim, brtvenica statvene cijevi mora se nalaziti u zasebnom nepropusnom prostoru, kojega volumen mora biti pravilno odmjeren. Naime, ako naplavi prostor zbog propuštanja brtvenice, brod zbog toga ne smije uroniti preko dopuštene linije gaza.

Konvencija ima i odredbe o dvodnu jer je ono također važno za sigurnost broda. Dvodno daje sigurnost brodu kad se nasuče ili udari o dno, a osim toga služi za krcanje balasta i smještaj goriva.

Po odredbama Konvencije dvodno se, načelno, mora protezati od pramčane sudarne pregrade do pregrade krmenog pika. Međutim, ako je duljina broda manja od 61 m, ono se mora protezati barem od pregrade strojarskog prostora do pramčane sudarne pregrade. Brodovi kojima je duljina između 61 i 71 m moraju imati dvodno koje se proteže barem izvan strojarskog prostora na obje strane, tj. do pramčane sudarne pregrade i do pregrade krmenog pika.

Dvodno se, načelno, mora protezati prema bokovima broda tako da zaštićuje dno broda i uzvoje dna.

Posebno su važne odredbe Konvencije koje govore o ispitivanju v/n pregrada. Osobito je naglašeno da svaka nepropusna pregrada, poprečna ili uzdužna, mora biti tako građena da može, s odgovarajućim koeficijentom sigurnosti, izdržati pritisak koji odgovara najvećoj visini vode. Međutim, ispitivanje glavnih odjeljenja broda punjenjem vodom nije prijeko potrebno. Ako takvo ispitivanje nije provedeno, onda je bezuvjetno potrebno te odjele ispitati štrcanjem. Međutim, pramčani pik i sve ćelije dvodna moraju biti ispitani pritiskom vode.

Tankovi koji su namijenjeni za smještaj tekućina, a koji su sastavni dio pregrađivanja broda, moraju također biti ispitani pritiskom vode. Ispitivanja nepropusnosti brodskih pregrada i pregrada u ćelijama dvodna obavljaju se pri redovnom pregledu klase broda.

PITANJA

1. Što se razumije pod naplavlivanjem brodskih prostora?
2. Koje su tri karakteristične mogućnosti naplavlivanja broda?
3. Koje promjene stabilnosti nastaju kad je neki zatvoreni brodski prostor naplavljen vodom do vrha?
4. Kakve promjene stabilnosti nastaju kad je neki brodski prostor naplavljen djelomično ili je s gornje strane otvoren?
5. Kakve promjene stabilnosti nastaju kad neki brodski prostor ima prodor vode ili je na koji drugi način u stalnom spoju s vanjskom vodom?
6. Što je pregrađivanje broda i kakva je njegova svrha?
7. Što su vodonepropusne pregrade i kakva je njihova svrha?
8. Što su krivulje pregrada i kako se konstruira njihov dijagram?
9. Koje odredbe o pregrađivanju trgovačkih brodova sadrži Konvencija za zaštitu ljudskih života na moru?
10. Što je pregradna teretna linija, što pregradna paluba, a što naplavljivost nekog brodskog prostora?
11. Što je pregradni faktor i kako se računa za teretne, a kako za putničke brodove?
12. Što je pramčana sudarna pregrada i gdje se mora postaviti?
13. Što je pregrada krmenog pika, a što pregrada brtvenice?
14. Čemu služi dvodno u trgovačkih brodova i dokle se proteže?
15. Kako se ispituju brodske pregrade i koje se od njih moraju bezuvjetno ispitivati pritiskom vode?

LITERATURA

- R. E. Thomas, *Stowage (The properties and stowage of cargoes)*, Glasgow 1977.
- R. Munro-Smith, *Merchant ship types*, Bristol 1975.
- M. Medici, *The natural gas industry*, London 1974.
- W. A. Mac Ewen, *Blue book of questions and answers for second mate, chief mate and master*, Cambridge-Maryland 1969.
- F. Rapacciolo, *Elementi di teoria della nave*, La Spezia 1968.
- I. Buljan, *Prevoženje tereta morem*, Zagreb 1968.
- J. Leeming, *Modern ship stowage*, New York 1963.
- J. Uršić, *Stabilitet broda — I dio*, Zagreb 1962.
- M. Š. Milošević, *Nauka o brodu — III dio*, Kotor 1961.
- B. Lovričević, *Krcanje brodova*, Zagreb 1961.
- W. Rottermund i W. Koch, *Die Ladung, Band I—II*, Hamburg 1961.
- J. M. Drapkin, *Prevozka Грузов morem*, Moskva 1957.
- J. Fatur, *Teorija broda*, Zagreb 1954.
- R. de Kerchove, *International maritime dictionary*, New York 1954.
- L. Bataille, *Problèmes de stabilité de déplacement de gite et d'assiette du navire*, Paris 1954.
- H. Evers, *Ratna brodogradnja*, Zagreb 1951.
- *** *Međunarodna konvencija o zaštiti ljudskog života na moru* 1974, izd. Jugoregistra, Split 1977.
- *** *Pravila za gradnju kontejnera*, izd. Jugoregistra, Split 1971.
- *** *Pravila o uređaju za rukovanje teretom na brodovima*, izd. Jugoregistra, Split 1969.
- *** *Explosives or other dangerous articles on board vessels*, izd. United States Coast Guard, Washington 1954.
- *** *Règlement pour le transport par mer des marchandises dangereuses*, izd. Ministère de la marine marchande, Paris 1952.
- *** *Dizionario di marina*, izd. Reale Academia D'Italia, Rim 1937.

RJEČNIK POMORSKIH IZRAZA

(upotrijebljenih u udžbeniku)

Hrvatski ili srpski	Engleski	Talijanski
A		
amplituda	amplitude	ampiezza della oscillazione
areala rebara areala vodenih linija	frame areas areas of waterplanes	scala delle ordinate scala delle linee di galleggiamento
B		
balastni tank balast bokocrt (nacrt rebara)	ballast tank ballast body plan	cassa zavorra zavorra piano dei quinti, piano verticale, nave livellata nave in zavorra
brod na ravnoj kobilici brod u balastu (plovidba u balastu) brod u dolasku brod u polasku	ship on even keel ship in ballast condition ship on arrival, ship on departure, departure	nave in arrivo nave in partenza
bruto registarska zapremina	gross register tonnage, brutto registrar tonnage	stazza lorda totale, tonnellaggio di registro lordo
bruto tonaža	gross tonnage, brutto tonnage	stazza lorda totale
brzina	speed	velocità
D		
deplasman diagramni list broda	displacement hydrostatic curves	dislocamento diagramma degli elementi geometrici di carena
dinamička stabilnost dizel-motor dizel-ulje	dynamical stability Diesel engine Diesel, oil, gas oil	stabilità dinamica motore Diesel olio per motori, olio per Diesel
dokobilični voj oplata donja paluba duljina broda duljina među okomicama duljina na vodenoj liniji duljina preko svega valna duljina	garboard lower deck length length between perpendiculars load line length length over all wavelength	torello ponte inferiore lunghezza lunghezza fra i perpendicolari lunghezza alla linea di galleggiamento lunghezza fuori tutto lunghezza d'onda

dvodno dvodno — kao balastni tank dvodno — kao tank za gorivo	double bottom ballast tank fuel-oil tank	doppio-fondo doppio fondo per zavorra acqua doppio fondo o tanca per combustibile
E		
engleska tona	long ton	tonnellata (long)
F		
faktor slaganja tereta	stowage factor	fattore stivaggio, volume all'ingombro
formula trapeza Frahmovi tankovi protiv ljujanja	trapezoidal rule Frahm's anti-rolling tanks	metodo Bézout casse antirollanti Frahm
G		
gaz broda gaz na krmi gaz na pramcu gaz srednji generalni nacrt broda	draft, draught aft draught forward draught mean draught general arrangement plan	pescaggio, immersione immersione addietro immersione avanti immersione media piano generale di bordo
generalni teret glavna paluba glavno rebro gornja paluba grotlo	general cargo main deck midship section upper deck hatch, hatchway	carico generale ponte principale ordinata maestra ponte superiore bocca porta
H		
homogeni teret horizontalna ukrepa pregrade hrptenica	homogeneous cargo horizontal stiffener of bulkhead middle line keelson	carico omogeneo traversa di paratia paramezzale centrale
I		
indiferentna ravnoteža broda istisnina	neutral equilibrium displacement	equilibrio indifferente dislocamento
J		
jedinični moment trima	moment to change trim 1 meter in sea water	momento unitario di assetto
K		
kapacitet kapacitet za žito kapacitetni plan broda	capacity grain capacity capacity plan	capacità capacità di grano piano della capacità

kasar kaštel kobilica koeficijent punoće deplasmana koeficijent punoće glavnog rebra	poop forecastle keel block coefficient	cassero di poppa castello di prora chiglia coefficiente di finezza totale della carena coefficiente di finezza dell'ordinata maestra coefficiente di finezza di galleggiamento paratia di collisione
koeficijent punoće vodene linije kolizijska (sudarna) pregrada kolut (krug) nadvođa konstrukcijska širina broda konstrukcijska visina broda konstrukcijska vodena linija konstrukcijski deplasman	midship section coefficient waterline coefficient, waterplane coefficient collision bulkhead disc breadth moulded depth moulded load waterline, load waterplane load displacement	coefficiente di finezza di galleggiamento paratia di collisione disco larghezza di costruzione altezza di costruzione linea di galleggiamento di costruzione spostamento di costruzione, dislocamento di costruzione prova di stabilità portata netta
kontrola stabiliteta korisna nosivost	stability test deadweight tonnage exclusively bunker and stores useful load steering wheel house displacement curve heeling arm curve righting arm curve curve of stability after perpendicular	carico utile timoniera curva di solidità curva del momento inclinante curva di stabilità statica diagramma di stabilità perpendicolare addietro dritto di poppa gavone di poppa nave appoppata cassero di poppa incrociatore angolo d'inclinazione
korisni teret kormilarnica krivulja deplasmana krivulja poluga momenta nagibanja krivulja poluga statičke stabilnosti krivulja stabilnosti krmena okomica	stern-post after peak, aft peak trim by the stern poop cruiser angle of heel	
krmena statva krmeni pik krmeni trim krmeno nadgrade broda krstarica kut nagiba broda		
L		
labilna ravnoteža broda laka vodena linija	unstable equilibrium light water line, light waterplane light displacement deck line	equilibrio instabile linea leggiera di galleggiamento dislocamento leggero linea del ponte di coperta olio pesante
laki deplasman linija palube	heavy oil	
ulje za loženje		
LJ		
ljetna teretna linija	summer load line	linea di massimo carico estiva
ljetno navode	summer freeboard	bordo libero estivo

M

međunarodna konven-
cija o teretnim
linijama

Međunarodna Konven-
cija o zaštiti ljudskog
života na moru

međunarodna svjedodž-
ba o teretnoj liniji

međupalublje
međupalublje za teret
metacentar
metacentarska evoluta
metacentarska krivulja
metacentarska visina

metacentarski polumjer
moment stabilnosti

moment trima
moment tromosti
morska voda
mrtva težina

N

nacrt broda
nacrt brodskih linija
nacrt glavnog rebra

nacrt (uzdužni presjeci
broda)
nadgrađe broda
nadvođe

nagibni moment
napajač (za žito)
naplava odjeljenja
broda

naplavljivost (broda)
naprava za smanjenje
ljuljanja

nasukanje broda
nasukani brod
negativna stabilnost
nepropusna vrata
neto registarska
zapremina
nosivost

O

opći nacrt broda

oplata dna broda
opseg stabilnosti
osnovka

international load
line convention

International
Convention for the
safety of life at sea

international load
line certificate

tween deck
cargo tween deck
metacentre
metacentric curve
metacentric curve
metacentric height

metacentric radius
moment of stability,
righting moment
trimming moment
moment of inertia
salt water
dead weight

ship's plan
ship's lines
midship section plan

sheer plan

superstructure
freeboard

heeling moment
feeder
admission of water
to the interior of
a ship
permeability
anti-rolling device

to run aground
ship aground
negative stability
watertight door
net tonnage
deadweight tonnage

general arrangement
plan
bottom plate
range of stability
base line

regole internazionali
di bordo libero

Convenzione
internazionale per la
salvaguardia della
vita umana in mare
certificato
internazionale di
bordo libero

traponte, interponi
interponi da carico
metacentro
evoluta metacentrica
evoluta metacentrica
altezza metacentrica,
altezza del metacentro
raggio metacentrico
momento della
stabilità
momento d'assetto
momento d'inerzia
acqua salata
peso morto

piano d'una nave
piano di costruzione
piano dell'ordinata
maestra
piano longitudinale

soprastruttura
franco di porto,
bordo libero
momento inclinante
feeder
allagamento
compartimenti della
nave
permeabilità
impianto
stabilizzatore
l'incaglio della nave
nave incagliata
stabilità negativa
porta stagna
tonnellaggio netto,
stazza netta
portata lorda

piano generale di bordo
corso del fondo
lunghezza del segmento
linea di base

osovina vijka
(propelera)
otpor
otpor broda
otpor oblika broda

otpor trenja

otpor valova
otpor virova

otpor zraka
oznaka nadvođa

P

palac
paluba
poluba nadvođa
polubna linija
palubna ograda
palubna sponja
palubni teret

period broda

period ljuljanja broda
period vala
Plimsollova marka
plinsko ulje
početna stabilnost
podmornica

pokus nagiba
poluga stabilnosti
poprečna pregrada
poprečni kut nagiba
broda
poprečni metacentarski
polumjer
poprečni moment
tromosti
poprečna stabilnost
poriv (broda)
posada broda
površina vodene linije

pramčana okomica
pramčana statva
pramčani pik

pramčani trim
pramčano nadgrađe
broda

prazan brod
pregrada
pregrada brtvenice

pregradna krivulja

propeller shaft

resistance
ship's resistance
residuary resistance,
resistance of form
friction resistance,
frictional resistance
wave resistance
eddy-making
resistance
air resistance
free board mark,
load mark

inch
deck
freeboard deck
deck line
bulwark
beam, deck beam
deck cargo

period of ship

rolling period
wave period
Plimsoll's mark
Diesel oil, gas oil
inial stability
submarine

inclining experiment
righting lever
transverse bulkhead
transverse angle of
heel
transverse
metacentric radius
transverse moment
of inertia
transverse stability
propulsion
crew

area of waterplane,
area of waterline
forward perpendicular
steam
fore peak, forward
peak
trim by the head
forecastle

light ship
bulkhead
stuffing-box bulk
head
curve of bulkheads

albero port'elica

resistenza
resistenza della nave
resistenza di forma

resistenza di attrito

resistenza d'onda
resistenza dei vortici

resistenza dell'aria
marca di bordo libero

pollice
ponte, coperta
ponte di bordo libero
linea del ponte
impavesata
baglio, baglio di ponte
carico di coperta,
carico del ponte
periodo di
oscillazione della nave

periodo di rollio
periodo d'onda
disco del Plimsoll
olio per motori
stabilità iniziale
sottomarino,
sommersibile
prova di stabilità
leva della stabilità
paratia trasversale
angolo d'inclinazione
trasversale
raggio metacentrico
trasversale
momento trasversale
d'inerzia
stabilità trasversale
propulsione
equipaggio
superficie di
galleggiamento
perpendicolare avanti
dritto o ruota di prora
gavone di prora

nave appruata
castello di prora

nave vacante
paratia
paratia del premistoppo

diagramma delle
lunghezze primitive
di allagamento

pregradna paluba
pretežan brod
pričuvni uzgon
prodor vode
propeler (vijak)
propulzija (poriv)
puni deplasman
(ratnog broda)

R

rasuti teret
razarač
rebrenica
rebro broda
rebro — uzdužno
registarska tona

registarska zapremina

rezervna dinamička
stabilnost
rezervni uzgon

S

samarica
Simpsonova formula

Simpsonova pravila
skala deplasmana
skala nosivosti
skladište (brodsko)
skladište za hladeni
teret
slatka voda
slobodna površina
smanjenje
metacentarske
visine zbog
slobodnih površina
spremište brodsko
spremište hrane na
brodu
srednje nadgrađe broda
srednji gaz broda

stabilnost
stabilnost oblika
stabilnost težine
stabilna ravnoteža
broda
statička stabilnost
stopa
strojarnica
strojarski prostor
broda
sudarna pregrada

bulkhead deck
down by the head
reserve buoyancy
leak
screw, propeller
propulsion
full load displacement,
loaded displacement

bulk cargo
destroyer
floor
frame, framing
longitudinal frame
gross ton, register
ton
register tonnage,
registered tonnage
residual dynamic
stability
reserve buoyancy

derrick
Simpson's rule

Simpson's rules
displacement scale
dead weight scale
hold
refrigerated hold

fresh water
free surface
reduction of
metacentric height —
due to slack in tanks,
slack reduction
store room
provision room,
provision store
bridge
mean draught

stability
stability of form
stability of weights
stable equilibrium

statical stability
foot (mn. feet)
engine room
machinery compart-
ment, engine room
collision bulkhead

ponte delle paratie
appruato
riserva di spinta
falla d'acqua
elica
propulsione
dislocamento di pieno
carico

carico alla rinfusa
cacciatorpediniere
madiere
costola, ordinata
ordinata longitudinale
tonnellata di registro,
tonnellata di stazza
tonnellata di registro,
stazza di registro
riserva di stabilità
residua
riserva di spinta

albero da carico
formola di Simpson,
metodo Simpson
regole di Simpson
scala di dislocamento
scala delle portate
stiva
stiva frigorifera

acqua dolce
livello libero
riduzione di stabilità
per il livello libero

magazzino
deposito viveri

casero centrale
pescaggio medio,
immersione media
stabilità
stabilità di forma
stabilità di peso
equilibrio stabile

stabilità statica
piede
camera delle macchine
camera delle macchine
paratia di collisione

S

širina broda

beam, breadth

larghezza

T

tablica deplasmana

displacement scale

scala di dislocamento,
scala di solidità
scala delle portate
cassa
cassa di doppio-fondo
serbatoio olio
carico liquido
carico

tablica nosivosti
tank
tank dvodna
tank ulja
tekući teret
teret
teretna linija

dead weight scale
tank
double bottom tank
oil tank
liquid cargo
cargo
load-line

linea d'acqua di
massimo carico
linea d'acqua di
massimo carico
linea di massimo
carico per la
navigazione in acqua
dolce

teretna linija
nadvođa
teretna linija za
slatku vodu

load-line

fresh water load-line

težište deplasmana

center of buoyancy

centro di spinta,
centro di carena
centro di spinta,
centro di carena
centro di gravità
centro della linea di
galleggiamento
piano orizzontale

težište istisnine

center of buoyancy

težište sistema
težište vodene linije

center of gravity
center of waterplane,
center of water line
water line plan

tlocrt (horizontalni
presjek broda)
tonaža

register tonnage,
registered tonnage

tonnellaggio di
retonnellaggio di
stazza

tone/cm gaza u
morskoj vodi

metric tons per centi-
meter in sea water

tonnellate per
centimetro di
sovraimmersione
lunghezza del segmento
metodo Bézout
assetto
cassa d'assetto

trajnost stabilnosti
trapezno pravilo
trim
trim-tank
tropska teretna linija

range of stability
trapezoidal rule
trim
trim tank
tropical load line

linea di massimo
carico per la
navigazione nelle
acque tropicali
linea di massimo
carico per la
navigazione nelle
acque dolci tropicali
galleria degli alberi di
trasmissione

tropska teretna linija
za slatku vodu

tropical fresh water
load line

tunel osovine

shaft tunnel

U

ukupna nosivost
ukupni otpor
ulje za loženje
ulje za podmazivanje
unutarnji vojevi bočne
oplate

total deadweight
towrope resistance,
heavy oil
lubricating oil
inside strake of
plating

portata lorda
resistenza totale
olio pesante
olio lubrificante
lamiera di corso sotto-
posto

upora skladišta
uspravljajući moment
stabilnosti
uspravljajući par sila
uzdužna pregrada
uzdužni metacentar

uzdužni metacentarski
polumjer
uzdužni moment
tromosti

uzdužna stabilnost

V

val
vanjska oplata broda
vanjski vojevi bočne
oplate
vertikalna ukrepa
pregrade
vijak (propeler)
visina broda
vodena linija

vodonepropusna
pregrada
vodonepropusna vrata
volumetrički moment

Z

zapovjednički most
zapremina

zatežan brod
zimski teretna linija

zimski teretna linija za
sjeverni Atlantski
ocean

Z

žitarice
žitne pregrade

hold-pillar
righting moment

righting couple
longitudinal bulkhead
longitudinal metacenter

longitudinal
metacentric radius
longitudinal moment
of inertia

longitudinal stability

wave
outside plating
outside strake of
plating
bulkhead web
stiffener

screw, propeller
depth
waterline,
waterplane

watertight bulkhead

watertight door
volumetric moment

navigating bridge
register tonnage

down by the stern
winter load line

winter North
Atlantic load line

grain
shifting boards

puntello di stiva
coppia di momento

coppia di stabilità
paratia longitudinale
metacentro longitudi-
nale

raggio metacentrico
longitudinale
momento
longitudinale
d'inertzia
stabilità longitudinale

onda
fasciame di carena
lamiera di corso
sovraposto
montante di paratia

elica, vite
altezza
linea di galleggiamento

paratia stagna

porta stagna
momento volumetrico

ponte di comando
tonnellaggio di registro,
tonnellaggio di
stazza

appoppato
linea di massimo carico
invernale

linea di massimo carico
per la navigazione nel
Nord Atlantico

granaglia
cascio

SADRŽAJ

PREDGOVOR

1. POJAM STABILNOSTI

- 1.1. Definicija stabilnosti i uvjeti plovnosti 5
1.2. Moment statičke stabilnosti broda 7

2. POPREČNA STABILNOST BRODA

- 2.1. Podjela poprečne stabilnosti 10
2.2. Glavne značajke početne stabilnosti broda 10
2.3. Moment početne stabilnosti broda 11
2.4. Stabilnost pri indiferentnoj i labilnoj ravnoteži broda 12
2.5. Određivanje početne metacentarske visine pokusom naginjanja broda 13
2.6. Određivanje kuta nagiba pri premještanju tereta u poprečnom smjeru broda 16
2.7. Međusobni odnos metacentarske visine i perioda ljuľanja broda 16

3. PROMJENA POPREČNE STABILNOSTI U RAZNIM UVJETIMA PREMJESTANJA I KRCANJA TERETA

- 3.1. Općenito o promjeni poprečne stabilnosti broda 17
3.2. Promjena stabilnosti pri premještanju tereta 17
3.3. Promjena poprečne stabilnosti zbog dodavanja ili uzimanja tereta 18

4. SLOBODNE POVRŠINE I NJIHOV UTJECAJ NA STABILNOST BRODA

- 4.1. Moment tromosti površine vodene linije 21
4.2. Proračunavanje momenta tromosti vodene linije 23
4.3. Moment tromosti površine tekućine u brodskim tankovima 25
4.4. Neka razmatranja o utjecaju momenta tromosti vodene linije na stabilnost broda 27
4.5. Značenje težišta vodene linije 28
4.6. Pojam slobodnih površina 29
4.7. Slobodne površine i stabilnost broda 29

5. STABILNOST OBLIKA I STABILNOST TEŽINE

- 5.1. Atwoodova jednadžba stabilnosti 36
5.2. Stabilnost jedrilica i jahta na jedra 39
5.3. Stabilnost zaronjene podmornice 40

6. STABILNOST PRI VELIKIM KUTOVIMA NAGIBA BRODA

- 6.1. Predočavanje rezultata proračuna statičke stabilnosti 41
6.2. Izračunavanje vrijednosti poluge stabilnosti GH 43
6.3. Krivulja stabilnosti i njezino značenje 45
6.4. Tangenta na krivulju stabilnosti broda i njezino značenje 48
6.5. Razni slučajevi krivulje stabilnosti broda 49

10 Stabilnost broda

145

7. UZDUŽNA STABILNOST BRODA

7.1. Pojam uzdužne stabilnosti broda	56
7.2. Izračunavanje ukupne promjene trima	57
7.3. Jedinični moment trima	60
7.4. Proračun trima	61
7.5. Dijagram promjene trima	62

8. STABILNOST U NEKIM POSEBNIM UVJETIMA

8.1. Utjecaj visećeg tereta na stabilnost broda	66
8.1.1. Promjena poprečne stabilnosti zbog visećeg tereta	66
8.1.2. Proračunavanje uzdužnog i poprečnog kuta nagiba broda i drugih elemenata prouzročenih visećim teretom na brodu	67
8.2. Stabilnost pri nasukanju i dokovanju	69
8.2.1. Stabilnost pri nasukanju broda	69
8.2.2. Stabilnost pri dokovanju broda	72

9. DINAMIČKA STABILNOST BRODA

9.1. Definicija i značenje dinamičke stabilnosti	76
9.2. Krivulja dinamičke stabilnosti broda	78
9.3. Djelovanje stalnoga nagibajućeg momenta na brod	79
9.4. Djelovanje vjetera na mahove	80
9.5. Moment kritičnoga dinamičkog para	82

10. KONTROLA STABILNOSTI I TRIMA U EKSPLOATACIJI BRODA

10.1. Općenito o kontroli stabilnosti i trima	84
10.1.1. Kontrola stabilnosti broda	84
10.1.2. Izračunavanje trima broda	84
10.1.3. Općenito o pomagalima potrebnim pri provjeri stabilnosti i trima broda	85
10.1.4. Dijagramni list broda i njegovo značenje	85
10.1.5. Knjiga trima i stabilnosti broda	87
10.1.6. Kapacitetni plan broda	88
10.2. Kontrola poprečne stabilnosti	91
10.2.1. Općenito o kontroli poprečne stabilnosti broda	91
10.2.2. Račun centracije	91
10.2.3. Račun stabilnosti	93
10.3. Kontrola trima broda	96
10.3.1. Općenito o kontroli trima broda	96
10.3.2. Račun centracije za momente tereta po duljini broda	96
10.3.3. Proračun trima broda	97

11. STABILNOST PRI PRIJEVOZU ŽITARICA

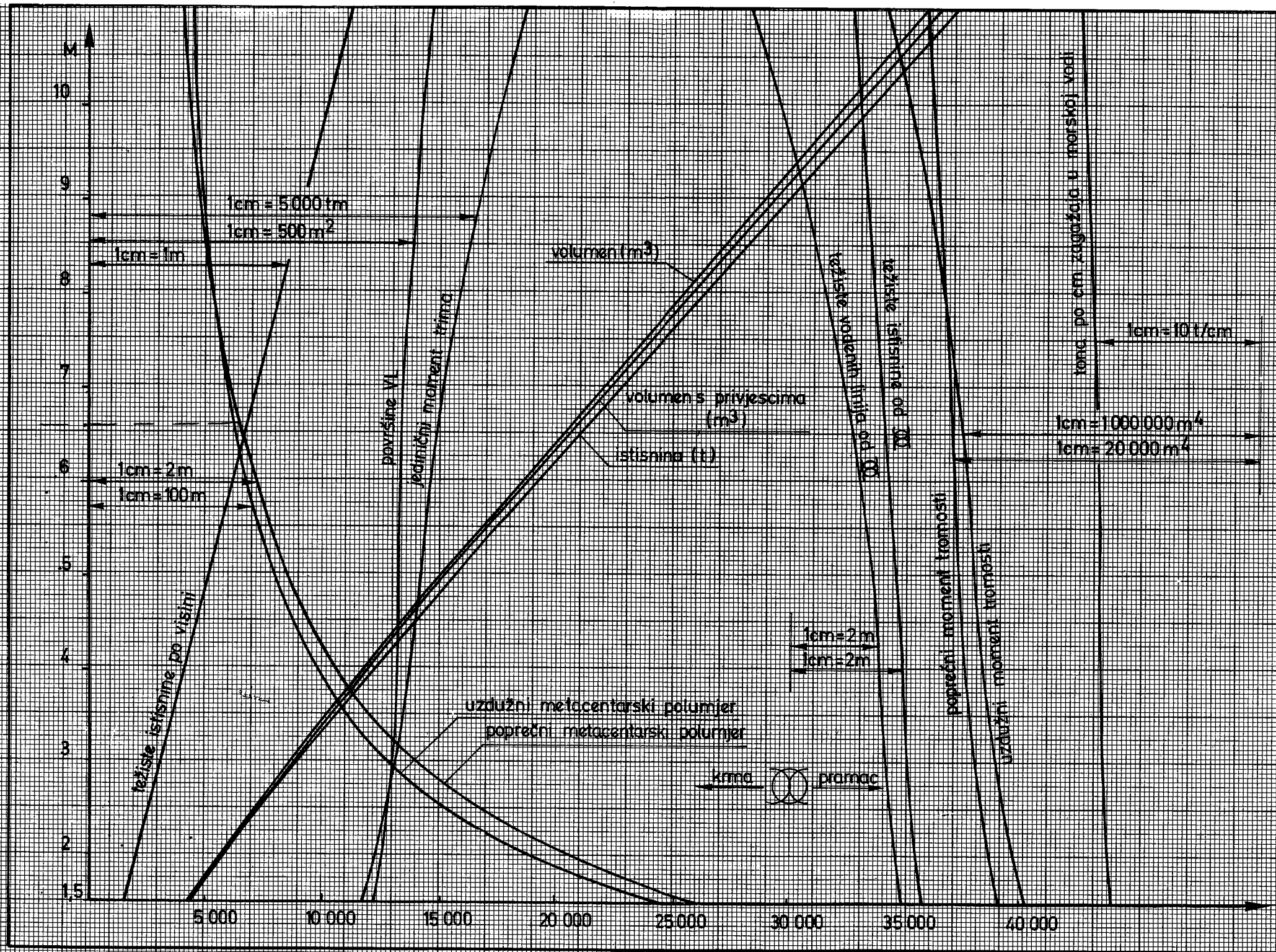
11.1. Odredbe Konvencije SOLAS	100
11.2. Uvjeti stabilnosti broda pri prijevozu žitarica po odredbama Konvencije SOLAS	100
11.3. Proračunavanje početne metacentarske visine	101
11.4. Volumetrički i nagibni moment žita	101
11.5. Informacije za krcanje žita	104
11.6. Proračunavanje kuta nagiba broda pri prijevozu žitarica	105
11.7. Proračun rezerve dinamičke stabilnosti pri prijevozu žitarica	106
11.8. Proračun uvjeta stabilnosti za žitarice po tzv. američkoj metodi	115

12. NAPLAVLJIVANJE BRODSKIH PROSTORA I PREGRADIVANJE TRGOVAČKIH BRODOVA

12.1. Naplavljivanje brodskih prostora	122
12.1.1. Općenito o naplavljivanju brodskih prostora	122
12.1.2. Prva mogućnost: prostor ima vodonepropusni krov, a voda ispunjava cijeli taj prostor	123
12.1.3. Druga mogućnost: prostor je s gornje strane otvoren ili je napunjen vodom djelomično, a nema spoja s vanjskom vodom	123
12.1.4. Treća mogućnost: prostor zbog prodora vode ili otvorenog ventila ima stalan spoj s vanjskom vodom koja se može slobodno širiti u visinu	126
12.1.5. Proračunavanje početne stabilnosti pri prodoru vode	128
12.1.6. Naplavljivost ili permeabilnost	129
12.2. Pregrađivanje brodova	130
12.2.1. Općenito o pregrađivanju	130
12.2.2. Pregrađivanje trgovačkih brodova	131
12.2.3. Najvažnije odredbe Konvencije SOLAS o pregrađivanju trgovačkih brodova	132

LITERATURA

RJEČNIK POMORSKIH IZRAZA	137
--------------------------	-----



Sl. 10.1.1. Dijagramni list jugoslavenskog broda za rasuti teret »BANIJA« dan u veličini i u razmjeru kako je prikazan u knjizi stabilnosti broda