

stema po visini, odnosno početnu metacentarsku visinu. U brodogradilištu se te vrijednosti određuju pomoću pokusa nagiba, a na brodovima je najzgodnije očitavati metacentarske visine na odgovarajućim aparatima (v. Brodski instrumenti i specijalni uređaji u ovom članku).

Propisi o stabilitetu. Iako su postojala nastojanja da se zbog izvanredne važnosti stabiliteta za sigurnost broda propišu neke minimalne vrijednosti, ipak do danas još uvijek o tome ne postoje internacionalni propisi, nego su samo pojedine pomorske nacije izdale svoje nacionalne propise (npr. Jugoslavija, Sovjetski Savez, Poljska, USA, Japan itd.). Jedini internacionalno priznati propis o stabilitetu je paragraf Međunarodne konvencije o sigurnosti ljudskog života na moru koji određuje da brod pri prodoru vode ne smije imati negativnu metacentarsku visinu i da se nesimetrično naplavljen vodom smije nagnuti najviše 7°. Razlog zbog koga ne postoje internacionalni propisi o stabilitetu jest što su još uvijek nedovoljno poznate vanjske sile kojima na brod djeluju valovi i vjetar i što nema jedinstvenog realnog kriterija za prosudivanje stabiliteta. Zbog toga se još uvijek ne može tačno odrediti stabilitet nekog broda, pa bi preblagi propisi mogli imati za posljednicu katastrofu na moru, a prestrogi bi znatno ugrozili ekonomičnost broda.

U vrijeme jedrenjaka kao kriterij stabiliteta služila je početna metacentarska visina. Nesreće na moru koje su se dešavale uslijed prevrtanja brodova pokazale su da početna metacentarska visina, iako važna za ponašanje na valovima i za stabilitet broda uz statičko djelovanje vanjskih sila, nije ni izdaleka dovoljan kriterij stabiliteta. Zatim se je kao kriterij stabiliteta uzela krivulja poluga. Na osnovu analize brodova koji su se prevrnuli zbog pomanjkanja stabiliteta, Raahola je prvi (1939) predložio neke granične vrijednosti kojima mora zadovoljiti krivulja poluga za najnepovoljniji slučaj opterećenja broda. Prema tom prijedlogu najmanje vrijednosti poluga pri nagibu od 20° i 30° moraju biti 14 i 20 cm. Maksimalna krivulje poluga treba da leži bar kod 35°, a njen opseg mora biti bar 60°. Pod utjecajem dinamičkog djelovanja vanjskih sila brod se ne smije nagnuti preko kuta pri kojemu krivulja poluga ima maksimum, odnosno najviše do 40° ako je taj kut veći. Poluga dinamičkog stabiliteta uz taj kut nagiba mora iznositi najmanje 0,08 m.

Kasniji propisi o stabilitetu pošli su drugim putem, nastojeći odrediti veličinu prekretnih momenata koji djeluju na brod i odnose između tih momenata i krivulje statičkog stabiliteta, odnosno granične kutove nagiba do kojih se brod može nagnuti pod djelovanjem prekretnih momenata. Time su indirektno uvjetovane i minimalne vrijednosti krivulje poluga, ali kako krivulja poluga daje karakteristiku stabiliteta samo u mirnoj vodi, ona nije dovoljan kriterij za stabilitet broda na uzburkanom moru, pa može služiti samo kao baza za uspoređivanje stabiliteta, ali ne i za njegovo određivanje. Zbog toga se u novijim propisima nastoje odrediti granični kutovi nagiba broda na osnovu formula koje se dobivaju rješanjem diferencijalne jednadžbe gibanja broda pod djelovanjem prekretnih momenata svih sila koje na njega djeluju.

NEPOTONLJIVOST

Nepotonljivost je sposobnost broda da ostane plutati i nakon što je jedan dio unutarnjeg brodskog prostora naplavila voda. Nepotonljivost se postiže nepropusnim pregrađivanjem unutrašnjeg prostora broda.

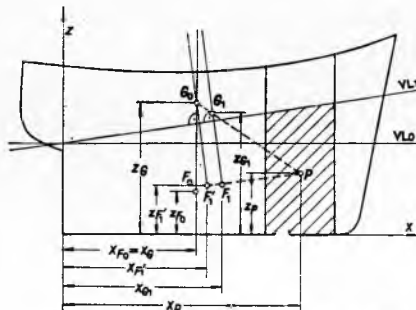
Svrha je proračuna nepotonljivosti da se odredi razmak nepropusnih pregrada broda, kako bi brod sačuvao plovnost, stabilitet i minimalna pomorska svojstva i kad, uslijed oštećenja vanjske oplata nastalog sudarom ili kojim drugim djelovanjem, prodre voda u njegovu unutrašnjost. Uslijed prodora vode gubi se jedan dio istisnine broda, jer prodrla voda stoji u vezi s vanjskom vodom. Gubitak istisnine se mora nadoknaditi dubljim uronom broda, pri čemu redovno nastaje stanovit trim, a katkada i bočni nagib broda. U novom položaju ni na jednom mjestu ne smije paluba do koje sižu nepropusne pregrade (*pregradna paluba*) doći ispod vode, jer ona nije nepropusna, pa bi se prodor vode raširio po cijelom brodu. Radi sigurnosti uzima se stanovita rezerva, pa se 76 mm ispod pregradne palube, paralelno s njom, poteže tzv. *granična linija* koju smije plovna linija nakon prodora vode u krajnjem slučaju tangirati, ali nikako sjeći. Proračun nepotonljivosti

izvodi se samo za putničke brodove. Prema pravilima Međunarodne konvencije za sigurnost ljudskog života na moru od 1929 putničkim brodom se smatra svaki brod koji prevozi više od 12 putnika.

Kad se je prešlo od drvene na željeznu konstrukciju broda i uveo pogon parnim strojem umjesto jedrima, počeo se je unutarnji brodski prostor dijeliti poprečnim pregradama na nekoliko nepropusnih odjela. Takva podjela je bila potrebna radi sigurnosti broda (u slučaju oštećenja oplata nepropusne pregrade su sprečavale da se voda proširi po čitavom brodu) i radi funkcionalnog rasporeda brodskog prostora (strojarnicu i kotlovnicu je trebalo odijeliti od tovarnog prostora).

Već 1854 donesen je u Engleskoj prvi zakonski propis o brodskim nepropusnim pregradama, a od 1882 klasifikaciono društvo Lloyd's Register of Shipping zahtijeva da brodovi duži od 84 m moraju imati nepropusne pregrade. Koncem XIX st. i Društvo njemačkih brodara (See-Berufsgenossenschaft) izdaje svoje propise o nepropusnoj podjeli broda. Katastrofa putničkog broda "Titanic" 1912, u kojoj je izgubilo život 1490 osoba, dala je poticaj za prvu Međunarodnu konferenciju o sigurnosti ljudskog života na moru (International Conference on Safety of Life at Sea) 1913 u Londonu. Na toj su konferenciji bili doneseni prvi međunarodni propisi o broju nepropusnih pregrada, a na kasnijim konferencijama 1929, 1948 i 1960 ti su propisi dalje razrađivani i dopunjavani, tako da je danas za putničke brodove tačno određen način nepropusne podjele broda.

Voda koja prodire u jedan od brodskih prostora (sl. 1) može se smatrati ili kao ukrcani teret ili kao izgubljen istisnina. Objekti pretpostavke vode do istog rezultata. Ako brod plovi na vodnoj liniji VL_0 , težište istisnine nalazi se prije prodora vode u položaju G_0 a težište sistema u G_0 . Nakon prodora vode brod plovi na vodnoj liniji VL_1 , pa se voda prodrla do te vodne linije može smatrati kao ukrcani teret sa težištem u tački P ; težište sistema pomiče se iz G_0 u G_1 . Da bude ispunjen drugi uvjet plovnosti, mora se i težište istisnine pomaknuti u tačku F_1 , tako da je spojnica F_1G_1 okomita na novu vodnu liniju VL_1 .



Sl. 1. Pomak težišta pri prodoru vode

U slučaju da se prodrla voda smatra izgubljenom istisninom, brod će opet uroniti do iste vodne linije VL_1 , da nadoknadi izgubljen istisninu. Težište sistema ostaje na svom mjestu G_0 (budući da se na težinama nije ništa promijenilo), ali uslijed gubitka jednog dijela istisnine, težište istisnine se pomiče iz F_1 u F_1' , tako da je $F_1'G_0$ okomito na VL_1 .

Da se prosudi početni stabilitet broda, treba odrediti položaj početnog metacentra. Ako se prodrla voda smatra kao utovareni teret, novi položaj početnog metacentra M_{01} daje formulu:

$$z_{M_{01}} = z_{F_1} + \overline{M_{01}F_1},$$

gdje je z_{F_1} ordinata neoštećene istisnine na vodnoj liniji VL_1 , $\overline{M_{01}F_1} = (I_1 - i_1)/V_1$ metacentarski radijus, reduciran uslijed slobodne površine prodrla vode; I_1 je moment cjelokupne (dakle neoštećene) površine vodne linije VL_1 , i_1 moment tromosti samo njenog oštećenog dijela, $V_1 = V_0 + V_p$ je volumen istisnine neoštećenog broda na vodnoj liniji VL_1 , koji se je povećao od volumena istisnine V_0 za volumen prodrla vode V_p .

Početna metacentarska visina jest:

$$\overline{M_{01}G_1} = z_{M_{01}} - z_{G_1}.$$

U slučaju da se prodrla voda smatra kao izgubljena istisnina, položaj početnog metacentra M_0' po visini je:

$$z_{M_0'} = z_{F_1'} + M_0'F_1',$$

gdje je $z_{F_1'}$ ordinata težišta oštećene istisnine broda na VL_1 , $\overline{M_0'F_1'} = I_1'/V_0$ je metacentarski radijus, I_1' je moment tromosti oštećene vodne linije VL_1 s obzirom na uzdužnu os kroz vlastito težište, V_0 je volumen istisnine neoštećenog broda na VL_0 ili oštećenog broda na VL_1 .

Metacentarska visina jest:

$$\overline{M'_0 G_0} = z_{M'_0} - z_{G_0}$$

Kako je s fizičkog stanovišta svejedno da li se prodrla voda računa kao utovareni teret ili kao izgubljena istisnina, to odnosi trima i stabiliteta moraju u oba slučaja ostati isti. Zbog toga su jednaki i momenti statičkog stabiliteta:

$$M_{st1} = (\Delta + p) \cdot M_{01} G_1 \cdot \sin \varphi,$$

$$M_{st}' = \Delta \cdot \overline{M'_0 G_0} \cdot \sin \varphi,$$

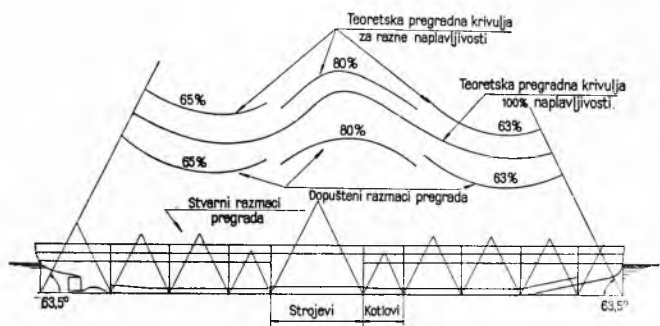
što znači da metacentarske visine za oba načina proračuna nisu jednake, nego se odnose kao:

$$\frac{\overline{M_{01} G_1}}{\overline{M'_0 G_0}} = \frac{\Delta}{\Delta + p},$$

gdje je Δ istisnina broda prije prodora vode, a p je težina prodrle vode.

Pregradna krivulja služi za kontrolu da li izvedeni razmaci pregrada zadovoljavaju uvjete nepotonljivosti. Pregradna krivulja daje maksimalno dopuštene razmace pregrada na pojedinim mjestima uzduž broda. Razlikuju se teorijska pregradna krivulja i krivulja dopuštenih razmaka. *Teorijska pregradna krivulja* daje tolike razmace pregrada da uslijed naplavlivanja pojedinih prostora brod plovi na vodnim linijama koje upravo tangiraju granicu urona. *Krivulja dopuštenih razmaka* daje radi sigurnosti obično manje razmace, koji se dobivaju množenjem teorijskih razmaka tzv. *pregradnim faktorom*, brojem redovito manjim od 1 (u krajnjem slučaju može biti jednak 1), a određuje se prema internacionalnim propisima na osnovu tzv. *kriterija službe*. Princip nanošenja ordinata pregradne krivulje i kontrolu razmaka pregrada pokazuje sl. 2. Svaka tačka pregradne krivulje određuje maksimalno dopuštene razmace pregrada, a nanosena je na vertikali koja prolazi kroz polovicu razmaka dotičnih pregrada. Zbog toga se pojedine tačke pregradne krivulje mogu smatrati kao vrhovi istokračnih trokuta kojima je baza jednaka visini pa su im krakovi priklonjeni pod kutom od $63,5^\circ$. Kontrola pojedinih pregrada vrši se tako da se iz sjecišta pregradâ i osnovke broda (sl. 2) potežu pravci pod $63,5^\circ$. Ako njihovo sjecište ne leži izvan pregradne krivulje dopuštenih razmaka (uzevši u obzir propisanu naplavljenost pojedinih prostora), izvedeni razmaci pregrada zadovoljavaju zahtjeve nepotonljivosti.

Pregradna krivulja ima karakterističan oblik (sl. 2). Njene ordinate su najveće u sredini broda, jer brod pri prodoru vode u taj dio uranja uglavnom paralelno, pa će trebati znatno veća količina vode da bi uronio do granične linije nego kad prodre voda u jedan od krajnjih prostora pa brod dobiva još i trim. Na



Sl. 2. Pregradne krivulje

krajevima broda ordinate pregradne krivulje se ponovo povećavaju, jer su u tom dijelu broda prostori već toliko uski da u njih može prodrijeti samo mala količina vode, pa se razmaci pregrada mogu povećati. Oblik pregradne krivulje zavisi dakle od forme broda, a naročito od njegove rezervne istisnine, tj. od veličine nadvođa i uzvoja palube. Osim o brodskoj formi, količina vode prodrle između pojedinih pregrada zavisi i od zapremine tereta i drugih predmeta unutar dotičnog prostora koji smanjuju naplavljeni volumen. To se uzima u obzir tzv. faktorom naplavljenosti ili permeabiliteta.

Naplavljenost. Pod *faktorom naplavljenosti* k razumijeva se u postocima izražen omjer između volumena naplavljene vode i ukupnog volumena prostora između pregradama u koji je prodrla voda. Taj je faktor na teretnim brodovima za različite terete znatno različit; tipične vrijednosti jesu: a) male, za ispunjeno skladište: brašno u vrećama 29%, maslac u kutijama 20%, teret u škrinjama 30%, pluto u balama 24%; b) velike, za ispunjeno skladište: pokućstvo u škrinjama 80%, strojevi u škrinjama 85%, gumeni obruči u svežnjevima 85%, automobili nepakovani 95%; c) za miješane terete: meso, žito, vuna, koža 55,2%, duhan, guma, kobra 67,8%.

Pri projektiranju putničkih brodova faktor naplavljenosti određuje se na osnovu propisa. U tu svrhu brod se dijeli na dio u kojem se nalazi strojarnica i na krajnje dijelove. Naplavljenost dijela za strojarnicu određuje se po formuli:

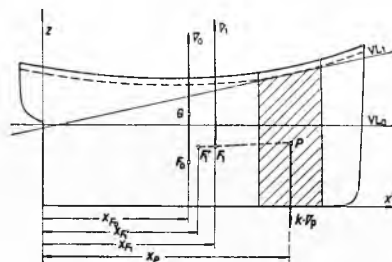
$$k = 85 + 10 \left(\frac{a - c}{V_p} \right),$$

a dijelova izvan strojarnice po formuli:

$$k = 63 + 35 \frac{a}{V_p},$$

gdje je k faktor naplavljenosti u %, a volumen putničkih prostorija; c volumen skladišta ispod granične linije unutar dotičnog prostora; V_p ukupni volumen dotičnog prostora ispod granice urona.

Proračun teorijske pregradne krivulje. Granica urona je parabola drugog stepena koja prolazi kroz zadane tri tačke, i to dvije 76 mm ispod veličine uzvoja palube na pramčanom i kr-



Sl. 3. Određivanje količine prodrle vode i položaja njenog težišta po dužini

menom perpendikularu (koje su određene propisima o nadvođu) i jedna 76 mm ispod najniže tačke uzvoja (obično na polovici dužine između perpendikulara). Tangente na tu granicu urona predstavljaju plovne linije broda nakon prodora vode. Za svaku tangentu-vodnu liniju odredi se: količina naplavljene vode $k \cdot V_p$ (gdje je k faktor naplavljenosti, V_p volumen naplavljenog prostora) i uzdužni položaj njenog težišta tako da brod uroni upravo do te vodne linije. Prema sl. 3 iz jednadžbi ravnoteže proizlazi

$$V_0 + k V_p = V_1,$$

$$V_0 x_{F_0} + k V_p x_p = V_1 x_{F_1}.$$

Iz prve jednadžbe dobiva se količina naplavljene vode:

$$k V_p = V_1 - V_0,$$

odnosno volumen naplavljenog prostora

$$V_p = \frac{V_1 - V_0}{k},$$

a iz druge položaj njenog težišta po dužini:

$$x_p = \frac{V_1 x_{F_1} - V_0 x_{F_0}}{V_1 - V_0}.$$

Nepoznata veličina x_p može se u dobrom približenju zamijeniti veličinom x_{F_0} , pa posljednja jednadžba prelazi u ovu:

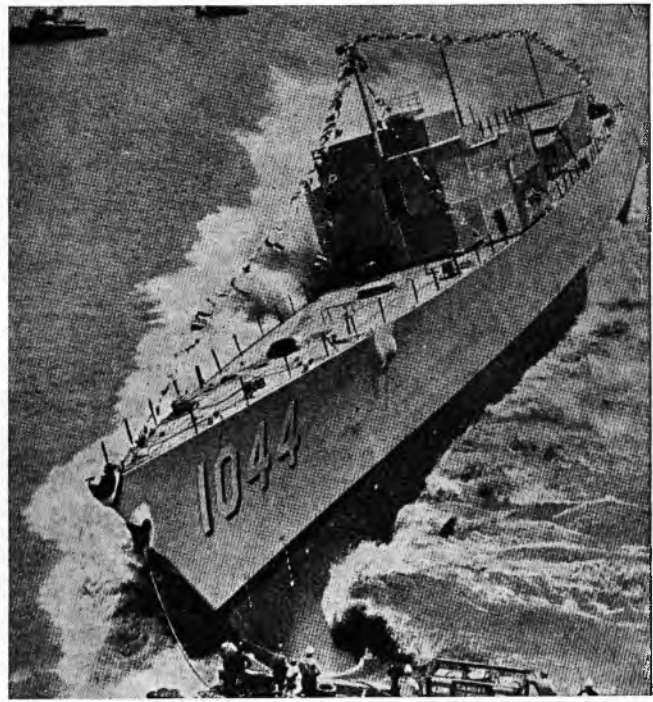
$$x_p = \frac{V_1 x_{F_1} - V_0 x_{F_0}}{V_1 - V_0}.$$

Istisninu V_1 i apscisu njenog težišta x_{F_1} do tangente na granicu urona treba odrediti pomoću Bonjeanovih krivulja, a istisnina V_0 i apscisa x_{F_0} njenog težišta za konstrukcijsku vodnu liniju mogu se očitati iz dijagramskog lista. Nakon što su određene količine naplavljene vode i položaji njenih težišta po dužini za sve tan-

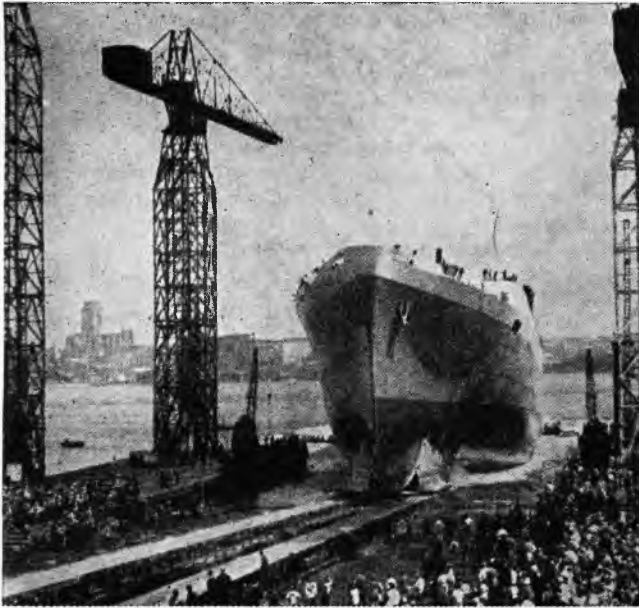
gente granice urona, odrede se grafičkom metodom pomoću areala rebara do tangenata na granicu urona i odgovarajući razmaci pregrada koji daju proračunati volumen ∇_p naplavljenih prostorija i apscise x_p njihovih težišta. Prema tome svaka tangenta daje jednak razmak nepropusnih pregrada, tj. jednu tačku pregradne krivulje, a kad bi se naplavio prostor između pregrada, brod bi uronio upravo do odgovarajuće tangente na granicu urona. Tačke pregradne krivulje dobivaju se tako da se na okomici povučenoj u polovici pojedinih razmaka pregrada nanese ti razmaci. Krajnje tačke pregradne krivulje, koje leže na pravcima nagnutim pod $63,5^\circ$ spram horizontale, odrede se posebnom grafičkom konstrukcijom.

PRORAČUN PORINUĆA BRODA

Porinuće broda je postupak kojim se brod izgrađen na kopnu, na navozu ili vlaci brodogradilišta, spušta u vodu. Najuobičajeniji je način porinuća da brod učvršćen na posebne saonice po drvenom saoniku na navozu klizi u vodu uslijed svoje vlastite težine. Prema tome da li brod ulazi u vodu u uzdužnom ili poprečnom smjeru, razlikuje se uzdužno porinuće (sl. 1) i poprečno porinuće (sl. 2). Pri uzdužnom porinuću brod ulazi u vodu najprije krmom, i to sa slijedećih razloga: oblici su krme puniji pa brod prije dobiva uzgon koji će ga dignuti s navoza; otpor vode pri kretanju krmom veći je nego pri kretanju pramcem, pa će se brod nakon porinuća prije zaustaviti; zbog uskih oblika pramca i njegove čvrste konstrukcije lakše je preuzeti na pramcu nego na krmi veliku reakciju koja se javlja prilikom okretanja na čelu sa-



Sl. 2. Bočno (poprečno) porinuće



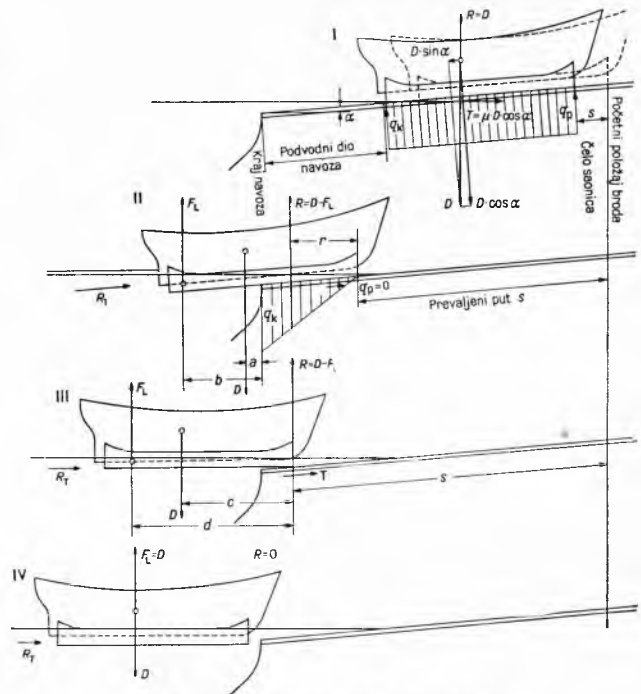
Sl. 1. Uzdužno porinuće

nica, i konačno, krma je mnogo osjetljivija prema većoj deformaciji, zbog osovinskih vodova i uređaja za kormilarenje, pa je treba postaviti u područje manjih pritisaka.

Porinuće pri kojem brod klizi u vodu uslijed svoje vlastite težine skopčano je s priličnim rizikom, jer kad se jednom pokrene masa broda, koja može iznositi i nekoliko tisuća tona, više se ne može kontrolirati njeno gibanje, pa treba proračunom porinuća unaprijed odrediti sve kritične momente koji ugrožavaju sigurnost broda. Važnost pomnijovog proračuna pokazuju slučajevi neuspjelih porinuća, koji su prouzročili goleme troškove. Najeklatantniji takav slučaj je prevrnuće transatlantika »Principessa Jolanda« 1909. Da bi izbjegla rizik porinuća, neka brodogradilišta grade brodove u suhom doku. (Za tehnološki postupak porinuća broda v. Gradnja broda u ovom članku).

Uzdužno porinuće. Proračunom uzdužnog porinuća određuju se sile i momenti koji djeluju na brodsku konstrukciju i, pored toga, potrebna dužina podvodnog dijela navoza. Rezultati proračuna nanose se u dijagrame porinuća u kojima su sile i momenti, brzine i ubrzanja, pritisci na saonik i pritisci na saonice nanoseni u zavisnosti od prevaljenog puta broda po navozu.

Cijelo porinuće dijeli se u četiri karakteristične faze (sl. 3). U prvoj fazi brod se kreće po suhom dijelu navoza, pa treba samo provjeriti da li je sila trenja $F_T = \mu D \cos \alpha$ manja od uzdužne komponente težine broda i saonice $D \sin \alpha$, da brod krene sam od sebe kad se otpuste zaporni uređaji. U tim formulama znači μ koeficijent trenja, čija je vrijednost za stanje mirovanja $0,03 \dots 0,07$, a pri gibanju $0,0125 \dots 0,015$ za maziva na bazi naftinih derivata, odnosno $0,025 \dots 0,035$ za maziva na bazi loja i sapuna (manje vrijednosti vrijede za veći pritisak, odnosno za višu temperaturu), D ukupna težina broda i saonice, α nagib navoza. Vrijednosti $\tan \alpha$ leže između $\frac{1}{4}$ do $\frac{3}{4}$. Veći nagibi se upotrebljavaju pri porinuću manjih brodova. Kut nagiba navoza α može biti promjenljiv ako navoz nije ravan nego zakrivljen po kružnom luku (radijusi od 5000 do 15000 m). Zakrivljeni navoz ima bliže vodi



Sl. 3. Pojedine faze uzdužnog porinuća