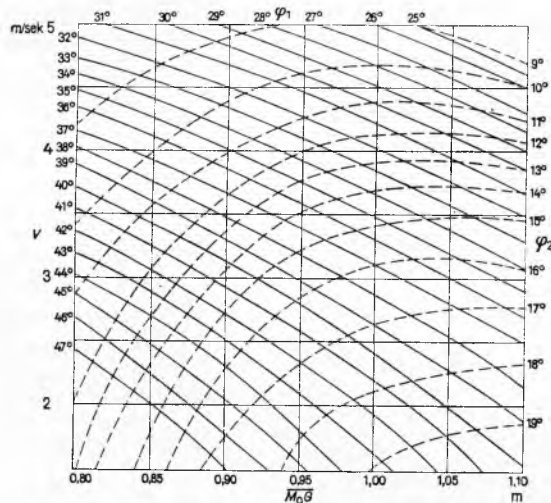


Najopasnija je četvrta faza porinuća, kada se brod giba slabodno u vodi. Ako je vodostaj nizak, brod se može razbiti o dno, a ako se jako nagne, može se prevrnuti ili udariti bokom o obalu.

Teorijski proračun porinuća svodi se na pronalaženje i rješavanje diferencijalnih jednačbi gibanja za svaku fazu. U tu svrhu postavlja se koordinatni sistem s jednom vertikalnom a drugom horizontalnom osi na kraj navoza, pa se umnošci mase broda s komponentama njegove akceleracije u smjeru odabranih osi izjednačuju sa sumom komponenta svih sila koje djeluju na brod u smjeru dotičnih osi. Treća jednačba dobiva se tako da se izjednači suma momenata svih sila s obzirom na ishodište koordinatnog sistema s umnoškom momenta tromosti mase broda i njegove kutne akceleracije. Rješenjem tih jednačbi dobivaju se kutovi zaokreta i prevaljeni putovi broda u horizontalnom i vertikalnom smjeru kao funkcije vremena, čime je u svakom času fiksiran položaj broda. Prva i druga derivacija tako određenih vrijednosti po vremenu daju odgovarajuće brzine i akceleracije broda.

Teorijski proračun je kompliciran i netačan jer je teško odrediti utjecaj otpora vode, dodatnih masa, popuštanja podloge itd., a osim toga dobivene diferencijalne jednačbe nisu linearne, pa se rješavaju približnim metodama uz sukcesivne aproksimacije, što je prilično dugotrajno. Zato se porinuće obično vrši prema



Sl. 9. Ovisnost kutova nagiba  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  o brzini gibanja i početnoj metacentarskoj visini pri poprečnom porinuću broda

iskustvu ili pomoću dijagrama sastavljenih na osnovu ispitivanja modela (sl. 9).

Za poprečno porinuće potrebno je znati (v. sl. 8): maksimalni kut nagiba  $\varphi_1$  kad brod side s navoza (ne smije preći stanovitu granicu da se brod ne prevrne), maksimalni kut nagiba  $\varphi_2$  na suprotnu stranu (ne smije biti tolik da bi brod udario o kraj navoza) i maksimalnu dubinu urona broda (mora biti manja nego što je raspoloživa dubina vode pred navozom). Teorijska i praktična ispitivanja (sl. 9) pokazala su da se u četvrtoj fazi porinuća postiže to manji kut nagiba broda  $\varphi_1$  što su veće početna metacentarska visina, istisnina i brzina broda, što je veći nagib navoza i što su manji razmak površine vode od kraja navoza i dubina vode, dok širina vode nema znatnijeg utjecaja. Mali kut nagiba  $\varphi_2$  postiže se malom metacentarskom visinom i malom istisninom broda, većim nagibom navoza i većom brzinom broda pri porinuću, malom udaljenosti površine vode od kraja navoza i manjom dubinom vode. S porastom istisnine, porastom udaljenosti površine vode od kraja navoza i smanjenjem dubine vode raste mogućnost da se brod ošteti udarom o dno. Ako se na brod postave ljuljne kobilice, nešto se smanjuju kutovi  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  i dubina urona broda. Kako su gornji uvjeti za postizanje sigurnog porinuća ponekad i protuslovni, treba ih dobro ocijeniti u svakom pojedinom slučaju. Za to mogu dobro poslužiti dijagrami dobiveni na osnovu ispitivanja modela (sl. 9) u kojima su nanese sve vrijednosti od interesa za bočno porinuće, u zavisnosti od početne metacentarske visine i brzine broda, u trenutku kad se težište sistema  $G$  nalazi iznad kraja navoza. U svakom dijagramu konstantne su ove vrijednosti:

$H_B$ , visina kraja navoza od dna vode;  $H_W$ , dubina vode pred navozom;  $D$ , težina broda pri porinuću;  $d$ , visina osnovke broda (gornjeg brida kobilice) iznad razine vode u času kad se težište sistema  $G$  nalazi iznad kraja navoza. Variranjem vrijednosti gornjih veličina dobiva se serija dijagrama. Brzina broda može se proračunati u svakom trenutku, slično kao i pri uzdužnom porinuću, iz jednačbe bilance energije:

$$D h = \frac{D}{g} \frac{V^2}{2} + \int_0^s \mu D \cos \alpha \, ds \pm C_v \int_0^s A_L \frac{\rho}{2} V_v^2 \, ds.$$

Lijeva strana ove jednačbe daje gubitak na potencijalnoj energiji.  $D$  je težina broda i  $h$  je vertikalni razmak za koji se je spustilo težište sistema pri porinuću. Prvi član desne strane daje kinetičku energiju.  $D/g$  je masa broda, a  $V$  je njegova brzina. Drugi član daje rad sile trenja  $\mu D \cos \alpha$  na putu  $s$ . Treći član daje rad sile vjetrova, koji se zbog velike bočne površine broda  $A_L$ , izložene vjetru mora uzeti u obzir,  $\rho$  je gustoća zraka,  $V_v$  je brzina vjetrova,  $C_v$  je koeficijent otpora, zavisan od oblika broda.

J. Uršić

### OTPOR BRODA

Otpor broda je sila koja se suprotstavlja kretanju broda. Svako tijelo pri gibanju kroz vodu nailazi na otpor čija veličina ovisi o raspodjeli strujanja vode oko tijela. Strujanje oko broda je vrlo složena pojava, pa ga je nemoguće tačno matematički definirati i time matematički proračunati oblik broskog trupa koji bi bio za otpor najpovoljniji.

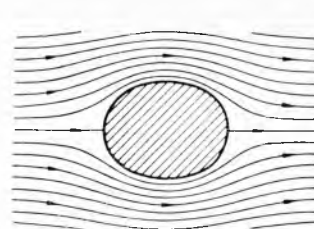
Vjekovima su se brodovi gradili na osnovu iskustva i osjećaja, a oblik broskog trupa se je vrlo sporo usavršavao. Tek u XVIII st. po prvi put naučenjaci pokušavaju da teorijskim i eksperimentalnim putem odrede oblik broskog trupa koji bi pružao najmanji otpor. Newton, Euler, Bernoulli, d'Alembert i drugi istraživali su otpor tijela raznih oblika u tekućini, ali ta prva istraživanja nisu dala za praksu korisne rezultate jer su, s jedne strane, radovi naučenjaka bili nerazumljivi praktičnim brodograditeljima, a s druge strane, izvedeni zaključci nisu bili tačni zbog tadanjeg vrlo oskudnog poznavanja zakona hidrodinamike.

U XIX st. uvodi se parni stroj kao pogonsko sredstvo broda i prelazi se sa drvene na čeličnu brodsku konstrukciju, što znači revoluciju čitave brodogradnje i jedan novi kvalitet, koji nužno zahtijeva da se i oblik broda prilagodi većim brzinama i zahtjevima ekonomičnosti pogona. Brojni naučni radnici se počinju baviti problemom otpora broda, pa 1869 engleski inženjer William Froude postavlja svoj 'zakon sličnosti' i na osnovu njega razvija metodu određivanja otpora broda prema rezultatima ispitivanja modela. Froudeova metoda se je održala do danas i primjenjuje se u svim bazenima za ispitivanja broskih modela. Nova naučna otkrića u XIX i početku XX st. dala su teorijske osnove za bolje razumijevanje problema otpora broda. Reynolds (1883) formulira svoj zakon sličnosti za pojave strujanja tekućine pod utjecajem samo unutarnjih sila trenja; Kelvin (1890) nalazi matematičko rješenje problema valova koje stvara brod; Mitchell (1898) postavlja osnove hidrodinamičke teorije otpora valova; Prandtl (1913) objavljuje teoriju graničnog sloja, itd.

Zahvaljujući tim solidnim teorijskim osnovama i intenzivnim eksperimentalnim istraživanjima sa broskim modelima, nauka o otporu broda se je u novije vrijeme naglo razvila. Teoretičari, kao Havelock, Hogner, Wigley, Weinblum, Guilloton i drugi, postigli su vrlo značajne rezultate u primjeni čisto matematičkih metoda za proračun otpora valova, pa je danas pomoću elektroničkih računala već moguće odrediti otpor valova nekih određenih, matematički tačno definiranih formi broskog trupa. Sistematska ispitivanja broskih modela i eksperimentalna istraživanja otpora trenja koja su vršili Taylor, Kempf, Schoenherr, Gebers, Todd, Hughes, Lap i drugi razjasnila su mnogome ovisnost otpora broda o glavnim parametrima oblika trupa i usavršili način prenosa rezultata ispitivanja modela na uvjete stvarnog broda.

### Strujanje tekućina oko tijela

Strujanje tekućine oko tijela predočeno je shematski na sl. 1. Na kratkoj udaljenosti ispred tijela strujnice se počinju razilaziti,



Sl. 1. Oblik strujnica uz površinu krutog tijela

brzina strujanja pada a pritisak raste. Na samoj srednjoj strujnici, na prednjem i na stražnjem kraju tijela, brzina padne na nulu i sva se pretvori u pritisak.

Taj se pritisak zove *pritisak brzine* ili *dinamički pritisak*, a jednak je  $\frac{1}{2} \rho V^2$ , gdje je  $\rho$  gustoća tekućine,  $V$  brzina strujanja.

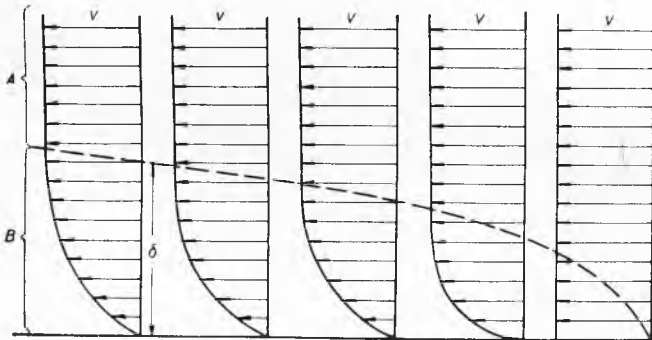
Prema sredini tijela strujnice se suzuju, i to više nego što su se ranije širile, pa brzina strujanja raste a pritisak pada. U idealnoj tekućini bez trenja na krajnjoj krmenoj tački tijela pritisak ponovo poraste na vrijednost dinamičkog pritiska. Ako je tijelo duboko uronjeno u idealnu tekućinu, sile koje nastaju uslijed razlika u pritisacima međusobno se poništavaju, a kako ne postoji ni trenje, neće postojati ni ikakav otpor gibanju tijela (*d'Alembertov paradoks*).

U idealnoj tekućini bez trenja na krajnjoj krmenoj tački tijela pritisak ponovo poraste na vrijednost dinamičkog pritiska. Ako je tijelo duboko uronjeno u idealnu tekućinu, sile koje nastaju uslijed razlika u pritisacima međusobno se poništavaju, a kako ne postoji ni trenje, neće postojati ni ikakav otpor gibanju tijela (*d'Alembertov paradoks*).

OVAKO nerotaciono strujanje idealne tekućine zove se potencijalno jer su ravnine konstantnog potencijala uvijek okomite na smjer strujnica, tj. komponente brzine u smjeru tri glavne osi mogu se izvesti iz jednog potencijala. Kad je strujanje potencijalno, slojevi idealne tekućine neposredno uz površinu krutog tijela struje brzinom određenog konačnog iznosa. U realnoj viskoznoj tekućini uslijed unutarnjeg trenja ne može postojati ovakav nagli skok u brzini između prvog sloja tekućine i površine krutog tijela. Sloj tekućine uz površinu tijela mora imati brzinu jednaku brzini tijela. Zbog toga se u viskoznoj tekućini uvijek javlja u blizini površine krutog tijela dodatni gradijent brzine koji ima za posljedicu tangencijalno naprezanje, pa kruto tijelo koje se giba u viskoznoj tekućini neminovno mora savladati otpor trenja.

U vrlo viskoznom tekućinama (gustom hladnom ulju, paklini itd.) sile viskoznosti mogu biti tolike da potpuno nadvladaju sile tromosti, tj. tijelo koje se giba na površini takve tekućine ne može uopće stvarati valove, već se čitav otpor sastoji od sila viskoznosti. Drukčiji je slučaj realne tekućine vrlo malog viskoziteta kao što je voda. U njoj se sile viskoziteta mogu zanemariti svagdje osim neposredno uz površinu tijela u jednom vrlo tankom sloju koji se zove *granični sloj*. Izvan graničnog sloja strujanje vode uz tijelo jednako je strujanju idealne tekućine.

Kad realna tekućina jednoliko struji uz ravnu ploču, nastaju tangencijalne sile koje se odražavaju duž čitave ploče. Voda duž ploče gubi brzinu a debljina graničnog sloja prema stražnjem rubu ploče raste. Raspored brzina u graničnom sloju predočen je na



Sl. 2. Raspored brzina u graničnom sloju. A neporemećeno potencijalno strujanje, B granični sloj

sl. 2. Promjena impulsa u jedinici vremena na stražnjem rubu ploče jednaka je otporu trenja na koji ploča nailazi. Analogna se pojava javlja i uzduž vanjske oplata broda.

Kad tekućina potencijalno struji niz tijelo slično brodu, raste na prednjem dijelu pritisak zbog pada brzine. Duž srednjeg dijela tijela brzina poraste i premaši opću brzinu strujanja, uz odgovarajući pad pritiska, a prema krmenom dijelu tijela brzina ponovo pada a pritisak raste. Pad brzine duž krmenog dijela tijela baš je tolik da na samoj krmi brzina opet postane jednaka nuli i da se sva pretvori u dinamički pritisak. U viskoznoj se tekućini uslijed trenja smanjuje porast brzine uzduž srednjeg dijela tijela i zbog toga brzina unutar graničnog sloja postaje jednaka nuli već prije same krme. Zato u

području povećanog pritiska na krmenom dijelu broda tekućina zaostaje izgubivši svoju kinetičku energiju. Naknadno prispjele čestice struje oko ove zaostale mase vode, pa se granični sloj zajedno s potencijalnim strujanjem odlepljuje od brodske oplata, a voda unutar tog dijela graničnog

sloja počinje da se vrtloži (sl. 3). Konačno se uspostavi ravnoteža tako da se stanovita masa vrtložne vode počinje kretati zajedno s brodom, a potencijalno strujanje se skrene izvan ove vrtložne mase vode, daleko od brodske oplata, što u pogledu strujanja djeluje kao da se promijenila forma broda. Zbog ove pojave opada povoljni utjecaj područja visokog pritiska na krmenom dijelu, tj. na krmi se smanjuje sila pritiska koja djeluje u smjeru gibanja



Sl. 3. Otkidanje graničnog sloja na krmi broda. A potencijalno strujanje, B područje vrtložnja

broda i nije više jednaka sili pritiska na pramcu koja djeluje suprotno od smjera gibanja broda. Ova razlika se zove *otpor pritiska*.

Otpor pritiska se ponekad naziva i otporom virova, što nije potpuno adekvatan naziv. Virovi nastaju kao posljedica odljepljivanja graničnog sloja, dakle kad postoji otpor pritiska, ali u vitkih brodova sa postepenom promjenom pritiska duž broskog trupa granični sloj se ne odljepljuje. U takvom graničnom sloju su također virovi, ali takav vrtložni granični sloj glatko otječe s krme broda, a promjena impulsa sadržana u virovima odgovara otporu trenja. Prema tome otpor virova ne može se jasno definirati, jer je djelomično sadržan u otporu pritiska a djelomično u otporu trenja.

Ako se neko tijelo kreće djelomično uronjeno u tekućinu, ono će stvarati valove. Valovi nastaju kao posljedica razlike između konstantnog atmosferskog pritiska iznad razine tekućine i promjenljive raspodjele pritiska u strujanju tekućine uzduž uronjenog dijela tijela. Tamo gdje je u tekućini pritisak veći od atmosferskog, kao npr. na pramcu broda, nivo tekućine se diže i nastaje valni brijeg, a gdje je manji, kao npr. u sredini broda, nivo se spušta i nastaje valni dol. Za takvu dislokaciju čestica tekućine troši se energija potrebna da se savlada sila teže, odnosno, tijelo koje stvara valove treba da savlada i tzv. otpor valova, bez obzira na to da li se kreće u idealnoj ili u realnoj tekućini.

### Komponente otpora broda

Otpor broda je vrlo složen fenomen; stoga, da bi se praktički mogao analizirati i proračunavati, rastavlja se na pojedine komponente koje se mogu odrediti bilo matematički bilo eksperimentalno. Takva podjela otpora je u stvari proizvoljna i nije potpuno egzaktna jer se pojedine komponente otpora međusobno isprepliću i jedna na drugu utječu, ali naše današnje znanje ne omogućava drugo rješenje. S druge strane, ovakvo parcijalno određivanje i analiziranje otpora broda daje za praktične potrebe potpuno zadovoljavajuće rezultate. Otpor koji tekućina pruža gibanju broda nastaje uslijed viskoznih svojstava tekućine i uslijed stvaranja valova. Stoga se uzimaju kao komponente otpora broda nastale djelovanjem sila viskoziteta: *otpor trenja* i *otpor pritiska*, a kao komponenta nastala djelovanjem sila inercije i gravitacije: *otpor valova*. Nadvodni dio broda nailazi na *otpor zraka*. Razni izdanci na podvodnom dijelu trupa, kao što su ljuljne kobilice, skrokovi, nogavice propelerskih osovina itd., povećavaju otpor broda zbog trenja i jer često uzrokuju stvaranje virova. Taj otpor se naziva *otpor privjesaka*. Sve ove komponente ukupnog otpora postoje u mirnoj vodi, u idealnim vremenskim prilikama i kad je oplata broda čista i svježe bojadisana. U prosječnim uvjetima eksploatacije broda javljaju se još neke komponente ukupnog otpora koje se zajedno nazivaju *dodatni otpori*. Dodatni otpori obuhvaćaju: povećanje otpora trenja uslijed obraslosti brodske oplata, dakle povećane hrapavosti oplata, povećanje otpora uslijed djelovanja vjetrova, uzburkanog mora i rezultirajućih oscilatornih gibanja broda na morskim valovima, i povećanje otpora izazvano kormilarenjem, tj. skretanjem kormila da bi se brod održao na određenom kursu.

**Otpor trenja.** William Froude je prvi podijelio otpor broda, i to na dvije komponente: otpor trenja i preostali otpor. Ovakvom podjelom on je došao do praktične metode određivanja otpora broda: dokazao je da se za praksu dovoljno tačni rezultati dobivaju ako se otpor trenja matematički proračuna a preostali otpor odredi ispitivanjima modela broda.

Otpor trenja  $R_F$  je ovisan o veličini i hrapavosti uronjene površine broda  $S$ , gustoći vode  $\rho$  i brzini broda  $V$ . Da bi došao do metode za proračun otpora trenja, W. Froude je ispitivao otpor uronjenih ravnih ploča različite hrapavosti, gibanju kojih se suprotstavljao samo otpor trenja. Pomoću tih ispitivanja došao je do izraza za otpor trenja ravne ploče:

$$R_F = f S V^n, \quad (1)$$

gdje je  $f$  koeficijent trenja ploče,  $S$  površina ploče,  $V$  brzina tečenja ploče.

W. Froude je vršio ova ispitivanja 1877, dakle jedanaest godina prije nego što je Reynolds objavio svoje klasične radove o viskozitetu fluida, pa je zaključio da se vrijednost koeficijenta  $f$  mijenja s dužinom ploče, a eksponent brzine  $n$  da ostaje gotovo konstantan, naročito kad je brzina veća.

Svoju pretpostavku da je otpor trenja brodske forme jednak otporu trenja ravne ploče čija je dužina jednaka dužini broda a površina jednaka oplakanoj površini broda, W. Froude je provjerio ispitivanjem korvete »Greyhound« u naravnoj veličini i njenog modela u mjerilu 1/16. Otkrio je da se otpor modela podudara s otporom broda ako se za otpor trenja modela primijene koeficijenti potpuno glatke ploče, a za otpor trenja broda koeficijenti dobiveni na pločama hrapave površine. W. Froudeov sin R. E. Froude je nastavio istraživanje otpora trenja i razradio je koeficijente trenja da odgovaraju konstantnom eksponentu brzine  $n = 1,825$ , i ekstrapolirao ih je za dužine broda do 1200 stopa. Ti koeficijenti, razrađeni 1885, još i danas služe za proračun otpora trenja brodova i modela.

Le Besnerais je postavio formulu za Froudeove koeficijente otpora trenja u metričkom sistemu mjera:

$$f = 0,1392 + 0,258/(2,68 + L), \quad (2)$$

gdje je  $L$  dužina broda u metrima. Ovi koeficijenti važe za temperaturu vode od  $15^\circ\text{C}$ , a za druge temperature treba ih ispraviti prema formuli:

$$f' = f(1 + 0,0043 \Delta t),$$

gdje je:  $\Delta t = (15 - t)^\circ\text{C}$ , tj. ispravak je negativan ako je  $t > 15^\circ\text{C}$ .

Froudeovi koeficijenti otpora trenja, koliko god su za praksu dovoljno tačni, nisu fizikalno ispravni. Oni su funkcija jedino dužine broda, te se za različite dužine a istu vrijednost Reynoldsovog broja (v. str. 194) dobivaju različiti koeficijenti trenja, a to je u principu pogrešno, jer su u slučaju jednakih Reynoldsovih brojeva strujanja fizikalno slična, pa i koeficijenti otpora trenja moraju biti jednaki. I sama Froudeova metoda proračuna otpora trenja broda nije fizikalno opravdana, jer se otpor trenja prostorne, trodimenzijske površine brodske oplake računa pomoću koeficijenata otpora trenja ravne ploče sa dvodimenzijским strujanjem.

Principijelnu neispravnost Froudeovih koeficijenata otpora trenja nastojali su kasnije ispraviti brojni drugi istraživači ispitujući ovisnost bezdimenzijskih koeficijenata trenja o Reynoldsovom broju  $Re$ . Schoenherr je 1932 prikupio sve do tada poznate rezultate ispitivanja trenja ploča i nanio ih u zajednički dijagram (sl. 4) u obliku koeficijenata trenja  $C_F = R_F / \frac{1}{2} \rho S V^2$  kao funkcije od  $Re$ . Na osnovu tih podataka Schoenherr je u Kármánovu teorijsku formulu za koeficijent otpora trenja,

$$K/\sqrt{C_F} = \log(Re \cdot C_F) + C,$$

uvrstio za  $K = 0,242$  a za  $C = 0$ , i dobio krivulju koja s dovoljnom tačnošću izražava srednje vrijednosti svih u dijagramu nanesenih rezultata. Schoenherrova formula za koeficijent trenja tehnički glatke ploče u turbulentnom strujanju glasi dakle:

$$0,242/\sqrt{C_F} = \log(Re \cdot C_F). \quad (3)$$

Krivulja koeficijenata  $C_F$  prema gornjoj formuli poznata je pod imenom »linija ATTC-1949« i danas se u Americi općenito upotrebljava za proračun otpora trenja broda.

Kako i ATTC-krivulja za niske Reynoldsove brojeve daje preniske vrijednosti koeficijenta  $C_F$ , predložena je 1957 »linija ITTC-1957« definirana jednadžbom:

$$C_F = 0,075/\log(Re - 2)^2, \quad (4)$$

koja se od Schoenherrove krivulje razlikuje jedino kod niskih Reynoldsovih brojeva (sl. 4). Linija ITTC-1957 danas je prihvaćena od većine institucija za ispitivanja brodskih modela.

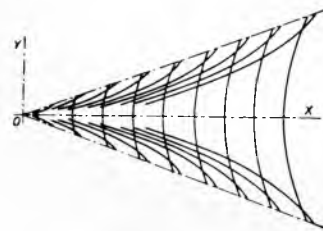
Otpor trenja je dominantan kod nižih relativnih brzina  $V/\sqrt{L} < 0,7$  čv.  $\text{ft}^{-\frac{1}{2}}$ , kad iznosi i do 80% ukupnog otpora, a kod viših relativnih brzina  $V/\sqrt{L} > 1$  dominantnu ulogu preuzima otpor stvaranja valova.

**Otpor valova.** Kelvin je 1890 matematički dokazao da tačka visokog pritiska gibanjem na slobodnoj površini tekućine stvara sistem razilaznih i poprečnih valova (sl. 5). Razmak između dva uzastopna poprečna vala (dužina vala) ovisi o brzini gibanja tačke visokog pritiska, koja je brzina ujedno jednaka brzini rasprostiranja vala:

$$\lambda = \frac{2\pi}{g} c^2, \quad (5)$$

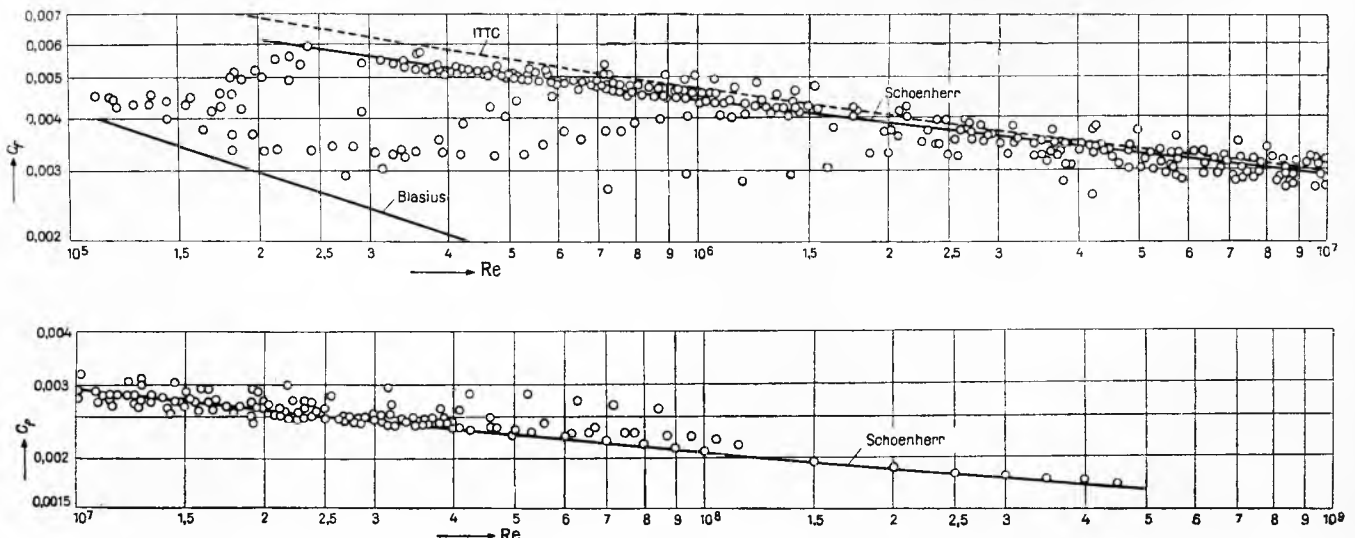
gdje je  $\lambda$  dužina vala,  $c$  brzina gibanja tačke visokog pritiska odnosno brzina rasprostiranja vala,  $g$  ubrzanje sile teže.

Može se pretpostaviti da je raspored pritisaka duž broskog trupa sastavljen od beskonačnog broja tačaka visokog i niskog pritiska, od kojih svaka stvara sistem valova prema sl. 5, pa je sistem valova koji rezultira suma svih tih pojedinačnih sistema. Karakter rezultatnog valnog sistema ovisi o rasporedu mjesta na kojima se javljaju maksimalni natpritisaci i potpritisaci. Ta mjesta su uvijek na pramcu i na krmu broda, a mogu nastati i na prijelazu sa pramčanog zaoštrenja na paralelni srednjak i na prijelazu paralelnog srednjaka u krmeno zaoštrenje (pramčano i krmeno rame) ako ovi prijelazi nisu izvedeni postepeno.



Sl. 5. Sistem valova nastalih gibanjem tačke visokog pritiska

Za brodove se može općenito uzeti da je konačni sistem valova sastavljen od 4 komponentna sistema: od pramčanog valnog sistema koji počinje s valnim grebenom zbog natpritisaka na pramcu, od valnog sistema pramčanih ramena koji počinje s valnim dolom a nastaje zbog područja niskog pritiska između sredine broda i natpritisaka na pramcu; od valnog sistema krmениh ramena koji počinje s valnim dolom na području niskog pritiska između sredine broda i natpritisaka na krmu, i konačno, od krménog sistema valova koji počinje s valnim grebenom zbog natpritisaka na krmu broda. Najviše dolaze do izražaja pramčani i krmени sistemi valova, koji uvijek nastaju na tačno određenim mjestima zbog presudnog



Sl. 4. Koeficijent trenja ATTC-1949 i ITTC-1957

utjecaja visokih pritisaka na pramcu i na krmi broda. Za obične brodske forme nije lako odrediti na kojem će se mjestu pojaviti sistemi valova pramčanih i krmenih ramena. Jedino u slučaju naglih prijelaza u formi broda oni se javljaju na samim ramenima.

Sva ova 4 sistema valova među sobom interferiraju, te o tome ovisi rezultantni sistem valova i energija utrošena na njegovo stvaranje, odnosno veličina otpora valova. Energija sadržana u čelnom valu poprečnog rezultantnog sistema valova proporcionalna je širini vala  $b$ , kvadratu visine  $h$  i dužini vala  $\lambda$ :

$$E = q b h^2 \lambda, \quad (6)$$

gdje je  $q$  neki koeficijent proporcionalnosti.

Količina energije utrošena na stvaranje valova pri kretanju broda duž nekog puta  $x$  jednaka je produktu energije čelnog vala  $E$  i omjera  $x/\lambda$ , što opet mora biti jednako izvršenom radu, dakle produktu otpora stvaranja valova  $R_w$  i prevaljenog puta:

$$R_w x = q b h^2 \lambda (x/\lambda).$$

Širina vala  $b$  je proporcionalna dužini vala  $\lambda$  jer se širina prostire jedino unutar razilaznih valova, a dužina  $\lambda$  i visina vala  $h$  su proporcionalne kvadratu brzine, pa se gornji izraz može pisati:

$$R_w = q c^6. \quad (7)$$

Otpor koji rezultira iz sva 4 komponentna valna sistema ovisi o njihovoj interferenciji, a ova ovisi o pomaku faza među pojedinim sistemima valova. Ako je  $z$  udaljenost između grebena pojedinih sistema, otpor valova iznosi:

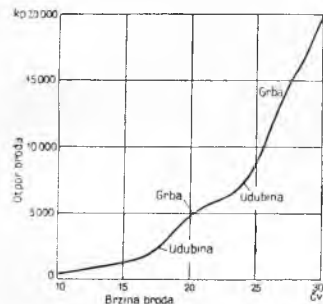
$$R_w = q c^6 \left[ 1 + \sum_{m,n=1}^4 q_{mn} \cos(2\pi z_{mn}/\lambda) \right], \quad (8)$$

gdje se indeksi  $m$  i  $n$  odnose na komponentne sisteme valova. Prema tome rezultantni otpor stvaranja valova može se zamisliti da je sastavljen od:  $R_{w0} = q c^6$  (što bi bila veličina otpora stvaranja valova kad ne bi postojao međusobni utjecaj pojedinih sistema valova) i od 6 članova oblika:

$$R_{w_{mn}} = q_{mn} c^6 \cos(2\pi z_{mn}/\lambda) \quad (9)$$

koji sadrže komponente međusobnih utjecaja pojedinih od 4 sistema valova.

Zbog periodičkih članova u jednadžbi (8) krivulja ukupnog otpora broda, predložena kao funkcija brzine, oscilira oko srednje vrijednosti  $q c^6$  (sl. 6). Područja relativno većih otpora zovu se »grbe«, a područja manjih otpora »udubine« na krivulji otpora. Pri projektiranju je važno odabrati dužinu broda tako da otpor valova kod brzine u službi padne u područje udubine na krivulji otpora, jer će brod u tom slučaju postići traženu brzinu s relativno manjom snagom strojeva.



Sl. 6. Krivulja otpora (s grbama)

Razvito je više metoda za određivanje područja većih otpora stvaranja valova. Jedna od najstarijih je poznata pod imenom Z-teorije, a potječe od R. E. Froudea. Ova teorija pretpostavlja da je rezultantni sistem valova po krmi broda sastavljen od sistema valova pramčanog i krmenog dijela broda i da položaj grebena čeonog vala pramčanog sistema i položaj doline čeonog vala krmenog sistema ne ovise o brzini. Razmak  $Z$  između grebena pramčanog vala i doline krmenog vala nazvan je dužinom stvaranja valova (sl. 7). Prema Z-teoriji najveći otpor valova nastaje kad je

$$Z/\lambda = (2k + 1)/2 \quad (10)$$

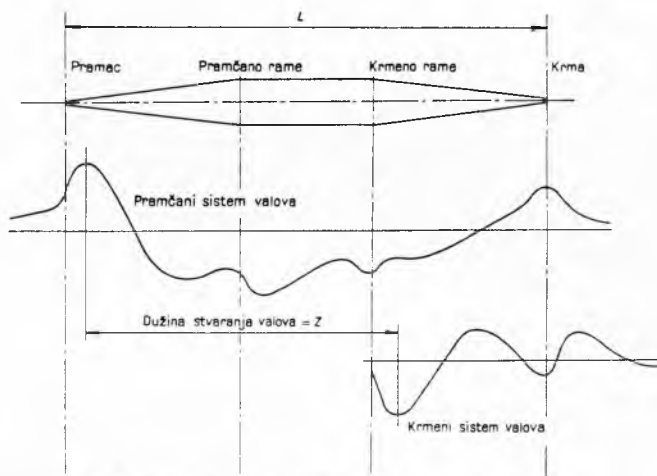
a najmanji kad je

$$Z/\lambda = k, \quad (10a)$$

gdje su  $k$  cijeli brojevi: 0, 1, 2, ..., odnosno, grbe na krivulji otpora javljaju se u blizini Froudeovih brojeva:

$$V/\sqrt{gL} = 0,22, 0,29 \text{ i } 0,45,$$

gdje je  $V$  brzina a  $L$  dužina broda. Zato pri izboru dužine i brzine



Sl. 7. Rastavljanje rezultantnog sistema valova po Z-teoriji

broda treba voditi računa o tome da se izbjegnu ovi Froudeovi brojevi. Nedostatak je ove teorije što je vrlo teško za neki konkretan brod odrediti veličinu  $Z$ .

Baker i Kent su dužinu stvaranja valova definirali jednadžbom

$$Z = \varphi L + \lambda/4 \quad (11)$$

gdje je  $\varphi$  prizmatički koeficijent broda,  $L$  dužina broda, a  $\lambda$  dužina vala. Oni su povezali interferenciju valnih sistema sa tzv. okruglom konstantom brzine  $\mathcal{P}$ :

$$\mathcal{P} = \sqrt{\lambda/\varphi L} = \sqrt{2\pi V^2/g\varphi L}, \quad (12)$$

pa je prema toj teoriji, nazvanoj » $\mathcal{P}$ -teorija«, maksimalni otpor stvaranja valova kad je

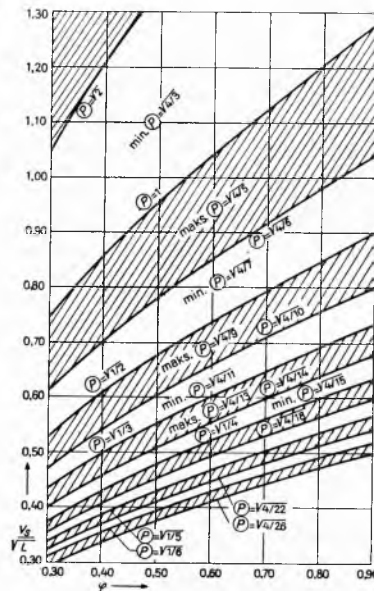
$$Z = \lambda(2k + 1)/2, \text{ odnosno } \mathcal{P} = \sqrt{4/(4k + 1)},$$

a minimalan otpor stvaranja valova kad je

$$Z = k\lambda, \text{ odnosno } \mathcal{P} = \sqrt{4/(4k - 1)}$$

tj. maksimalni otpor stvaranja valova nastaje kad je  $\mathcal{P} = \frac{4}{13}$ ,

$\frac{4}{9}, \frac{4}{5}$ , a minimalni kad je  $\mathcal{P} = \frac{11}{4}, \frac{4}{7}, \frac{4}{3}$ . Za vrijednost  $\mathcal{P}$  veću od 1,1, tj. za velike brzine, ova teorija nije pouzdana (za po-



Sl. 8. Područja minimalnih i maksimalnih otpora valova prema P-teoriji;  $V_s$  u čvorovima,  $L$  u stopama

sljednju grbu na krivulji otpora daje previsoku brzinu), inače se pomoću nje dobivaju dosta dobri rezultati za početni stadij pro-

jektiranja broda. Na sl. 8 prikazana su područja maksimalnih i minimalnih otpora stvaranja valova prema ovoj teoriji u ovisnosti o prizmatičkom koeficijentu  $\varphi$  i relativnoj brzini  $V/\sqrt{L}$ , gdje je  $V$  brzina broda u čvorovima, a  $L$  dužina broda u stopama.

Područja brzina broda u kojima dolazi do maksimalnog odnosno minimalnog otpora stvaranja valova mogu se odrediti i iz izraza (9). Komponenta otpora stvaranja valova uslijed interferencije valnih sistema imat će maksimalnu vrijednost kad je:

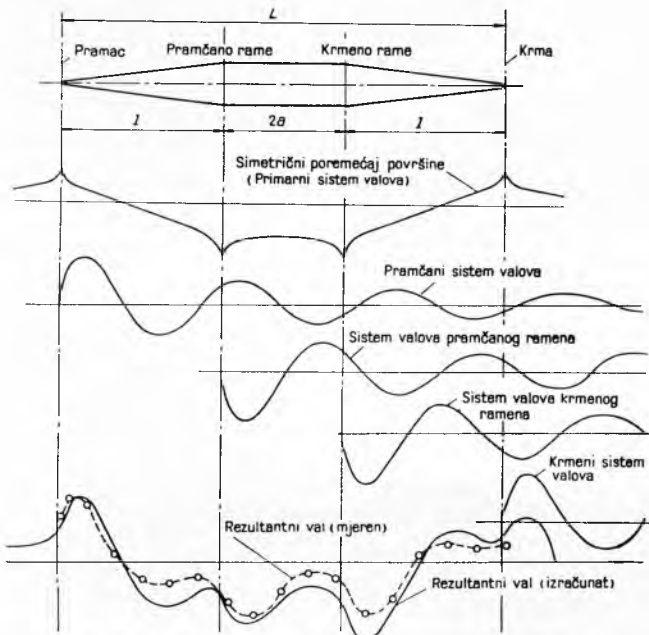
$$\cos(2\pi Z/\lambda) = 1, \text{ odnosno } 2\pi Z/\lambda = 2k\pi, \quad (13)$$

a minimalnu vrijednost kad je:

$$\cos(2\pi Z/\lambda) = -1, \text{ odnosno } 2\pi Z/\lambda = (2k+1)\pi. \quad (14)$$

Dužina trohoidnog vala je definirana izrazom (5), pa se uvrštavanjem tog izraza u jednadžbe (13) i (14) mogu odrediti brzine uz koje dolazi do maksimalnog odnosno minimalnog otpora stvaranja valova.

Nijednom od ovih metoda ne može se odrediti veličina otpora valova, već samo područja brzina broda koja su kritična za otpor



Sl. 9. Sistem valova kod jednostavnog geometrijskog tijela

stvaranja valova, a i to samo približno, jer sve metode vrlo složene pojave stvaranja valova znatno pojednostavnjuju i pretpostavljaju pravilne trohoidne valove, koji se razlikuju od stvarnih valova. Međutim, i takvi rezultati su dovoljno pouzdani za izradu pretprojekta broda i za izbor povoljnog odnosa brzine i dužine broda.

Postoje realne mogućnosti da se otpor stvaranja valova izračuna čisto matematičkim putem. Na taj je način Wigley (1930) za klinasti oblik broda neizmerno velikog gaza izračunao i odredio oblike valova u uzdužnoj ravnini simetrije. Na sl. 9 uspoređeni su rezultati njegovog proračuna s rezultatima dobivenim ispitivanjem modela. Vidi se da se konačni oblici rezultirajućeg vala dosta dobro podudaraju. U novije vrijeme matematičke metode proračuna otpora valova znatno su usavršene te se je došlo do nekih značajnih kvalitativnih rezultata. Razvoju tih matematičkih metoda je u znatnoj mjeri doprinijela i primjena elektroničkih računala. Za normalne brodske forme danas je još matematička metoda određivanja otpora valova suviše komplicirana i dugotrajna, a pored toga zahtijeva znanje više matematike kakvo obični inženjeri brodogradnje nemaju.

**Otpor pritiska** može biti značajniji samo kad je oblik brodskog trupa pun ili ako je forma trupa loša, s naglim zakrivljenjima na krmenom dijelu. Vitki brodovi imaju vrlo malen otpor pritiska. Puniji brodovi, sa prizmatičkim koeficijentom  $\varphi > 0,73$ , također će imati malen otpor pritiska ako se linije krmenog dijela broda izvedu tako da se spriječi odvajanje graničnog sloja od oplate i stvaranje vrtloga.

Otpor pritiska je posljedica viskoznih svojstava tekućine, ali kao i otpor valova ovisi o obliku trupa broda. Zato se te dvije komponente ukupnog otpora ponekad nazivaju zajednički *otporom forme*. Veličina otpora pritiska ne može se odrediti ni matematičkim ni eksperimentalnim metodama.

**Otpor zraka** ovisi o površini projekcije nadvodnog dijela broda na poprečnu ravninu i o brzini gibanja broda. Analogno otporu u tekućini, otpor zraka se može podijeliti na nekoliko komponenta: otpor trenja, otpor pritiska i otpor stvaranja valova. Ova posljednja komponenta je potpuno beznačajna jer je gustoća zraka toliko mala da je djelovanje gravitacijskih sila praktički zanemarljivo. I otpor trenja je manje značajan od otpora pritiska, koji ovisi o obliku, visini i širini nadvodnog dijela broda i o rasporedu nadgrada. Povezivanjem cijelog nadgrada u jednu cjelinu bez zasebnih kućica, pomicanjem viših nadgrada prema krmi, zaobljenjem prednjeg čela nadgrada i uklapanjem dimnjaka, jarbola, čamaca za spasavanje itd. u dobru strujnu formu nadvodnog dijela broda, otpor pritiska a time i ukupni otpor zraka se znatno smanjuje.

Otpor zraka  $R_z$  pri mirnom vremenu bez vjetra iznosi:

$$R_z = C_z \cdot \rho_z / 2 \cdot V^2 \cdot A_T, \quad (16)$$

gdje je  $C_z$  koeficijent otpora zraka (za brodove s običnom izvedbom nadgrada iznosi  $1 \dots 1,3$ , a za brodove sa dobrom strujnom formom nadgrada  $0,6 \dots 0,7$ ),  $\rho_z$  gustoća zraka ( $1,226 \text{ kg/m}^3$ ),  $V$  brzina broda,  $A_T$  površina projekcije nadvodnog dijela broda na poprečnu ravninu.

U idealnim vremenskim uvjetima otpor nadvodnog dijela broda nije bitan, ali pri lošem vremenu, uz dodatno djelovanje vjetra, taj otpor može naglo porasti (v. Dodatni otpori malo niže). Jedino za vrlo brze sportske jedinice, glisere i čamce s podvodnim krilima otpor zraka i aerodinamičke sile koje djeluju na nadvodni dio trupa mogu imati značajan utjecaj na brzinu i ponašanje čamca. Zato trup takvih čamaca mora imati povoljan oblik s obzirom na djelovanje ne samo hidrodinamičkih već i aerodinamičkih sila (v. Čamac).

**Otpor privjesaka.** Razni privjesci na podvodnom dijelu brodskog trupa (luljne kobilice, skrokovi i nogavice propelerskih osovina, perajice stabilizatora, kormila itd.) povećavaju ukupni otpor broda. Otpor privjesaka može se podijeliti na otpor trenja i otpor pritiska. Otpor trenja ovisi o oplakanoj površini privjesaka, a kako je ta površina relativno malena, i otpor trenja privjesaka je relativno malen. Veću ulogu može imati otpor pritiska, tj. stvaranje vrtloga na privjescima i iza njih. Ako se privjesci smjeste u tok strujnica oko brodskog trupa i ako se izvedu vitki, bez oštih bridova na prednjem dijelu a tupih bridova na stražnjem dijelu, s pravilnim zaobljenjima i bez naglih prijelaza, smanjit će se ili potpuno izbjeći stvaranje vrtloga, pa će i otpor pritiska biti minimalan.

Pravilnim oblikovanjem pojedinih privjesaka na krmenom dijelu broda, kao što su kormila i nogavice propelerske osovine, postiže se povoljniji raspored brzina i pritisaka vode u području propelera, a time i povoljniji stepen djelovanja propelera. Takvo poboljšanje propulzivnih svojstava broda u znatnoj mjeri kompenzira gubitke uslijed otpora samih privjesaka.

Ako su privjesci dobro izvedeni i pravilno postavljeni, može se pretpostaviti da se njihov otpor sastoji samo od otpora trenja, tj. otpor privjesaka se izračuna pomoću jednadžbi za otpor ploča u turbulentnom strujanju. Kvalitativna slika otpora privjesaka može se dobiti i ispitivanjima modela.

**Dodatni otpori** se javljaju kao posljedica momentalnih realnih uvjeta pod kojima brod plovi. Ti otpori nisu konstantni, već ovisi o nizu različitih i promjenljivih faktora kao što su: vrijeme prošlo od posljednjeg čišćenja i bojadisanja brodske oplate, vremenske prilike na moru, veličina i smjer valova i vjetra, sposobnosti kormilara itd.

Jedan od dodatnih otpora je povećanje otpora trenja uslijed *obraslosti brodske oplate*. Podvodni dio trupa broda tokom vremena obrastu školjke i alge pa se povećava hrapavost oplate, a time i otpor trenja. Opseg i vrsta obraslosti oplate u različitim su morima različiti. U toplim morima obraslost je intenzivnija nego u hladnim, a brod koji miruje u luci biva brže i jače obrašten nego brod koji plovi. S druge strane, uslijed nagle promjene saliniteta vode organizmi ugibaju i otpadaju s oplate, pa brod koji plovi najzamnije u slatkoj i slanoj vodi vrlo je malo obrastao.

Za povećanje otpora trenja, osim veličine hrapavosti, vrlo je važna i njena gustoća. Pokusi su pokazali da ploča koja je čitava obrasla školjkicama ima isti koeficijent otpora trenja kao ploča obrasla samo na 50% površine, i to manji nego kad je 75% površine pokriveno školjkicama (sl. 10). Inače, otpor ploče kojoj je samo 5% površine obraslo već je dva puta veći od otpora glatke neobrasle ploče.

Usljed nemogućnosti da se predviđi vrsta, gustoća i veličina obraslosti broda ne može se tačno odrediti ni povećanje otpora trenja. Za pojedina mora ispitivanjima su određene približne prosječne vrijednosti povećanja otpora trenja uslijed obraslosti, pa se kao neki približni opći prosjek može uzeti da uslijed obraslosti otpor trenja broda dnevno poraste u hladnim morima za 0,55%, a u toplim za 0,88%.

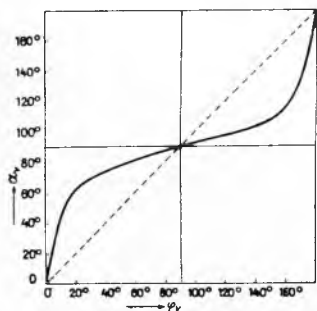
Vjetar direktno i indirektno utječe na promjenu ukupnog otpora broda. Direktno djelovanje vjetra se odražava u promjeni otpora nadvodnog dijela broda, a indirektno u stvaranju valova koji povećavaju otpor broda i u skretanju broda s kursa, što se mora kompenzirati skretanjem kormila, a to također povećava ukupni otpor.

Otpor vjetra, tj. djelovanje vjetra na nadvodni dio brodskog trupa, ovisi o relativnoj brzini vjetra  $V_v$ , kutu između relativnog smjera vjetra i uzdužne osi broda  $\varphi_v$ , rezultatnoj sili vjetra  $F_v$ , kutu između smjera rezultatne sile vjetra i uzdužne osi broda  $\alpha_v$ , udaljenosti  $a$  hvatišta sile vjetra od pramčanog perpendikulara i veličini nadvodnog dijela broda (sl. 11). Koeficijent otpora vjetra je definiran jednadžbom

$$C_v = \frac{F_v \cos(\alpha_v - \varphi_v)}{\frac{1}{2} \rho_z V_v^2 (A_T \cos^2 \varphi_v - A_L \sin^2 \varphi_v)} \quad (17)$$

gdje je  $\rho_z$  gustoća zraka,  $A_T$  površina projekcije nadvodnog dijela broda na poprečnu ravninu,  $A_L$  površina projekcije nadvodnog dijela broda na uzdužnu ravninu.

Na sl. 12 predočena je ovisnost između kuta smjera relativnog vjetra  $\varphi_v$  i kuta rezultatne sile vjetra  $\alpha_v$ . U početku raste kut sile  $\alpha_v$  znatno brže od kuta  $\varphi_v$  te se najveća razlika javlja kad je kut smjera vjetra između 20° i 30° ili između 150° i 169°. Otpor vjetra je maksimalan kad je kut smjera relativnog vjetra od 25° do 30°, a kad je vjetar jak, može iznositi čak i preko 25% ukupnog otpora.



Sl. 12. Odnos među smjerom rezultatne sile vjetra i smjerom sile vjetra

Morski valovi povećavaju otpor broda jer izazivaju oscilatorna gibanja broda oko njegove tri glavne osi, što ima za posljedicu neprekidne nagle promjene i poremećaje strujanja oko broda, udare i uranjanje pramca i prelijevanje vode preko palube. Sve to povećava otpor trenja, pritiska i stvaranja valova. Dodatni otpor uslijed djelovanja valova ovisi o smjeru valova s obzirom na kurs broda i o veličini i rasporedu valova, te će biti to veći što je, pri istoj dužini vala, veća njegova visina. Djelovanje morskih valova

na brod je vrlo složena pojava i do danas još ne postoji neka matematička ili eksperimentalna metoda za kvantitativno određivanje povećanja otpora uslijed tog djelovanja. Prema nekim ispitivanjima procijenjeno je da samo zbog bočnog ljuljanja broda za svaki 1° bočnog nagiba ukupni otpor broda poraste za 0,5 do 0,9%. Međutim, gubitak brzine na uzburkanom moru nije posljedica jedino povećanog otpora, već se brzina nužno mora smanjiti da se izbjegnu suviše žestoka gibanja broda i pretjerana naprezanja brodske konstrukcije.

Svako zakretanje kormila iz njegovog srednjeg položaja povećava otpor broda jer narušava simetriju strujanja vode oko trupa broda i izaziva otpor pritiska na samom kormilu. Kormilo brodova koji imaju slabu stabilnost kursa potrebno je često zakretati da bi brod ostao na određenom ravnom kursu. Ako na brod djeluju bočni vjetar i valovi, nužno se mora kormilo zakrenuti za nekoliko stupnjeva da bi brod plovio određenim ravnim kursom. Konačno, na jednostavnijim brodovima, zbog rotacijskog gibanja vodenog mlaza iza propelera, pritisak na obje strane kormila nije jednak, pa treba, da bi se pritisak izjednačio i brod zadržao na ravnom kursu, kormilo malo zakrenuti. Povećanje otpora broda zbog zakreta kormila je relativno vrlo maleno. Dodatni otpor kormilarenja ne može se proračunati, već se uzima kao neki empirijski dodatak na ukupni otpor broda.

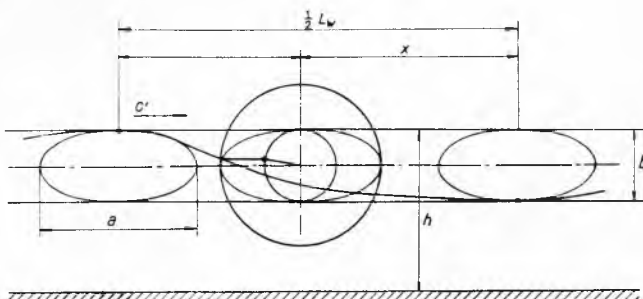
### Otpor broda na ograničenoj vodi

Na vodi ograničene dubine mijenja se režim strujanja oko brodskog trupa jer zbog blizine dna rijeke ili mora strujanje nije više trodimenzijsko, već poprima karakteristike dvodimenzijskog strujanja. Ta promjena karaktera strujanja odražava se na otporu broda, a naročito na otporu stvaranja valova.

Prema teoriji valova kontura vala na dubokoj vodi je trohoida dobivena iz kružne putanje vodenih čestica. Na plitkoj vodi, uslijed utjecaja dna, kružna putanja se deformira u elipsastu, te je i trohoidna kontura vala izvedena iz elipse (sl. 13). Brzina takvog vala je:

$$c' = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \sqrt{\frac{b}{a}} = c \sqrt{\frac{b}{a}} \quad (18)$$

gdje je  $a$  horizontalna os,  $b$  vertikalna os elipse,  $h$  dubina vode,  $c$  brzina vala na vodi neograničene dubine.



Sl. 13. Gibanje vodenih čestica po eliptičkoj putanji u valu na ograničenoj dubini vode

Iz formule (18) proizlazi da je brzina vala na plitkoj vodi uvijek manja nego u dubokoj, što se jasno počinje zapažati kad je dubina vode manja od polovice dužine vala. Smanjenjem dubine vode deformira se i raspored razilaznih i poprečnih valova prikazan na sl. 5. Kut između razilaznih valova se povećava a razmak između poprečnih valova se smanjuje, sve dok se na nekoj kritičnoj brzini razilazni valovi potpuno ne izravnavaju i superponiraju poprečnim valovima u jedan veliki usamljeni val. Ta kritična brzina će nastati kad faktor  $b/a$  poprimi graničnu vrijednost  $2\pi h/\lambda$ , pa formula (18) prelazi u formulu:

$$c_{kr} = \sqrt{gh} \quad (19)$$

Ta kritična brzina, ili brzina osamljenog vala, maksimalna je brzina koju može postići sistem valova na vodi ograničene dubine. Iz formule (19) se vidi da kritična brzina širenja valova na plitkoj vodi nije više ovisna o dužini vala, već jedino o dubini vode.

Ograničena dubina vode počinje utjecati na otpor broda kad je brzina broda jednaka otprilike polovici kritične brzine, tj.  $V \approx 0,5 \sqrt{g h}$ . Pramacni valni sistem poraste, pa povećani pritisak na pramacnom dijelu broda dovodi do povećanja gaza na krmi (do krmenog trima). Ta pojava postaje sve izrazitija što se više brzina broda približava kritičnoj brzini. Zbog povećanog pramacnog vala raste otpor stvaranja valova, krmeni trim izaziva virove, tj. povećava se otpor pritiska, a poraste i otpor trenja, jer se zbog dvodimenzijskog karaktera strujanja povećava brzina strujanja vode uz brod. Povećanje otpora broda postiže svoj maksimum kod kritične brzine. Ako je snaga pogonskih strojeva broda dovoljna da savlada taj maksimalni otpor pa brod premaši kritičnu brzinu, otpor broda će naglo pasti i može biti čak niži nego u dubokoj vodi. U natkritičnom području brzine ponovno se uspostavlja normalni trim broda pa se smanji otpor pritiska, stvaraju se samo razilazni valovi i uslijed toga otpor stvaranja valova postaje osjetljivo manji, a smanjuje se i otpor trenja jer prestaje ubrzano strujanje vode uz brod.

Razvijene su metode pomoću kojih se može dovoljno tačno odrediti otpor broda u potkritičnom području brzina, ali za nadkritično područje ne postoji nikakva metoda proračuna otpora broda. Schlichting je 1934 razradio teoriju za određivanje otpora stvaranja valova na ograničenim dubinama vode. On je uzeo kao mjerilo utjecaja ograničene dubine vode na otpor stvaranja valova odnos između brzine širenja vala na ograničenoj dubini i brzine vala na neograničenoj dubini pri jednakom otporu stvaranja valova:

$$c'/c = \sqrt{\tanh(2\pi h/\lambda)} = \sqrt{\tanh(g h/c^2)} \quad (20)$$

Osim ove korekture brzine Schlichting je uveo i drugu korekturu zbog dvodimenzijskog karaktera potencijalnog strujanja, a time i veće brzine strujanja uz brod, pa je ukupna korektura brzine:

$$\frac{V'}{V} = \frac{1 - \Delta c/V}{1 + \Delta V_{pot}/V} \quad (21)$$

gdje je  $V'$  brzina broda na plitkoj vodi,  $V$  brzina broda na dubokoj vodi,  $\Delta V_{pot}$  prirast brzine potencijalnog strujanja.

Korektura otpora trenja zbog promjene brzine strujanja data je jednadžbama:

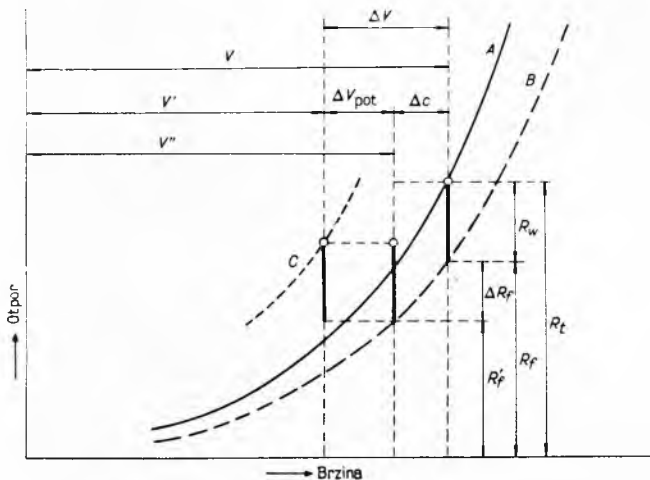
$$R_F'/R_F = V'^{1/2}/V^{1/2}$$

$$R_F - R_F' = R_F \left[ 1 - \left( \frac{V'}{V} \right)^2 \right]$$

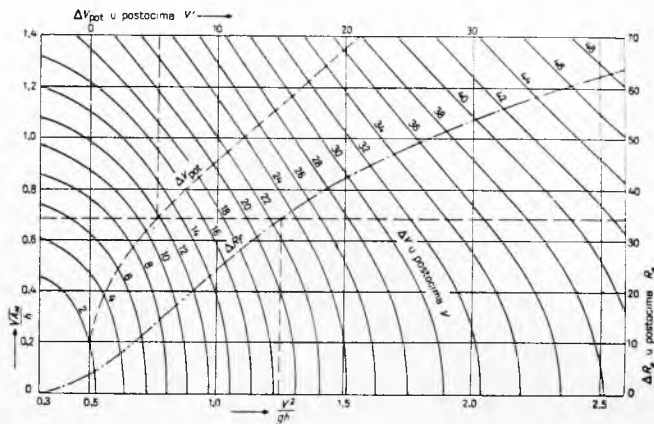
$$\frac{\Delta R_F}{R_F} = 1 - \left( \frac{V'}{V} \right)^2 = 1 - \left( 1 - \frac{\Delta c}{V} \right)^2 \quad (22)$$

gdje je  $R_F'$  otpor trenja na plitkoj vodi,  $R_F$  otpor trenja na dubokoj vodi, a brzina  $V' = V + \Delta V_{pot}$ .

Na sl. 14 prikazano je kako se korekturama dobivenim pomoću (20), (21) i (22) određuje krivulja otpora broda na ograničenoj dubini



Sl. 14. Shematski prikaz Schlichtingove metode za određivanje otpora broda u plitkoj vodi. A ukupni otpor na neograničenoj dubini, B otpor trenja na ograničenoj dubini, C ukupni otpor na ograničenoj dubini



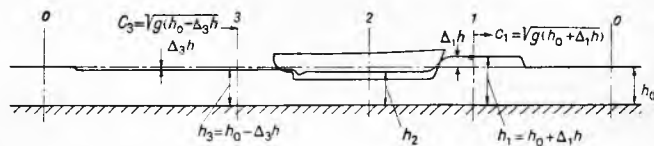
Sl. 15. Dijagram za određivanje utjecaja plitke vode na otpor (prema Schlichtingu)

vode ako je poznata krivulja otpora na neograničenoj dubini i brzina  $\Delta V_{pot}$ . Na osnovu ovih izvoda Schlichting je razradio dijagram (sl. 15) iz kojeg se mogu u ovisnosti o  $A_M/h$  i  $V^2/g h$  očitati razlike u brzinama  $\Delta V$  i  $\Delta V_{pot}$ , kao i razlika u otporu trenja  $\Delta R_F$ , i tako konstruirati krivulja otpora za ograničenu dubinu vode iz krivulje za neograničenu dubinu.

Ranije je otpor broda na ograničenoj dubini vode bio uglavnom od interesa samo za riječne brodove. Danas su, porastom brzina modernih morskih brodova, postala pojedina područja, kao npr. Tršćanski i Riječki zaljev, pa i čitava mora, kao npr. Baltičko more, područjima ograničenih dubina u kojima raste otpor broda. Zato utjecaj dubine vode na otpor broda sada postaje sve važniji.

U kanalima nije ograničena samo dubina već i širina vode, što ima za posljedicu bitne promjene u raspodjeli brzina i pritiska oko broda. Kao i na plitkoj vodi neograničene širine, razlikuju se tri područja brzina karakteristična za veličinu otpora broda.

U potkritičnom području brzina brod prolazeći kanalom djeluje kao čep koji smanjuje slobodan presjek kanala. U skladu s Bernoullijevom jednadžbom, uslijed smanjenog presjeka povećava se brzina



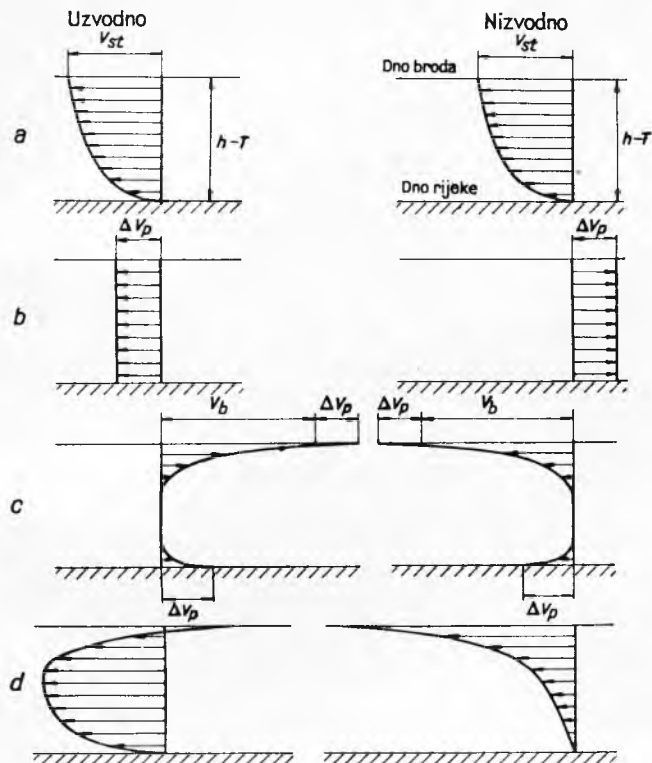
Sl. 16. Gibanje broda kanalom unutar područja kritične brzine

strujanja a smanjuje pritisak u području broda. Povećana brzina strujanja izaziva povećanje otpora trenja, a smanjeni pritisak dovodi do pada razine vode u okolišu broda. Taj pad razine počinje postepeno negdje ispred broda, pa skošena površina vode uzrokuje dodatni otpor jer se brod stvarno kreće kao uz kosinu. Taj se otpor naziva *otpor pada*. Otpor stvaranja valova također poraste, kako zbog utjecaja dna i bočnih zidova kanala na raspored pritiska oko broda tako i zbog interferencije valnog sistema broda s valovima reflektiranim od bočnih zidova kanala. Općenito, ukupni otpor broda u kanalu je u potkritičnom području brzina veći nego na neograničeno širokoj vodi iste dubine.

U području kritičnih brzina porast brzine strujanja uslijed smanjenog presjeka nije dovoljan da se sva količina vode prebaci od pramca prema krmi broda, već se jedan dio vode gomila na pramcu i giba zajedno s brodom. Tako nastaje ispred broda osamljen val čija visina stalno raste i izaziva daljnji pad razine vode na krmi broda. Na sl. 16 shematski je predloženo stanje kratko vrijeme nakon što se brod počeo kretati kanalom kritičnom brzinom. Zbog osamljenog vala razina vode je podignuta na iznos  $\Delta_1 h$  iznad stanja mirovanja. Brzina osamljenog vala koji se giba ispred broda je  $c_1 = \sqrt{g(h_0 + \Delta_1 h)}$ . Iza krme broda pada razina vode za  $\Delta_3 h$  ispod razine mirovanja i formira se negativan osamljen val čije stražnje čelo ima brzinu  $c_3 = \sqrt{g(h_0 - \Delta_3 h)}$ . Kako je brzina vala ispred broda veća od brzine vala iza broda,  $c_1 > c_3$ , brod stalno gura pred sobom sve veću količinu vode, i njegov

otpor vrlo naglo raste, a time ili brzina padne u područje potkrićnih brzina ili stanje pređe u natkrićno područje u kojem se otpor broda smanjuje.

U području natkrićnih brzina naglo opada brzina strujanja vode duž broda, nestaju poprečni valovi, a razina vode oko broda ne pada, već se podiže iznad razine ispred i iza broda. Ukupni



Sl. 17. Shematski prikaz rasporeda brzina u strujanju vode između dna broda i kanala.  $V_{st}$  brzina struje,  $\Delta V_p$  promjena brzine potencijalnog strujanja,  $V_b$  brzina broda. *a* raspored brzina u struji vode, *b* promjena brzine potencijalnog strujanja, *c* promjena brzine uslijed trenja, *d* rezultantni raspored brzina

otpor broda se smanjuje pa može biti čak i manji od otpora u vodi neograničene dubine i širine.

Plovidba rijekom je donekle slična plovidbi kanalom. Razlika je što se u rijeci stalno mijenja oblik poprečnog presjeka riječnog korita i što je brzina strujanja vode po površini poprečnog presjeka nejednoliko raspoređena. Zbog stalne promjene širine i dubine korita, a time i brzine vode, brod se gotovo nikada ne kreće jednolikom brzinom već se stalno ubrzava i usporava.

Sl. 17 prikazuje raspodjelu relativnih brzina strujanja vode, u odnosu na brod, u jednom presjeku riječnog korita od njegova dna do dubine gaza broda. Sl. 17a prikazuje tu raspodjelu u odsutnosti broda, sl. 17b prikazuje porast, odnosno opadanje relativne brzine strujanja (pri plovidbi uzvodno, odn. nizvodno) kroz presjek kojemu je površina smanjena uslijed prisutnosti broda, a apstrahirajući od trenja na dnu broda i korita

(potencijalno strujanje), sl. 17c prikazuje taj utjecaj trenja (obrazovanje graničnih slojeva), a sl. 17d konačni rezultantni profil relativnih brzina strujanja kroz spomenuti presjek riječnog korita. Sam otpor trenja je pri nizvodnoj plovidbi nešto veći a pri uzvodnoj nešto manji nego kad se brod kreće u mirnoj stajaćoj vodi.

Pri plovidbi na rijeci javlja se i otpor pada zbog komponente težine broda u smjeru plovidbe. Pri uzvodnoj plovidbi smjer ove komponente povećava otpor broda a pri nizvodnoj ga smanjuje (sl. 18). Praktično se može dodatni otpor pada zanemariti jer se pri uzvodnoj plovidbi on kompenzira smanjenim otporom trenja a pri nizvodnoj plovidbi povećanim otporom trenja.

**Metode određivanja otpora broda**

Pri projektiranju broda od primarne je važnosti da se odredi otpor za odabrani oblik brodskog trupa. To je potrebno, u prvom redu, kako bi se utvrdilo da li je odabrani oblik trupa stvarno optimalan s obzirom na otpor ili bi se nekim izmjenama parametara forme mogao otpor smanjiti, a u drugom redu, da bi se mogla odabrati potrebna snaga brodskog pogonskog uređaja i izraditi projekt propelera.

Kako je otpor broda toliko složena pojava da se ne može definirati matematički kao funkcija velikog broja faktora o kojima ovisi — a ti su faktori također manje ili više matematički nedefinirani — to za određivanje otpora služe različite približne numeričke metode ili ispitivanja brodskih modela.

U fazi izrade pretprojekta dovoljan je proračun otpora broda pomoću približnih metoda, ali pouzdani podaci o veličini otpora, potrebni za definitivni projekt, mogu se dobiti tek ispitivanjima otpora modela. Osim toga, jedino ispitivanja modela pokazuju kako se neke veće ili manje modifikacije oblika trupa broda odražavaju na otpor, što omogućava da se za neki određeni novi projekt odabere najpovoljniji oblik.

**Ispitivanja brodskih modela.** — Određivanje otpora broda pomoću eksperimenata s modelima zasniva se na Froudeovom principu podjele ukupnog otpora broda na otpor trenja  $R_F$  i preostali otpor (otpor forme)  $R_R$  i pretpostavke da su te dvije komponente ukupnog otpora jedna o drugoj neovisne i da se svaka od njih ravna po drugom zakonu. Prema toj pretpostavci otpor trenja je posljedica viskoznih sila a preostali otpor posljedica gravitacijskih sila. Da bi se rezultati dobiveni ispitivanjem modela mogli primijeniti na brod u prirodnoj veličini, strujanja tekućine oko modela i oko broda moraju biti fizički slična, i to — budući da se radi o određivanju sila otpora — dinamički slična. Uvjet za dinamičku sličnost jest da omjer odgovarajućih sila na modelu i na brodu bude jednak. Omjer sile otpora ( $R_F$  za otpor trenja i  $R_R$  za preostali otpor) i sile inercije  $\frac{1}{2} \rho S V^2$  (gdje je  $\rho$  gustoća tekućine,  $S$  oplakana površina, a  $V$  brzina broda) zove se koeficijent otpora:

$$C_F = \frac{R_F}{\frac{1}{2} \rho S V^2} \text{ koeficijent otpora trenja,} \tag{23}$$

$$C_R = \frac{R_R}{\frac{1}{2} \rho S V^2} \text{ koeficijent preostalog otpora.} \tag{24}$$

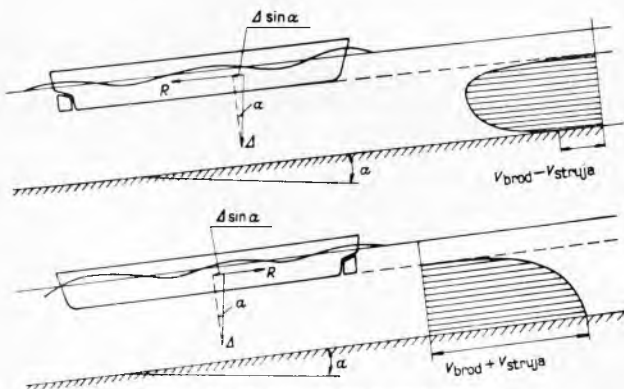
Budući da ti koeficijenti predstavljaju, u stvari, uvjete dinamičke sličnosti, oni su jednaki za model i brod ako su strujanja oko njih slična; prema tome, koeficijenti određeni eksperimentalno ili računom za model vrijede i za brod u prirodnoj veličini ako su ispunjeni svi uslovi sličnosti.

Otpor trenja broda  $R_F$  prema Froudeovoj pretpostavci posljedica je samo sile viskoziteta. Za taj otpor, dakle, mjerodavni je kriterij sličnosti da je omjer sile inercije i sile viskoziteta konstantan. Taj se omjer zove *Reynoldsov broj*  $Re = VL/\nu$ , gdje je  $\nu$  koeficijent kinematičkog viskoziteta. Dakle, da bi koeficijent otpora trenja za brod u naravnoj veličini i za njegov smanjeni model bio jednak, mora se model ispitivati pri brzini koja zadovoljava uvjet:

$$VL/\nu = V_m L_m/\nu_m, \tag{25}$$

gdje indeks m označava vrijednosti koje se odnose na model. Pošto je kinematički koeficijent viskoziteta vode u kojoj brod plovi i vode u kojoj se ispituje model praktično isti, to se izraz (24) može pisati

$$VL = V_m L_m. \tag{25 a}$$



Sl. 18. Gibanje broda rijekom



To znači: da bi se zadovoljio uvjet sličnosti otpora trenja, brzina modela mora biti  $L/L_m$  puta veća od brzine stvarnog broda, odnosno:

$$V_m = \lambda V, \quad (26)$$

gdje je  $\lambda$  omjer linearnih dimenzija broda i njegovog modela (mjerilo modela).

Preostali otpor broda prema Froudeovoj pretpostavci posljedica je sile gravitacije. Za taj otpor, dakle, mjerodavni je kriterij sličnosti konstantnost omjera sile inercije i sile gravitacije. Taj se omjer zove *Froudeov broj*  $Fr = V/\sqrt{gL}$ , gdje je  $g$  ubrzanje sile teže. Koeficijent preostalog otpora  $C_R$  bit će dakle jednak za model i brod ako je ispunjen uvjet:

$$Fr = V/\sqrt{gL} = V_m/\sqrt{gL_m}. \quad (27)$$

Iz toga slijedi:

$$V_m = V\sqrt{L_m/L} = V/\sqrt{\lambda}. \quad (28)$$

Oplakane se površine broda i njegovog geometrijski sličnog modela odnose kao kvadrati njihovih linearnih dimenzija, tj. kao kvadrat njihovog mjerila:  $S/S_m = (L/L_m)^2 = \lambda^2$ , a istisnine kao kub mjerila:  $\Delta/\Delta_m = (L/L_m)^3 = \lambda^3$ , pa se polazeći od izraza (26) i (28) može izvesti da se preostali otpori broda i modela odnose kao njihove istisnine:

$$R_R/R_{Rm} = \Delta/\Delta_m; \quad R_R/\Delta = R_{Rm}/\Delta_m. \quad (29)$$

Prema tome, Froudeov zakon sličnosti glasi: preostali otpori geometrijski sličnih tijela, kao što su brod i njegov model, odnose se kao istisnine, uz uvjet da se brzine odnose kao drugi korijeni mjerila modela.

Usporedba izraza (25) i (28) pokazuje da je nemoguće istovremeno zadovoljiti uvjete sličnosti otpora trenja i preostalog otpora, jer bi model broda trebalo ispitivati istovremeno s dvjema sasvim različitim brzinama. Froudeova metoda određivanja otpora broda pomoću ispitivanja modela rješava ovu proturječnost tako da se ispitivanjima modela odredi samo preostali otpor, a otpor trenja se izračuna matematički. Prema tome, ispitivanjem modela dolazi se do otpora broda na ovaj način:

Za brod se izradi geometrijski sličan model u mjerilu  $L/L_m = \lambda$ .

Model se tegli brzinom  $V_m = V/\sqrt{\lambda}$  i izmjeri se njegov ukupni otpor  $R_{Tm}$ . Pomoću neke od matematičkih metoda [v. jednadžbe (1), (2), (3) i (4)] izračuna se otpor trenja modela  $R_{Fm}$  i oduzme od izmjerjenog ukupnog otpora, pa se dobije preostali otpor modela:  $R_{Rm} = R_{Tm} - R_{Fm}$ . Množenjem s kubom mjerila preostali otpor modela se pretvori u preostali otpor stvarnog broda:  $R_R = R_{Rm} \lambda^3$ . Otpor trenja broda se odredi matematički na isti način kao otpor trenja modela i pribroji se preostalom otporu, čime se dobiva ukupni otpor broda:

$$R_T = R_R + R_F = R_{Rm} \lambda^3 + R_{Fm} = (R_{Tm} - R_{Fm}) \lambda^3 + R_{Fm}. \quad (30)$$

Ovakvom načinu određivanja otpora broda, koliko god je on za praktičke svrhe dobar i pouzdan, sa čisto naučnog gledišta ima ozbiljnih zamjerki, od kojih je najvažnija što se u preostali otpor uključuje i otpor pritiska, koji nije funkcija gravitacijskih sila, već viskoznih svojstava tekućine. Greška koja se time čini praktično je malena jer je i otpor pritiska relativno malen, ali ta greška ipak postoji. Osim toga, poznate metode proračuna otpora trenja nisu sa naučnog gledišta egzaktno.

Sve netačnosti koje proizlaze iz same metode određivanja otpora broda na osnovu rezultata ispitivanja modela nazivaju se zajedničkim nazivom *utjecaj mjerila*. Pri izboru mjerila modela i provođenju ispitivanja treba nastojati da se svi faktori koji povećavaju utjecaj mjerila svedu na što manju mjeru.

Da bi se korigirao utjecaj mjerila, redovito se dobivenom otporu broda dodaju još neki iskustveni dodaci. Tim se dodacima korigiraju i greške nastale uslijed razlike u hrapavosti između oplata hidrodinamički glatkog broda (za kakav vrijede postojeći koeficijenti otpora trenja) i oplata stvarnog broda. Veličina tih dodataka ovisi u prvom redu o metodi proračuna otpora trenja, o veličini modela i o tipu i veličini broda. Tehnička izvedba oplata također ima velik utjecaj. Zakrivane i zavarene oplata stavljaju kretanju različit otpor, a dolazi do izražaja i odstupanje od ispravne forme među rebrima, tzv. valovita hrapavost. Kvalitet podvodnog pre-maza također utječe na hrapavost oplata. Razlike u vrstama pre-

maza mogu uzrokovati razlike od 5% u ukupnom otporu novog broda, što ukazuje na to da se već neznatne hrapavosti znatno odražuju na otporu broda.

Kako hrapavost ovisi o izvedbi broda, to je vrlo teško unaprijed odrediti stepen hrapavosti i potrebne dodatke. Froudeovi koeficijenti trenja već djelomično sadrže i hrapavost brodske oplata; obično se još dodaje na ukupnu, pomoću njih izračunatu snagu otpora: za velike tankere 0...5%, za normalne teretne brodove ~ 7%, za obalne i ostale manje brodove do 12%. Kad se primjenjuju Schoenherrovi koeficijenti, obično se uzima konstantan dodatak za hrapavost tako da se koeficijent otpora trenja  $C_t$  poveća za  $\Delta C_t = 0,0004$ .

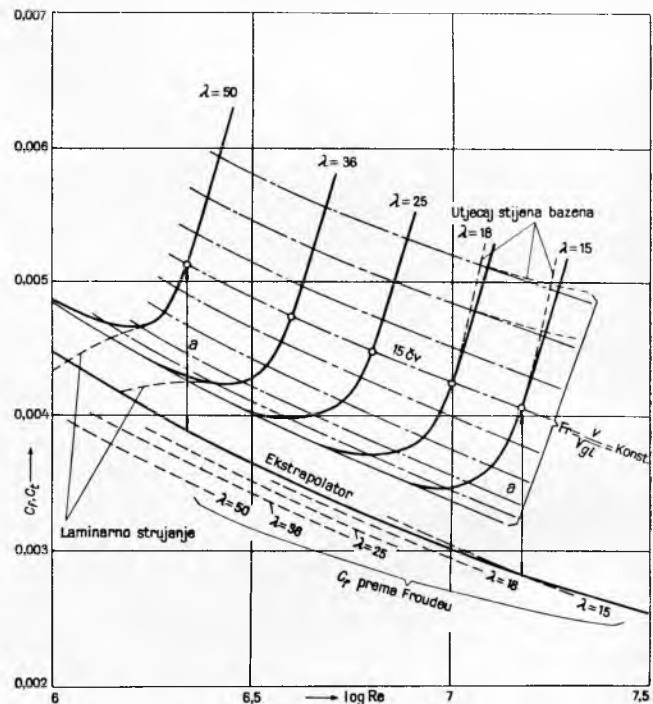
Za dodatne otpore koji postoje kod stvarnog broda ali ne i kod modela dodaju se posebni dodaci na ukupni otpor broda dobiven iz rezultata ispitivanja modela. Ti dodaci su izraženi u postocima ukupnog otpora i za pojedine dodatne otpore iznose:

Otpor privjesaka (ukoliko je model ispitivan bez privjesaka): ljuljine kobilice 1...3%, skrokovci 8%, nogavice propelerskih osovina 4...8%.

Otpor kormilarenja : 1%.

Otpor zraka: za normalne brodove 2%, za brodove s velikim i visokim nadvodnim dijelom 4%.

Telfer je 1927 pronašao novu metodu ekstrapolacije rezultata ispitivanja modela po kojoj nije potrebno dijeliti ukupni otpor na otpor trenja i preostali otpor. Ta se metoda osniva na tome da koeficijent ukupnog otpora broda i modela mora biti istovremeno funkcija Froudeovog i Reynoldsovog broja. Ako se za jedan brod



Sl. 19. Telferova metoda određivanja otpora broda

ispita nekoliko modela (najmanje tri) izrađenih u različitim mjerilima, pa se njihovi koeficijenti ukupnog otpora  $C_T = R_T/\frac{1}{2}\rho S V^2$  grafički prikažu kao funkcija od  $Re$ , tada svaka pojedina tačka na svakoj krivulji  $C_T$  odgovara nekoj određenoj vrijednosti Froudeovog broja. Na raznim krivuljama  $C_T$  mogu se spojiti tačke konstantnih  $Fr$  u krivulje konstantnih  $Fr$ , pa se ekstrapolacijom  $Fr$ -krivulja do vrijednosti  $Re$  za brod dobiva krivulja koeficijenta ukupnog otpora broda u prirodnoj veličini (sl. 19).

U Telferovom dijagramu za iste vrijednosti  $Re$  a za različite  $Fr$  mora biti:

$$(C_T)_1 = f_1(Re) + f_2(Fr_1)$$

$$(C_T)_2 = f_1(Re) + f_2(Fr_2)$$

pa je:

$$(C_T)_1 - (C_T)_2 = f_2(Fr_1) - f_2(Fr_2) = \text{konst.}$$

To znači da krivulje konstantnih  $Fr$  moraju biti ekvidistantne, jer njihov razmak ne ovisi o  $Re$ . Ako nisu, razlog je netačnost izmjerenih rezultata. I krivulja  $Fr \rightarrow 0$ , tj. za slučaj kad otpor valova praktično iščezne a ostane samo otpor uslijed viskoznihih sila, mora biti paralelna s ostalim krivuljama konstantnih  $Fr$ , a kao i te krivulje mora biti paralelna i sa krivuljom koeficijenta otpora trenja (ekstrapolatorom) nanesenom u istom dijagramu. Ravne ploče nemaju otpor forme već samo otpor trenja, tj. njihov otpor je funkcija samo  $Re$ . To znači da je koeficijent otpora trenja prikazan u Telferovom dijagramu jedinstvenom krivuljom. Iz sl. 19 se vidi da Froudeovi koeficijenti trenja ne zadovoljavaju tom uvjetu (jer ne odgovaraju Reynoldsovom zakonu), već se za svako mjerilo modela dobiva zasebna krivulja koeficijenta otpora trenja. Rezultati sistematskih ispitivanja serija geometrijski sličnih modela prikazani u Telferovom dijagramu pokazuju da do danas ne postoji ispravna formulacija fizičke pojave trenja, zbog čega prenošenje rezultata s modela na brod ne može biti potpuno egzaktno.

Pomoću Telferova dijagrama otkrivene su i neke greške u samoj metodi ispitivanja modela. Zbog ograničene širine i dubine bazena za ispitivanje, kad su modeli i brzine tegljenja veliki, može doći do utjecaja zidova bazena na strujanje oko modela, uslijed čega je izmjereni otpor previsok. Ni ispitivanja premalih modela nisu pouzdana zbog laminarnog strujanja koje se javlja kod niskih Reynoldsovih brojeva. Otpor trenja je u laminarnom strujanju manji nego u turbulentnom pa je i ukupni izmjereni otpor modela prenikak. Zbog toga je ekstrapolirana vrijednost preostalog otpora modela pogrešna, jer se od ukupnog otpora modela odbija otpor trenja proračunat s koeficijentima otpora koji vrijede za turbulentno strujanje. Da se izbjegne pojava laminarnog strujanja, danas se redovito na modelima pomoću raznih naprava umjetno inducira turbulentno strujanje.

Koliko je god Telferova metoda naučno ispravnija i pouzdanija od Froudeove, ona se praktički ne upotrebljava za rutinska ispitivanja modela projektiranih brodova, već samo za fundamentalna naučna istraživanja. Razlog tome su visoki troškovi i dugo trajanje ispitivanja, uvjetovani potrebom da se ispita veći broj modela u različitim mjerilima.

**Približne metode određivanja otpora broda** služe za to da se u samom početku projektiranja broda približno odredi otpor broda i potrebna snaga pogonskih strojeva, i da se u najgrubljim crtama utvrdi promjena otpora uslijed promjene osnovnih parametara oblika trupa.

Najstariji, najjednostavniji, a i najpribližniji način određivanja otpora broda je pomoću tzv. konstante admiraliteta. Snaga otpora  $P_E$  projektiranog broda, definirana kao

$$P_E = R_T V, \quad (31)$$

može se približno odrediti ako je za neki sličan, već izgrađen brod ili već ispitivani model poznata konstanta admiraliteta definirana kao

$$C = \Delta^{1/3} V_S^3 / P_E. \quad (32)$$

Pretpostavivši da je ta konstanta za projektirani i za postojeći brod jednaka, otpor projektiranog broda jest:

$$R_T = \Delta^{1/3} V_S^3 / C, \quad (33)$$

gdje su:  $\Delta$  istisnina u tonama,  $V_S$  brzina projektiranog broda u čvorovima. Ovakav način određivanja otpora broda je vrlo približan i u stvari daje tek red veličine.

Tačnije rezultate daju metode razrađene na osnovu ispitivanja serije modela čiji je oblik trupa sistematski mijenjan ili na osnovu statističke analize većeg broja podataka o mjerenjima na brodovima i modelima. Prema svim tim metodama grafički se prikazuje krivuljama ovisnost otpora ili neke konstante otpora od brzine i pojedinih glavnih parametara brodske forme, pa se tako može odrediti i utjecaj promjene oblika trupa na promjenu otpora. Velike razlike u tipovima brodova i specifičnim oblicima trupa pojedinih tipova dovele su do razvoja i približnih metoda proračuna otpora namijenjenih samo za određene tipove brodova.

Jedna od najstarijih približnih metoda proračuna otpora broda, koja se i danas vrlo mnogo upotrebljava, jest Taylorova (1910). Taylor je ispitivao seriju od 80 modela, mijenjajući sistematski:  $V/L^3$ ,  $B/T$  i prizmatički koeficijent  $\varphi$ , pa je izradio dijagrame u kojima je specifični preostali otpor  $R_R/\Delta$  prikazan kao funkcija navedenih variranih parametara i  $V/\sqrt{L}$ . Iz Taylorovih dijagrama

odredi se preostali otpor broda, a otpor trenja se proračuna pomoću neke od postojećih računskih metoda. Taylorovi dijagrami daju vrlo dobre rezultate za brodove vitkih formi kao što su ratni brodovi i brzi putnički brodovi.

Na osnovu statističke analize velikog broja podataka sa pokusnih vožnji broda i ispitivanja modela Ayre je (1927) razradio dijagram u kojem je jedna konstanta snage otpora vrlo slična admiralitetskoj konstanti prikazana kao funkcija Froudeovog broja. Dijagram vrijedi za jednu standardnu vrijednost omjera  $B/T$ , koeficijenta istisnine  $\delta$  i položaja težišta istisnine, pa ukoliko novi projekt odstupa od tih standardnih vrijednosti, rezultat se korigira posebnim postupkom. Ova metoda je vrlo jednostavna i brza, pa se još uvijek upotrebljava za preliminarno određivanje otpora trgovačkih brodova.

Lap je (1954) statističkom analizom rezultata ispitivanja oko 1000 brodskih modela došao do dijagrama preostalog otpora jednovijanih trgovačkih brodova. U tim dijagramima je preostali otpor prikazan kao funkcija prizmatičkog koeficijenta  $\varphi$ , položaja težišta istisnine i omjera  $V/\sqrt{\varphi L}$ . Lapova metoda daje dobre rezultate za prosječne forme modernih trgovačkih brodova ukoliko omjer  $B/T$  ne odstupa mnogo od 2,4.

Slični Taylorovim dijagramima su Toddovi dijagrami sistematskih ispitivanja tzv. »Serije 60« (1957). Ispitivanjima 45 modela, kojima su varirani  $L/B$ ,  $B/T$ , položaj težišta istisnine i koeficijent istisnine  $\delta$ , dobiveni su dijagrami specifičnog preostalog otpora. Ti dijagrami daju vrlo dobre rezultate za moderne tipove velikih teretnih brodova i tankera koji imaju koeficijent istisnine  $\delta$  od 0,6 do 0,8.

Osim ovih metoda, koje se danas najviše upotrebljavaju za približni proračun otpora većih trgovačkih i ratnih brodova, postoje slične približne metode za određivanje otpora manjih, specijalnih tipova brodova. Tako su, npr., razrađeni dijagrami otpora za ribarske brodove (Tagaki 1950 i Doust 1959), obalne brodove (Koning 1940), tegljače (Roach 1956), čamce (Henschke 1955) itd.

Sve te približne metode daju dovoljno tačan rezultat ako se glavni parametri oblika trupa novog projekta mnogo ne razlikuju od odgovarajućih parametara brodova ili modela čiji su podaci o otporu služili kao osnova za razradu metode. Načelno se može pretpostaviti da se približnim metodama dobiva otpor broda unutar  $\pm 5$  do  $\pm 10\%$  od prave vrijednosti, što zadovoljava jedino u početnom stadiju projektiranja broda.

### Predočivanje otpora broda

Otpor broda unutar određenog područja brzina uvijek se predočuje grafički tzv. *krivuljom otpora*, tj. otpor broda ili neki koeficijent otpora broda prikazuje se kao funkcija brzine ili nekog koeficijenta brzine. Način predočivanja otpora broda mora biti takav da se mogu uspoređivati krivulje otpora za više brodova različite veličine, forme i brzine, i tako može odabrati najpovoljnija forma za konkretan slučaj. Takva direktna usporedba moguća je jedino ako se međusobna ovisnost otpora, forme, veličine i brzine broda izrazi nekim koeficijentima ili konstantama koje različite brodske forme svode na isto mjerilo.

Još koncem prošlog stoljeća je R. E. Froude uveo tzv. »okrugle konstante«, koje se u Engleskoj i danas upotrebljavaju. On je definirao brodsku formu konstantama:

$$\textcircled{M} = L/V^{1/3}, \quad (34)$$

$$\textcircled{S} = S/V^{2/3}, \quad (35)$$

gdje je:  $L$  dužina broda,  $V$  volumen istisnine,  $S$  oplakana površina broda. Ako se umjesto volumena istisnine  $V$  upotrijebi istisnina  $\Delta$ , konstante postaju dimenzijske, pa u engleskom sistemu mjera glase:

$$\textcircled{M} = 0,3037 L/\Delta^{1/3}, \quad (34 a)$$

$$\textcircled{S} = 0,0935 S/\Delta^{2/3}, \quad (35 a)$$

gdje je  $\Delta$  istisnina broda u engleskim tonama od 1016 kg.

Slično su izvedene konstante za brzinu, čiji je bezdimenzijski oblik:

$$\textcircled{K} = V \sqrt{\frac{g}{4\pi}} \cdot V^{1/6}, \quad (36)$$

$$\textcircled{L} = V \sqrt{g L / 4\pi}, \quad (37)$$

a dimenzijski oblik u engleskom sistemu mjera:

$$\textcircled{K} = 0,5834 \cdot V_S / \Delta^{1/6}, \quad (36a)$$

$$\textcircled{L} = 1,055 V_S / \sqrt{L}, \quad (37a)$$

gdje je  $V_S$  brzina broda u čvorovima. Kasnije je Baker uveo i treću konstantu brzine, čiji je bezdimenzijski oblik:

$$\textcircled{P} = V \sqrt{\frac{g \varphi L}{2\pi}}, \quad (38)$$

a dimenzijski u engleskim jedinicama:

$$\textcircled{P} = 0,746 V_S / \sqrt{\varphi L}. \quad (38a)$$

Froudeova konstanta otpora nije bezdimenzijska i definirana je za engleski sistem mjera sa:

$$\textcircled{C} = 427,1 P_E / \Delta^{2/3} V_S^3 \quad (39)$$

gdje je  $P_E$  snaga otpora broda u engleskim HP.

Raznim kombinacijama grafičkog prikazivanja međusobne ovisnosti ovih konstanti može se uspoređivati kvalitet oblika broda s obzirom na otpor.

Izvan Engleske se »okrugle konstante« manje upotrebljavaju i najčešće se prikazuje specifični otpor broda po toni istisnine  $R/\Delta$  kao funkcija relativne brzine  $V_S/\sqrt{L}$ . Ovaj način prikazivanja ima nedostatak što na krivuljama specifičnog otpora nisu dovoljno izražene grbe i udoline, tj. područja maksimalnog i minimalnog otpora. Zato se pored ovog jednostavnog načina upotrebljava i predočavanje ovim koeficijentima:

1.  $P_E L / \rho \nabla V^3$  kao funkcija  $V/\sqrt{g L}$ ,
2.  $P_E / \rho A_M V^3$  kao funkcija  $V/\sqrt{\varphi g L}$ ,
3.  $P_E / \rho \nabla^{1/3} V^3$  kao funkcija  $V/\sqrt{g \nabla^{1/3}}$ ,

odnosno koeficijentima koji imaju dimenzije:

1.  $P_E L / \Delta V_S^3$  kao funkcija  $V_S/\sqrt{L}$
2.  $P_E / A_M V_S^3$  kao funkcija  $\textcircled{P} = 0,746 \cdot V_S / \sqrt{\varphi L}$
3.  $P_E / \Delta^{1/3} V_S^3$  kao funkcija  $V_S/\Delta^{1/3}$ ,

gdje je:  $\rho$  gustoća vode,  $A_M$  površina glavnog rebra broda.

### Utjecaj oblika brodskog trupa na otpor broda

Kad se projektira brod, nastoji se da oblik trupa bude što povoljniji s obzirom na otpor, ali pri tome se mora imati u vidu da otpor broda nije jedini faktor koji utječe na izbor oblika trupa, već da treba da budu zadovoljeni i zahtjevi čvrstoće broda, potrebe prostora za krcanje, dobra propulzijska i kormilarska svojstva, niski troškovi gradnje broda itd. Zato, općenito, optimalan oblik trupa nije optimalan s obzirom na otpor broda, već je on rezultat kompromisa koji najbolje zadovoljava sve zahtjeve, od kojih je optimalni otpor broda samo najvažniji, ili bar jedan od najvažnijih.

Forma broda je definirana nizom parametara, od kojih su najvažniji: glavne dimenzije broda i njihovi omjeri, koeficijenti forme trupa (prizmatički  $\varphi$ , vodne linije  $\alpha$ , glavnog rebra  $\beta$  i istisnine  $\delta$ ), udaljenost  $x_0$  težišta istisnine od glavnog rebra izražena kao koeficijent  $a = x_0/L$ , omjer dužine i istisnine  $L/\Delta^{1/3}$  i oblik krivulje areale rebara. Sistematska ispitivanja modela brodova pokazala su da već male promjene pojedinih parametara oblika trupa mogu osjetljivo utjecati na otpor. Na osnovu tih ispitivanja došlo se je i do nekih općih zaključaka o tome kakav utjecaj imaju pojedini parametri forme na otpor broda.

Uzimajući u obzir samo najvažnije parametre oblika trupa, može se pretpostaviti da je specifični otpor broda prikazan funkcionalnom ovisnošću:

$$R/\Delta = f(V/\sqrt{g L}, L/\Delta^{1/3}, B/T, \beta, \varphi, \alpha, a, V/L^{1/3}). \quad (40)$$

Pojedine komponente ukupnog otpora različito ovise o parametrima iz jednadžbe (40). Za otpor stvaranja valova od primarne su važnosti dužina broda  $L$  i prizmatički koeficijent  $\varphi$ . Uz konstantnu istisninu specifični preostali otpor broda  $R_R/\Delta$  bit će to manji što je veća vrijednost omjera  $L/\Delta^{1/3}$ , ali uz konstantnu dužinu broda promjena  $L/\Delta^{1/3}$  vrlo malo se odražava na  $R_R/\Delta$ .

Uz nepromijenjene sve ostale parametre forme, povećanje prizmatičkog koeficijenta  $\varphi$  znači smanjenje površine glavnog rebra i raspodjelu istisnine više prema krajevima broda, dakle promjenu raspodjele pritisaka duž broda a time i promjenu u interferenciji komponenata ukupnog sistema valova. Zato svakoj brzini odgovara neka druga vrijednost prizmatičkog koeficijenta  $\varphi$  uz koju je specifični preostali otpor najniži. Većim brzinama odgovaraju veće vrijednosti optimalnog prizmatičkog koeficijenta, što znači da je za veće brzine povoljniji brod s punijim krajevima trupa, a za male brzine brod s punim srednjim dijelom i oštrim krajevima trupa.

S porastom omjera  $B/T$  raste specifični preostali otpor. Utjecaj omjera  $B/T$  na specifični preostali otpor mijenja se s brzinom i to nepravilno, zbog čega je vrlo teško odrediti stvarni utjecaj tog omjera u nekom konkretnom slučaju.

Promjena koeficijenta glavnog rebra  $\beta$  ne utječe bitno na preostali otpor. Koeficijent  $\beta$  je važan utoliko što se pri konstantnoj istisnini promjenom koeficijenta  $\beta$  mijenja prizmatički koeficijent  $\varphi$ , koji je značajan za preostali otpor. Na sl. 20 predočeni su povoljni omjeri između koeficijenta glavnog rebra  $\beta$ , prizmatičkog koeficijenta  $\varphi$  i koeficijenta istisnine  $\delta$ .

Teorijski stvara najmanje valove simetričan oblik brodskog trupa, ako se ne uzme u obzir interferencija valnih sistema i utjecaj viskoziteta na stvaranje valova. Zbog viskoznih svojstava vode krmeni su valovi i simetričnog broda manji od pramčanih, pa se pomicanjem težišta istisnine prema krmi smanjuje prizmatički koeficijent pramčanog dijela broda i pramčani valni sistem, što s obzirom na otpor koristi dok god se stvaranje valova na pramcu više smanjuje nego što raste stvaranje valova na krmi.

Općeniti je zaključak da je uz niže relativne brzine  $V/\sqrt{L}$  povoljniji položaj težišta istisnine ispred glavnog rebra ( $a = +0,01 \dots +0,02 L$ ), jer u tom slučaju otpor valova nije od presudne važnosti za ukupni otpor, a oštiri krmeni dio (pomicanje težišta istisnine prema pramcu) omogućava bolje priticjanje vode propelelu. S porastom relativne brzine pomiče se optimalni položaj težišta istisnine prema krmi, pa je  $a = -0,01 \dots -0,02 L$ .

Otpor stvaranja valova ovisi i o obliku pramčanih rebara, koji je određen oblikom krivulje areale rebara i pramčanim kutom plovne vodne linije. Za male brzine povoljniji je mali pramčani kut, tj. rebra oblika U, a za velike brzine je povoljniji veliki pramčani kut, tj. rebra oblika V. Za relativne brzine  $V/\sqrt{L} = 0,8 \dots 1,2$  povoljan je bulb-pramac, jer interferencija vala izazvanog bulbom, pramčanog valnog sistema i krmenog valnog sistema doprinosi smanjenju otpora valova.

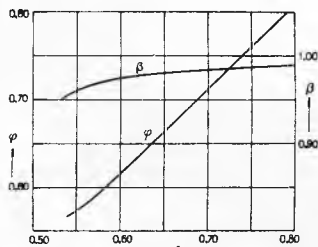
Specifični otpor trenja  $R_F/\Delta$  ovisi o Reynoldsovom broju, dakle o dužini i brzini broda, i o oplakanoj površini. Oplakana površina broda  $S$  može se dovoljno tačno izračunati iz empirijskih formula, npr. iz formule Fanceva:

$$S = L \cdot T (0,0271 B/T + 0,492 \delta + 0,958 \delta \cdot B/T + 1,390) \quad (41)$$

ili iz formule Taylora:

$$S = c \sqrt{L \Delta}, \quad (42)$$

gdje je  $c$  konstanta koja za trgovačke brodove i engleske mjere iznosi 15,4. Iz formule (42) proizlazi da je uz konstantnu isti-



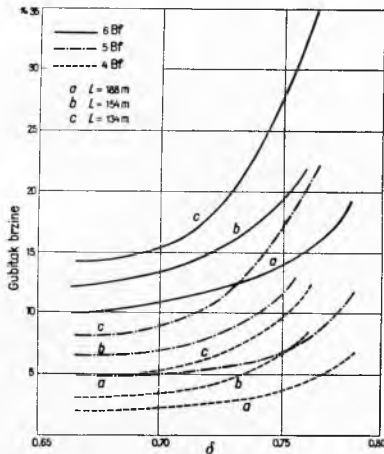
Sl. 20. Odnosi koeficijenata forme po istraživanjima instituta u Wageningenu

Tablica 1  
KARAKTERISTIKE BRODSKIH FORMA NISKOG OTPORA

Tip broda	Spori teretni brodovi	Teretni brodovi srednje brzine	Brzi teretni brodovi	Brzi putničko-teretni brodovi	Brzi linijski i brzi obalni putnički brodovi	Brzi putnički brodovi za La Manche	Torpiljarke i razarači
$P = V \sqrt{\frac{g \rho L}{2\pi}}$	0,4...0,6	0,5...0,6	0,55...0,65	0,60...0,80	0,70...0,90	1,05...1,4	1,5
Prizmatički koeficijent $\varphi$	0,82...0,78	0,78...0,75	0,75...0,70	0,70...0,65	< 0,65	< 0,65	< 0,65
Koeficijent glavnog rebra $\beta$	0,98...0,99	0,98	0,98	0,98	0,95	0,90...0,95	0,80...0,85
Dužina paralelnog srednjaka, % L	34	≤ 25	≤ 25...20	≤ 10...0	0	0	0
Polovica pramčanog kuta plovne vodne linije	35...32°	30...27°	24...12°	18...12°	< 6°	6...9°	10...12°
Udaljenost težišta istisnine od gl. rebra (+ ispred, - iza) u % L	+2...+1	+2...+1	+1,5...+0,5	+1...-2	-1,5...-2	-2...-3	-1...-1,5
Oblik areale rebara	$P < 0,6$ : krajevi areale rebara ravni; $P = 0,6...0,7$ : areala na pramčanom kraju izgubljena; $P = 0,7...1,1$ : oštri krajevi areale, a za $P \geq 0,75$ povoljan bulb-pramac; $P = 1,2...1,4$ : puniji krajevi areale s bulb-pramcem; $P \geq 1,5$ : maksimum površine iza glavnog rebra, za najveće brzine ravni ili malo konveksni krajevi na pramcu.						
Oblik teretne vodne linije	1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)

- 1) Pramac po čitavoj dužini malo konveksan. Krma vrlo ravna, kosina ne veća od 20°.
- 2) Za niže vrijednosti  $P$  pramac konveksan, a za više konveksan ili ravan.
- 3) Dugi pramčani dio sa ravnim linijama ili kratki s konkavnim linijama.
- 4) Za niže vrijednosti  $P$  pramac konkavan, a za više ravan.
- 5) Oštra, izdubljena teretna vodna linija na pramcu.
- 6) Za niže vrijednosti  $P$  oštar pramac, a za više puniji krajevi, svršetak TVL ravan ili izdubljen, sa bulb-pramcem.
- 7) Maksimalna širina TVL što više iza glavnog rebra. Vodna linija na pramcu ravna ili malo konveksna, a na krmi puna.

sninu oplakana površina proporcionalna dužini broda  $S$ . Povećanjem dužine raste veličina oplakane površine, a time i specifični otpor trenja, što je obratno nego kod specifičnog preostalog otpora. Prema tome, u svakom konkretnom slučaju postoji neka optimalna dužina broda uz koju je specifični ukupni otpor minimalan. Dužina broda se ipak ne određuje ovim kriterijem, jer bi najpovoljnija dužina s obzirom na otpor dovela do odviše dugačkih i oštirih brodova s vrlo niskim omjerom  $L/\Delta^{1/3}$ .



Sl. 21. Gubitak brzine trgovačkog broda uslijed vjetra i valova u pramac (prema Aertssenu)

Da se smanji otpor pritiska i izbjegne stvaranje virova, treba na brodovima pune forme trupa izvesti što postepenije prijelaze iz pramčanog dijela u paralelni srednjak, a naročito iz paralelnog srednjaka u krmeni dio. Važno je da krmeni dio bude dovoljno dug i vitak. Prema Bekeru minimalna dužina krmenog zaoštrenja trupa mora biti:

$$L_R = 4,08 \sqrt{A_M}, \quad (43)$$

gdje je  $A_M$  površina glavnog rebra. Duboka krstaška krma olakšava da se linije krmenog zaoštrenja izvedu pravilno.

Da gubitak brzine na uzburkanom moru bude što manji, koeficijent istisnine  $\delta$  ne smije biti iznad 0,74 (sl. 21), a za pramčana rebra je povoljniji oblik V.

Za različite tipove brodova prikazane su u tablici 1 karakteristike oblika trupa povoljne s obzirom na otpor.

### PROPULZIJA BRODA

Teorija propulzije broda (ili kraće: propulzija broda) je nauka o djelovanju propulzora, tj. naprava koje proizvode poriv i time pokreću brod, i o hidrodinamičkim pojavama vezanim s pokretanjem broda.

Da bi se brod kretao nekom određenom brzinom, treba primijeniti odgovarajuću silu koja će savladati otpor broda pri toj brzini. Izvor energije koji proizvodi silu potrebnu za pokretanje broda može biti van broda, kao npr. kad se brod tegli užetom ili pokreće silom vjeta i jedrima, ili može biti u samom brodu, pri čemu posebna naprava, nazvana *propulzor*, najčešće brodski vijak (propeler), pretvara snagu preuzetu od pogonskog stroja u poriv.

Danas postoji nekoliko tipova brodskih propulzora koji se među sobom znatno razlikuju po načinu djelovanja, smještaju na brodu i konstruktivnoj izvedbi. To su: vijčani propulzor (propeler) ili brodski vijak, kolo s lopaticama, cikloidni ili Voith-Schneiderov propeler, Kirsten-Boeingov propeler i mlazni propulzor.



Sl. 1. Prvi projekt broda s bočnim kotačima (1405)

Hiljadama godina, sve do XIX st., jedra i vesla su bili isključiva sredstva za pokretanje brodova. Prvi pokušaji da se pogon broda mehanizira i učini nezavisnim od vjeta ili velikog broja veslača datiraju još iz XV st. Ideja je bila da se jedra i vesla zamijene bočnim kotačima, a raznim sistemima prijenosa