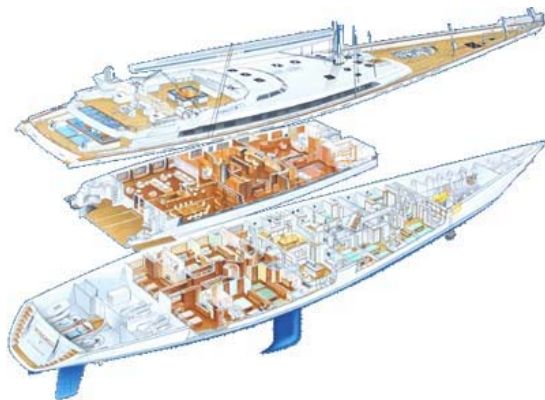


# Dobro došli u svijet brodova i jahti



# Tema br.5 – OTPOR I PROPULZIJA BRODA

## Nastavna pitanja:

1. Otpor broda
2. Snaga pogonskog uređaja, interakcija trupa i propelera
3. Propeler

## Literatura:

**1 Dr Andrija Lompar, Nauka o brodu, Univerzitet Crne Gore, Kotor, 2002. Str.121-159**

**2 Pomorska enciklopedija,**

# 1. Otpor broda

- Da bi se brod kretao kroz vodu (i vazduh) neophodno je savladati **silu otpora** koja se tom kretanju opire.
- Prva istraživanja otpora broda vezana su za traženje odgovora na pitanje: koliku snagu treba da ima pogonski stroj da bi se brod kretao određenom brzinom.
- Poznavanje sile otpora **R** obezbjeđuje i izračunavanje efektivne snage potrebne za kretanja broda nekom brzinom **v**.

$$P_E = R_T \cdot v \text{ (kW)}$$

Engleski naučnik- **Froude** koji je 1874 - te godine iznio svoju teorije o otporu broda.

Teorija se zasnivala na dimenzionoj analizi i eksperimentalnim mjerenjima koja je u prvo vrijeme vršio na ravnim pločama.

Ukupni otpor broda  **$R_T$**  se sastojao od otpora trenja  **$R_F$**  i otpora talasa  **$R_W$**

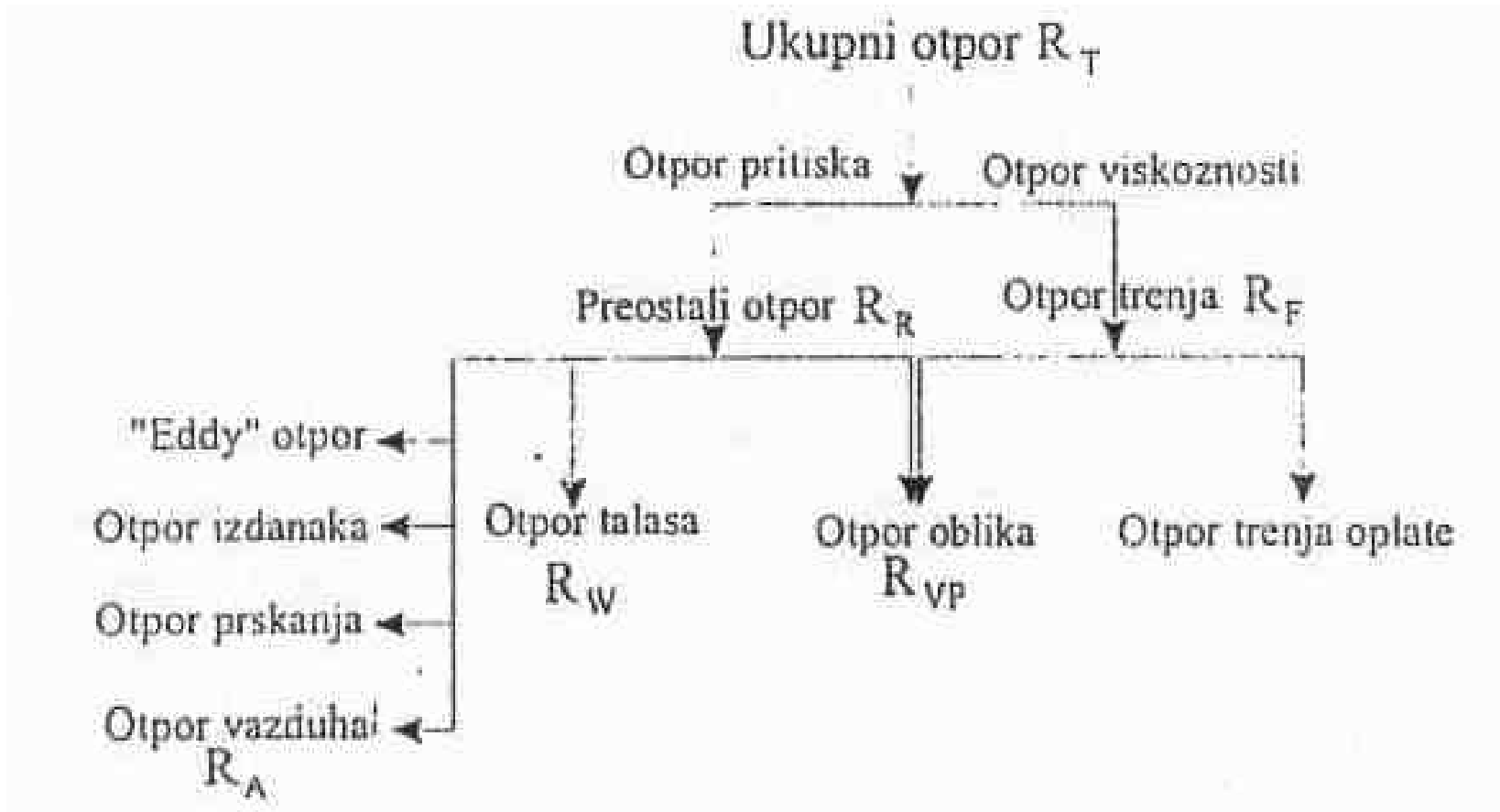
**Kroz sistematizovane rezultate svojih eksperimenata došao je do mogućnosti izračunavanja otpora trenja, tj. isto tako formulisao je i zakon sličnosti (Froude - ov zakon sličnosti) koji mu je omogućio da rezultate u izračunavanju otpora talasa modela, može primijeniti pod određenim uslovima i na brod.**

**Zbog značaja koji ovi eksperimenti imaju, vodeći autoriteti u ovoj oblasti su specijalizovane organizacije koje se bave eksperimentalnim mjerenjima i koje su udružene u međunarodnu asocijaciju poznatu ko ITTC (*International Tank Towing Conference*).**

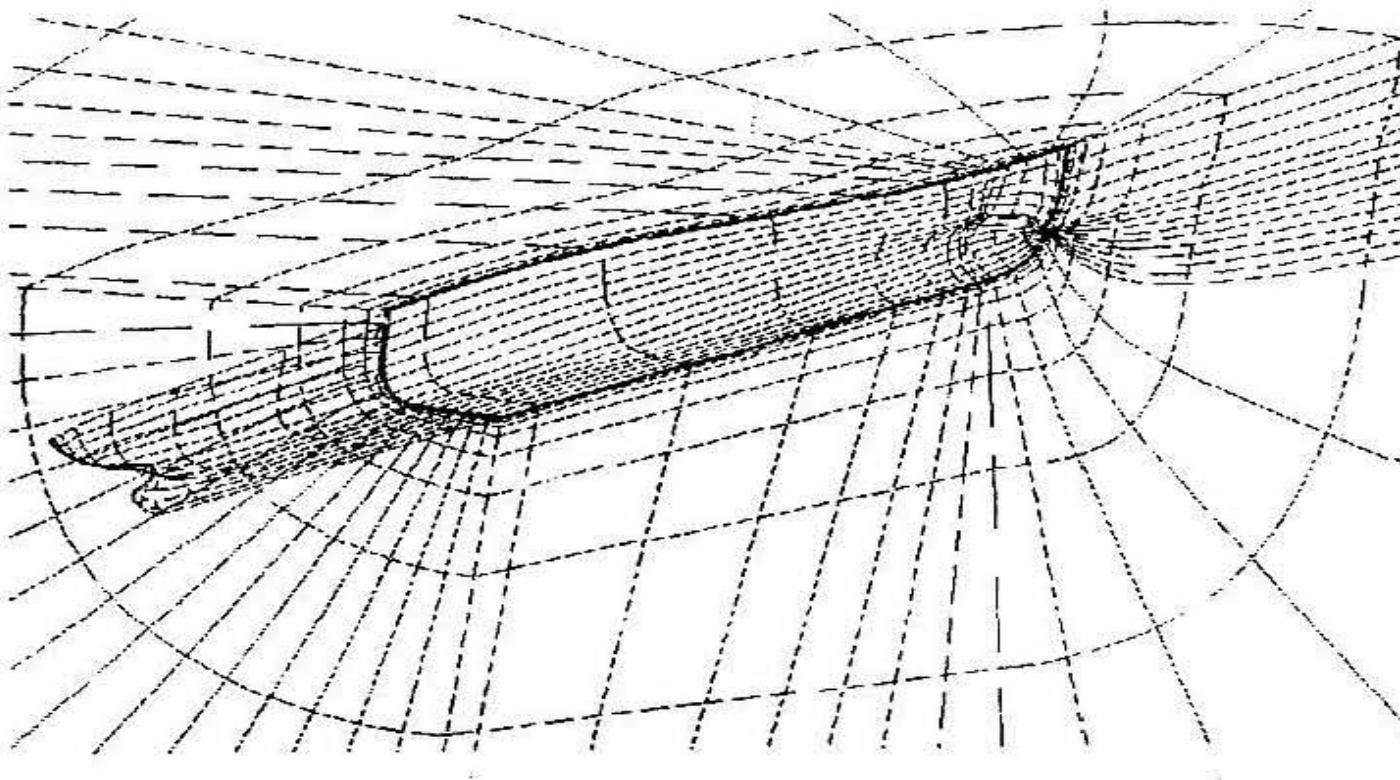
### **Tradicionalno otpor se dijeli na:**

- otpor čiji je uzrok **viskoznost fluida** u kojem se brod kreće i na
- otpor čiji je uzrok vezan za **rasporede pritisaka u fluidu.**

# Klasifikacija otpora broda



# Raspored otpora na trupu broda



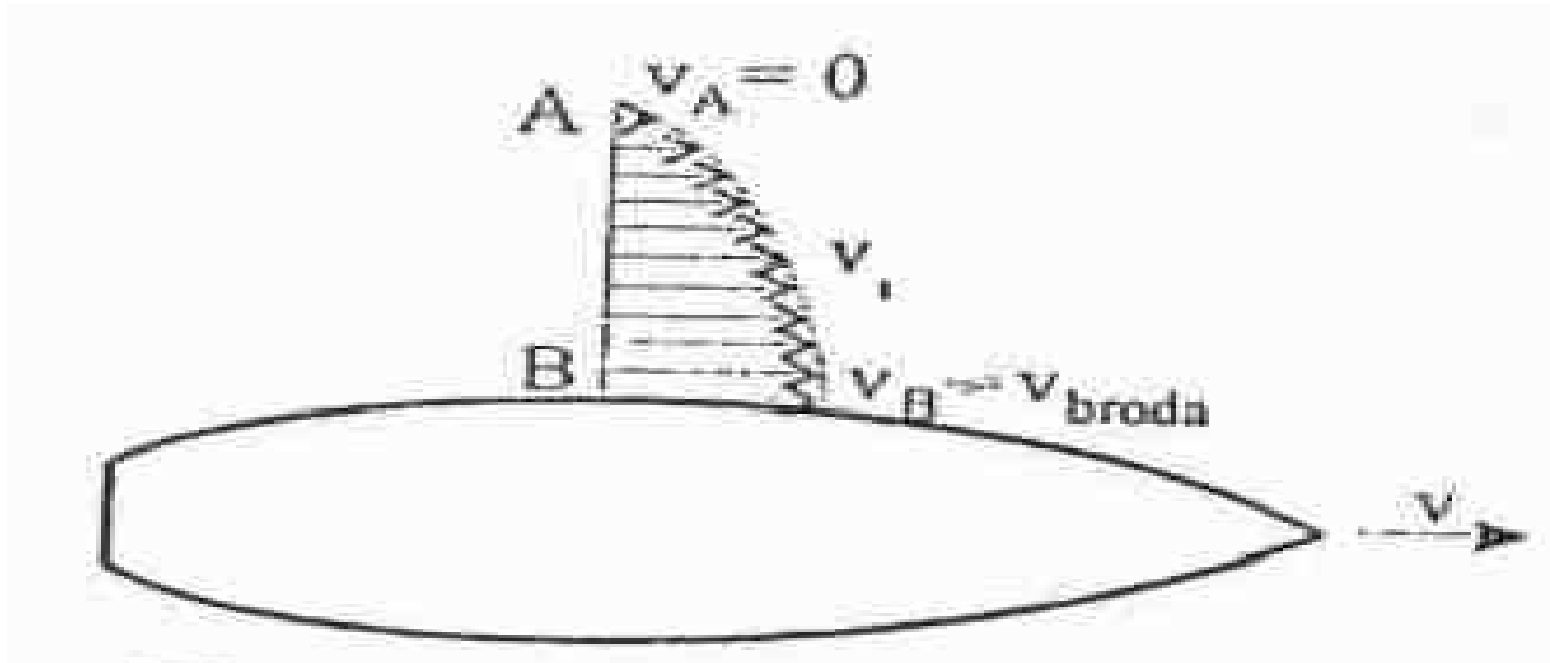
# *1.1 Otpor trenja RT*

Otpor trenja broda može biti povezan sa **trenjem podvodnog dijela broda** koji se kreće kroz vodu i **otporom nadvodnog dijela broda** koji se kreće kroz vazduh.

Prilikom kretanja kroz vodu između površine trupa broda i vode dolazi do reletivnog kretanja, pri čemu se pojavljuju i tangencijalne (u pravcu kretanja broda i suprotnom smjeru), sile otpora, koje su srazmjerne pritisku vode na trup i koeficijentu trenja između oplate trupa i vode.

Kretanje broda uzrokuje da se slojevi vode u njegovoj blizini kreću u istom pravcu kao i brod.

# Priroda otpora trenja broda



**Otpor trenja broda** jeste u stvari sila koja se troši na savladavanje ovih malih tangencijalnih sila čitavom površinom oplata broda i unutrašnjeg - trenja u "uznemirenoj" vodi u okolini

**Danas se Fricova formula vrlo rijetko koristi.**

Umjesto nje se za određivanje koeficijenta otpora trenja  $c_F$  koriste preciznije formule kao što su na primjer:

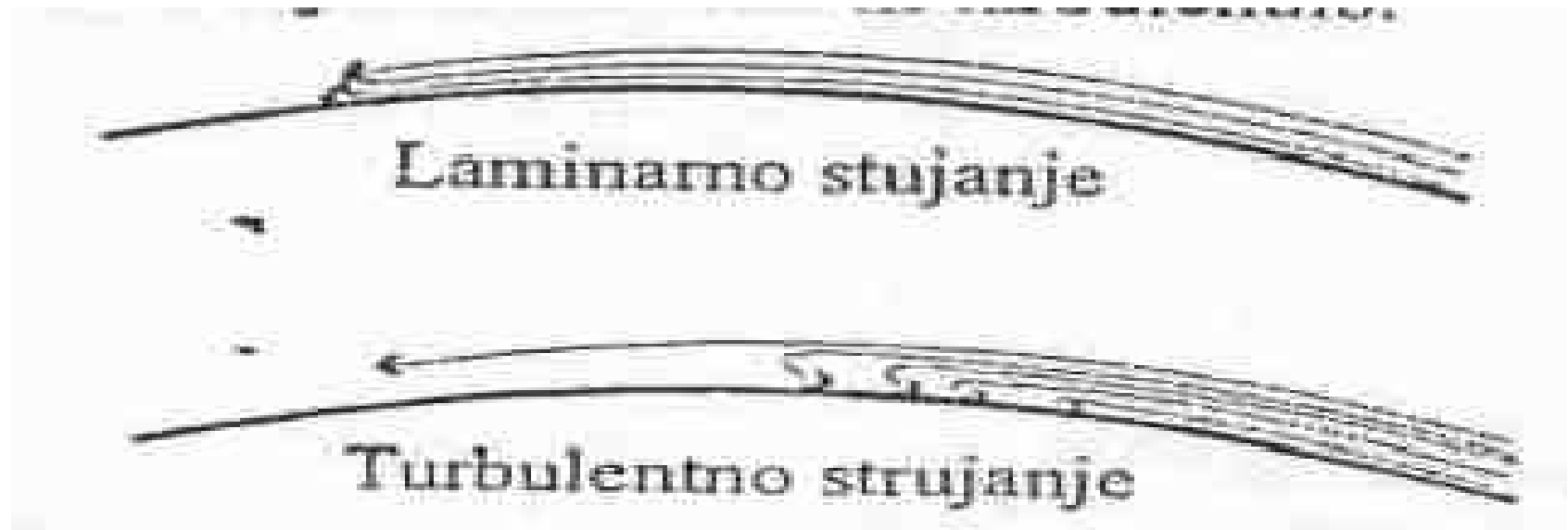
- ITTC 1957 formula
- Schoencher-ova formula
- Prandtl – Schlichting-ova formula
- Huges – Prohaskina formula, itd.

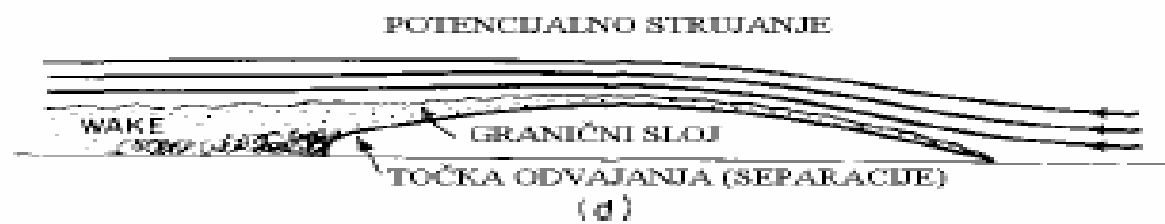
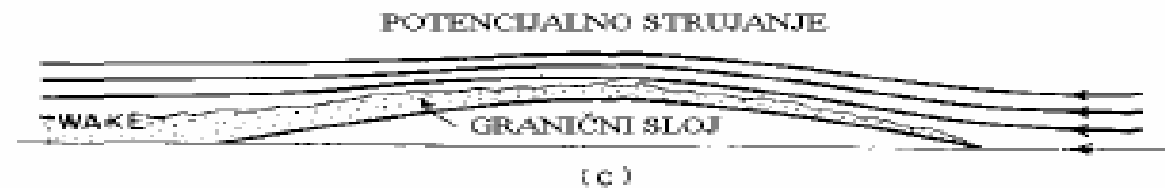
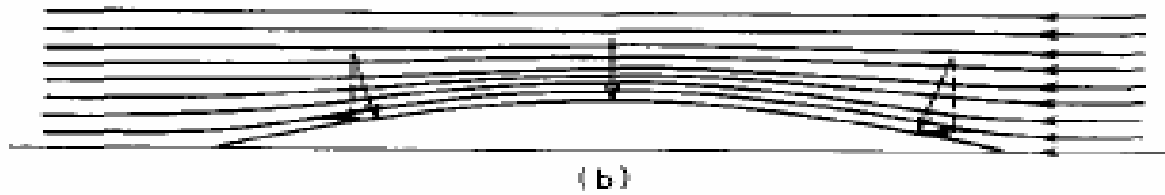
Sve prethodne formule za izračunavanje otpora trenja daju približno iste rezultate

## Strujanje vode oko brodske oplate zavisi od:

- oblika broda,
- finoće njegovih linija,
- hrapavosti površine oplate,
- karakteristika vode u kojoj se kreće i
- brzine broda,

voda oko brodske oplate može strujati laminarno i turbulentno.





**Kod pojave turbulentnog strujanja otpor trenja će biti, znatno veći.**

**Kod brodova, najčešće se turbulentnost pojavljuje neposredno iza pramca broda i u blizini krme.**

**Za trgovačke brodove se pretpostavlja da imaju približno istu podjelu između laminarnog i turbulentnog strujanja.**

**Problem se pojavljuje u vezi sa razlikom hrapavosti oplata u fazi eksploatacije, s obzirom da je realna oplata uvijek hrapavija od one na ispitivanom modelu**

## Hrapavost oplale može-bit :

- **strukturna** (uslijed deformacije limova oplata),
- **korozivna** (uslijed neravnina na oplati nastalim korozionim oštećenjima) i
- **obrastanjem** (uslijed algi, školjki i drugih organizama koji se na oplati nastanjuju).

Jasno je da je stepen hrapavosti u pojedinim slučajevima teško kvantifikovati

**Otpor trenja broda predstavlja veoma značajnu komponentu ukupnog otporu koja se kreće i do 90% ukupnog otpora kod sporih brodova kao što su tankeri, brodovi za rasuti teret.**

**Kod brzih brodova kao što su putnički ili kontejnerski brodovi, ovaj procenat je znatno manji i može se kretati oko 40% ukupnog otpora.**

## *1.2 Froude-ov zakon sličnosti*

**na bazi dobijenih rezultata otpora talasa za model on je mogao donijeti zaključke u vezi sa otporom talasa broda. U tu svrhu on se poslužio zakonom sličnosti.**

**Ukoliko dva tijela (brod i model) imaju slične geometrijske oblike i napreduju istim odnosom koji se naziva Froude-ov broj, onda su njihovi preostali otpori proporcionalni kubu dužina.**

**Za uspostavljanjem veze rezultata  
dobijenih ispitivanjem modela i onih  
koji se odnose na brod neophodno je  
postići:**

- **geometrijsku sličnost broda i  
modela,**
- **kinematsku sličnost i**
- **dinamičku sličnost.**

**Dinamička sličnost podrazumijeva sličnost između seta sila na brodu i na modelu: inercijalnih, hidrodinamičkih sila, težine i posebno otpora trenja.**

**Iz prethodnih uslova vidi se da postoji veza između kinematskih viskoznosti tečnosti i odnosa dužina broda i modela.**

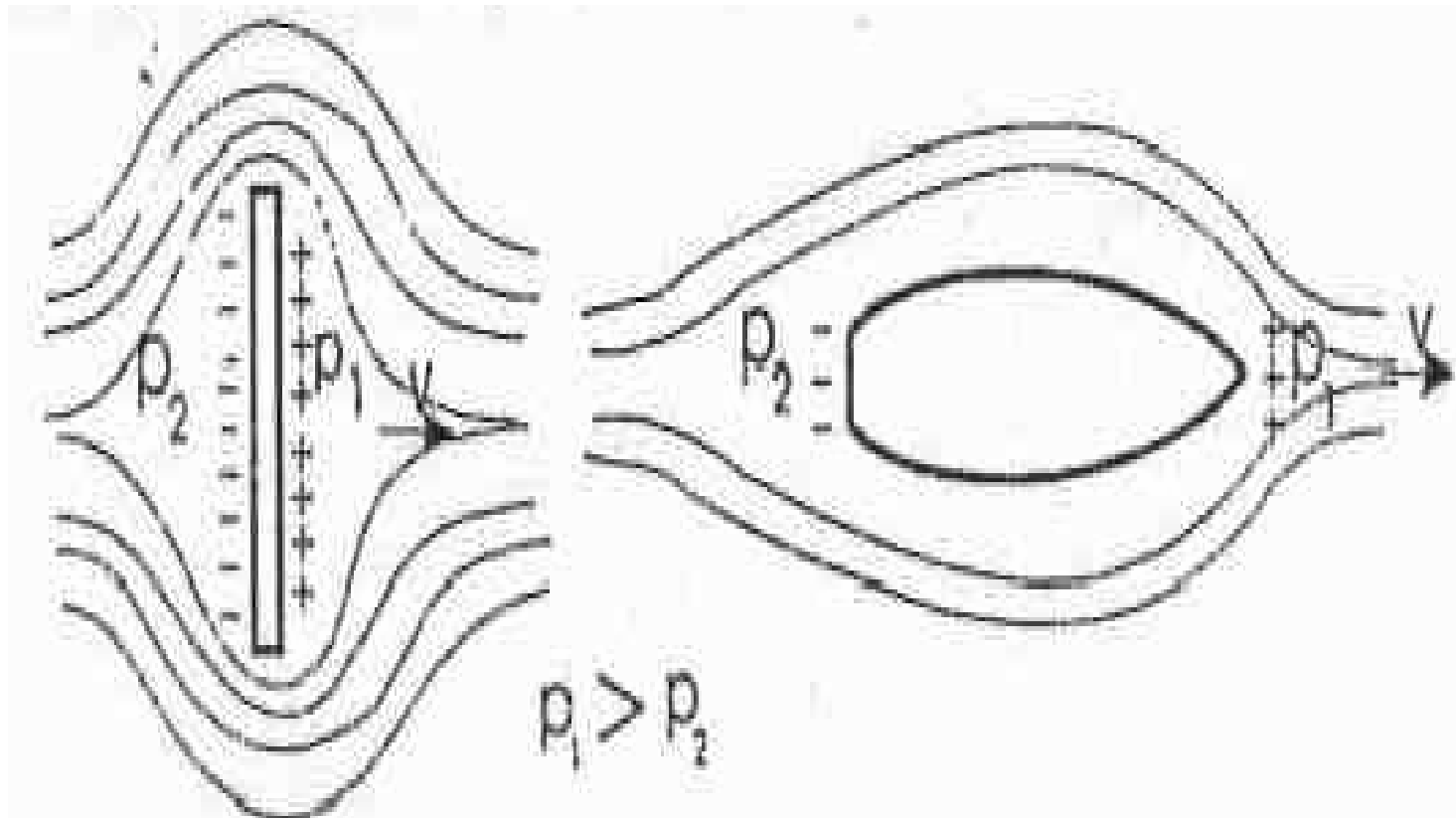
## *1.3 Preostali otpor $R_R$*

Preostali otpor se definiše kao razlika ukupnog otpora i otpora trenja  $R_R = R_T - R_F$  osnovne komponente preostalog otpora su:

- otpor talasa  $R_w$ ,
- otpor viskoznog pritiska  $R_{vp}$  i
- otpor vrtloženja ili eddy otpor  $R_E$ .

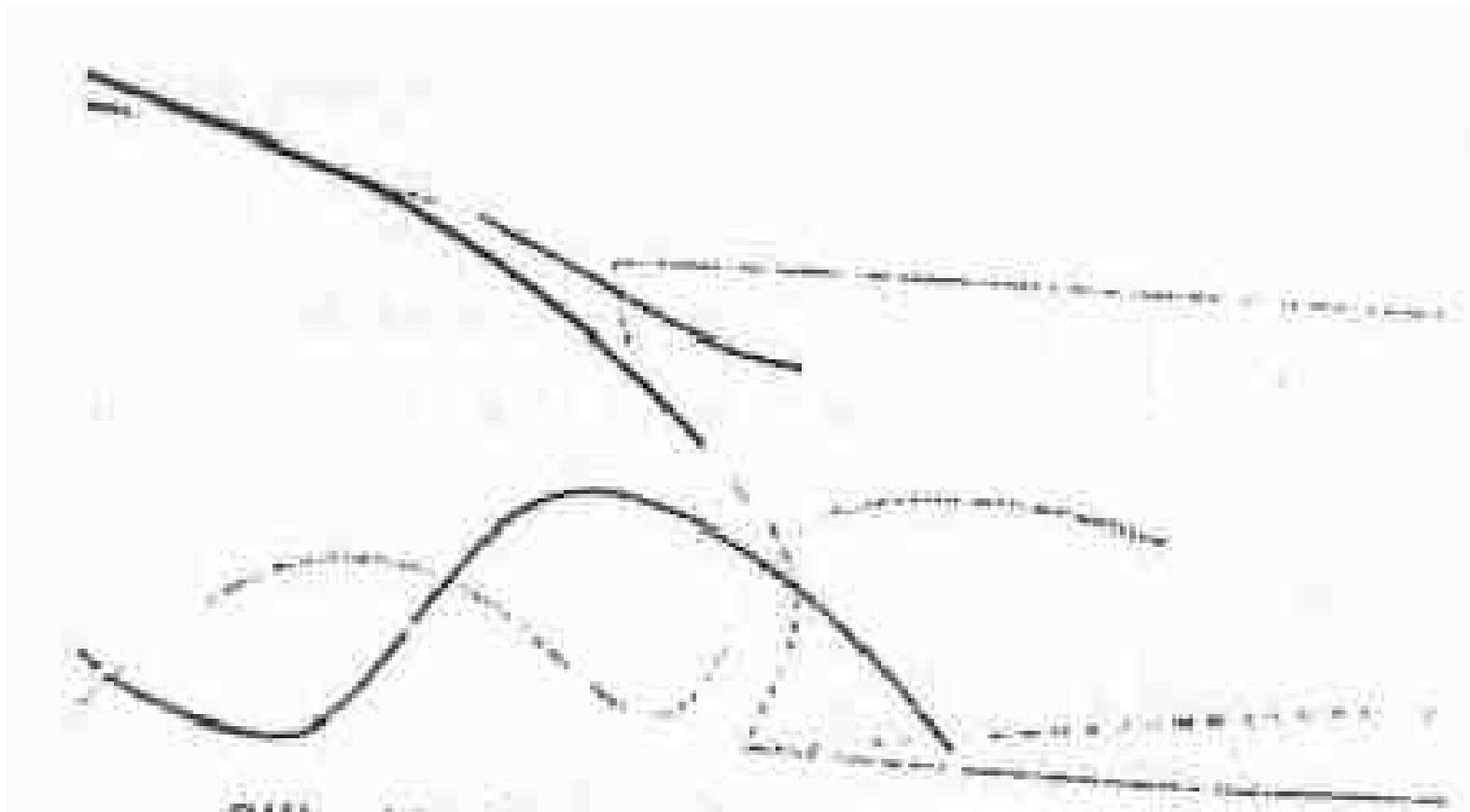
Kao poseban oblik preostalog otpora pojavljuje se i otpor vazduha.

**Otpor viskoznog pritiska** ili kako se često naziva i otpor oblika nastaje iz činjenice da je uslijed različitosti oblika tijela (broda) različita i brzina strujanja medija oko tijela



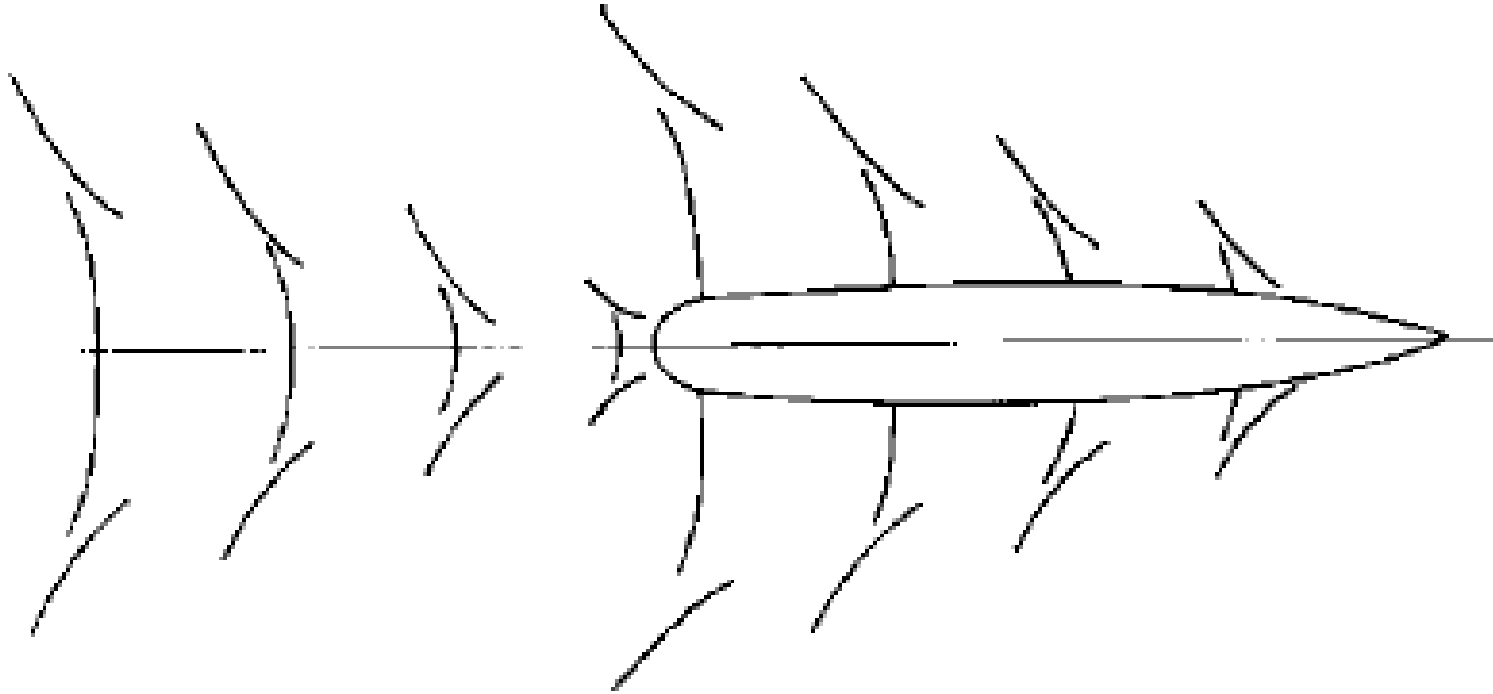
**Hidrodinamičnim oblikom broskog trupa ovaj se otpor znatno smanjuje**

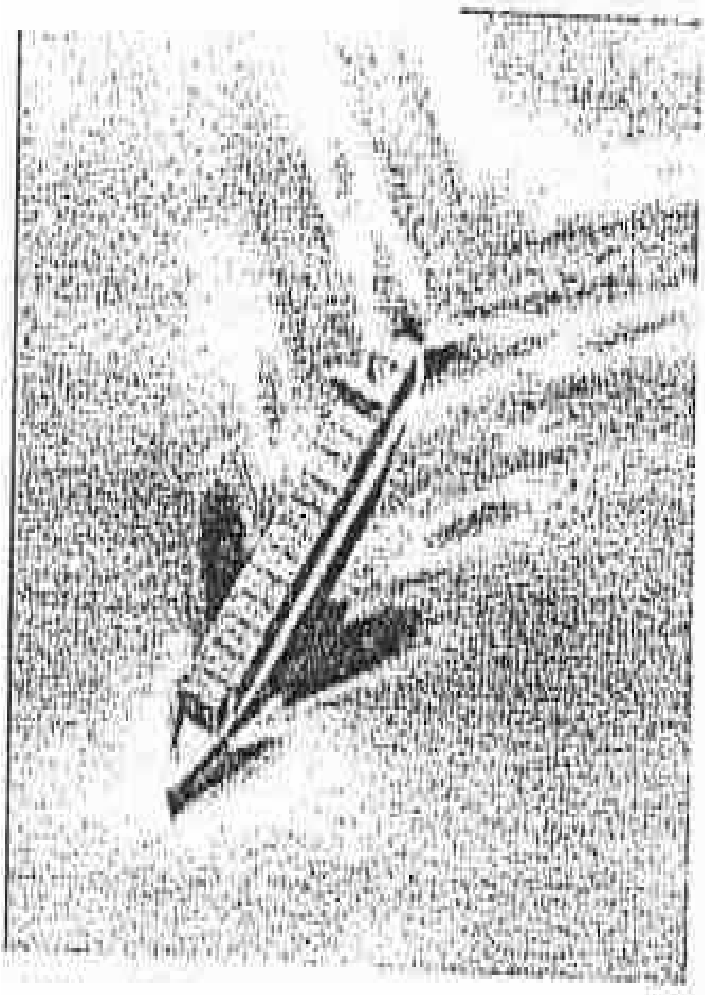
**Otpor vrtloženja, odnosno eddy-ijev otpor odnosi se na stvaranje vrtložnog kretanja vode iza broda zbog toga što oblik podvodnog dijela krme nije u potpunosti prilagođen strujnicama vode**



## Najveći dio preostalog otpora čini otpor talasa $R_w$ .

U prvom redu talasi nastaju kao posledica nejednolike brzine tečnosti oko broda. Brzina vode koja struji oko broda manja je na premcu i na krmi, a veća u sredini broda.





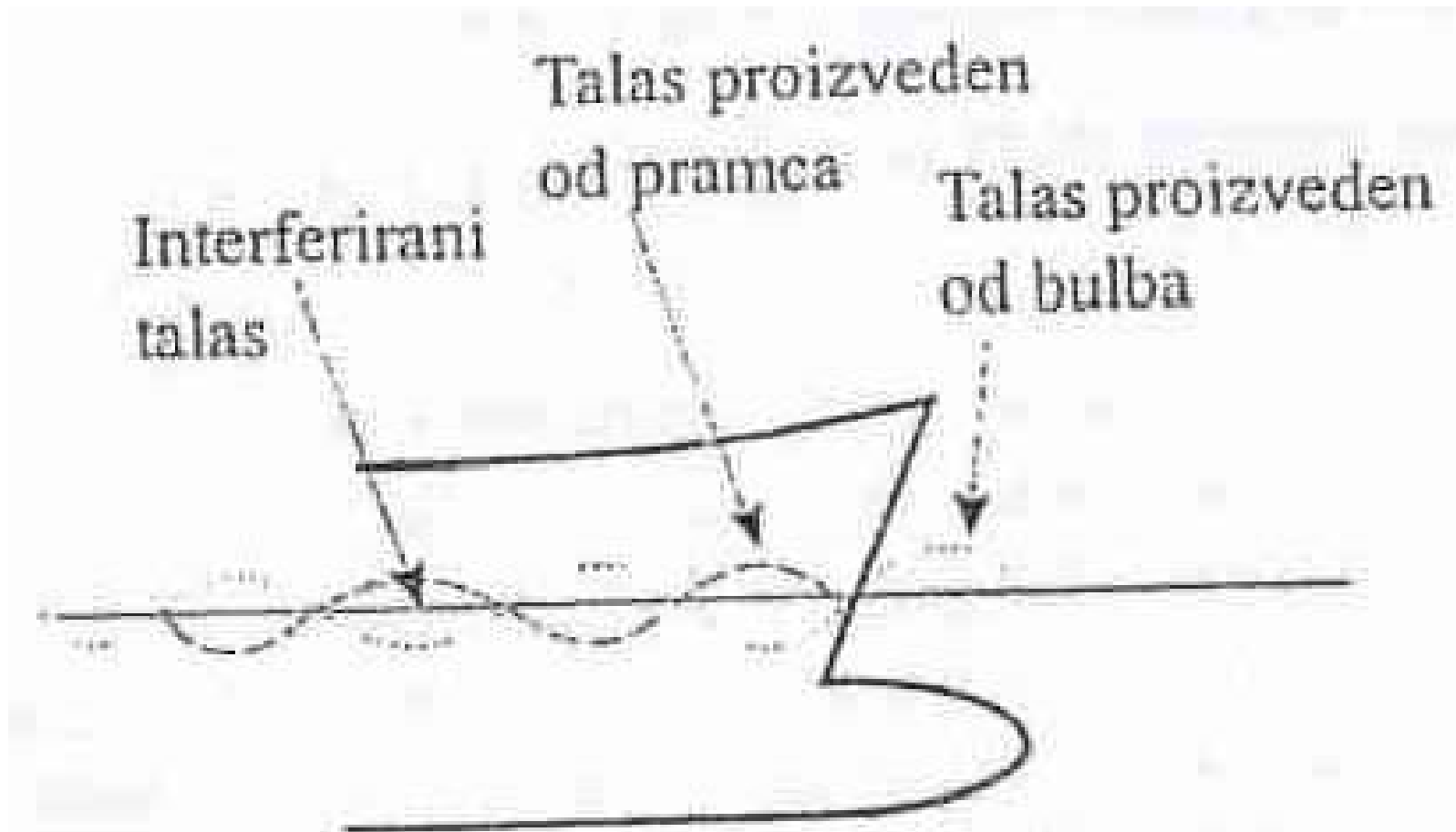
**S obzirom na činjenicu da se talasi stvaraju na pramcu, sredini i krmi broda i da njihova talasna dužina zavisi od kvadrata brzine broda i dužine broda, jasno je da može, doći do njihove interference, odnosno superponiranja.**

**Ovo se manifestuje na način da se na krivoj otpora pojavljuju grbe ili "udubljenja".**

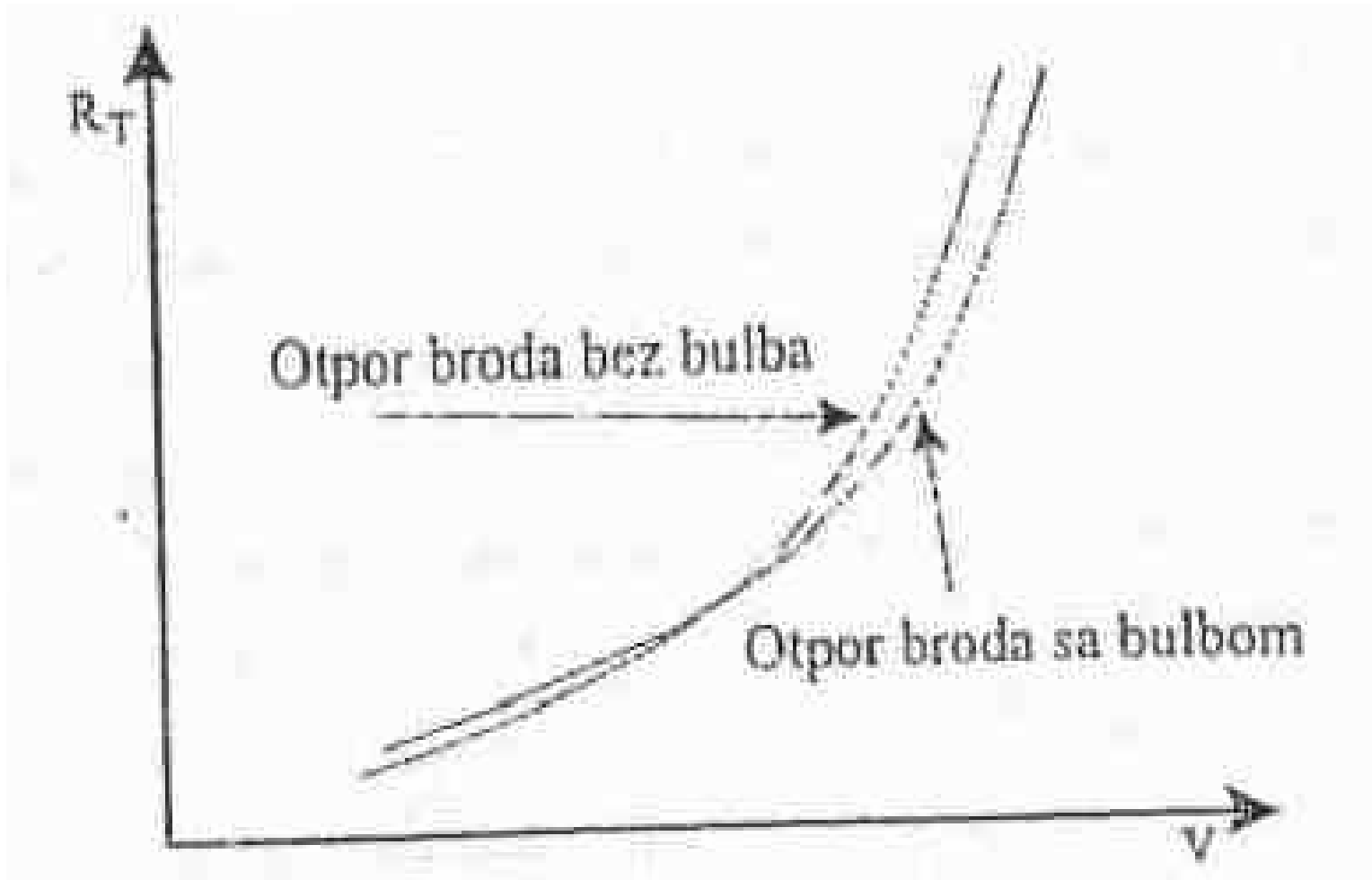
**Otpor talasa može se u jednom dijelu smanjiti promjenom oblika pramca na način da se brodu doda istureni dio koji se zove "**bulb**".**

**Uloga bulba je da stvori dodatni talas koji sa pramčanim talasom interferira.**

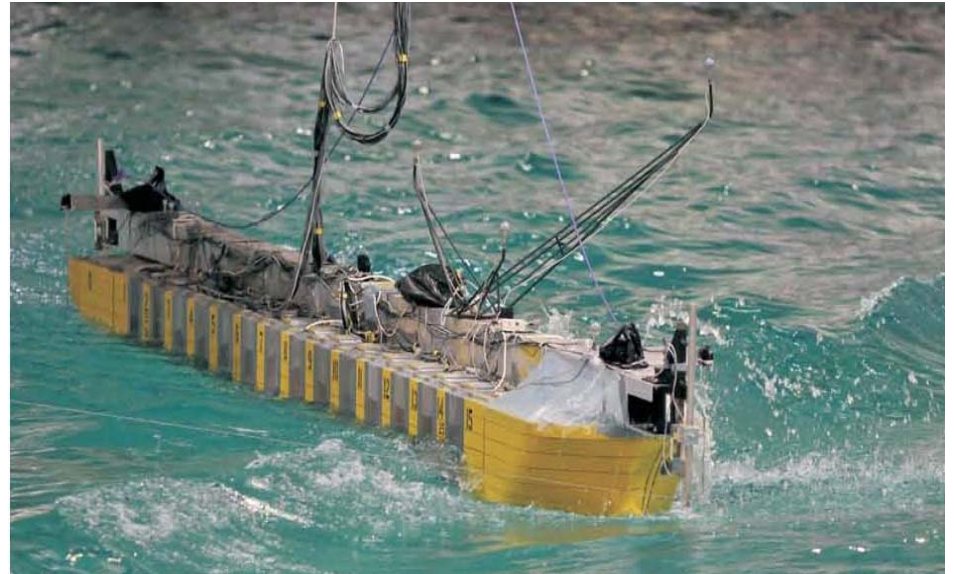
## Uticaj bulba na pramčane talase



## Otpor broda sa i bez bulba



Ako se primijeni Froude-ov zakon sličnosti, onda se mogu dobiti rezultati mjerenja na manjim plovilima u bazenima (modeli), primjeniti i na veće tj. prave brodove.



# The fleet



8500 TEU container ship

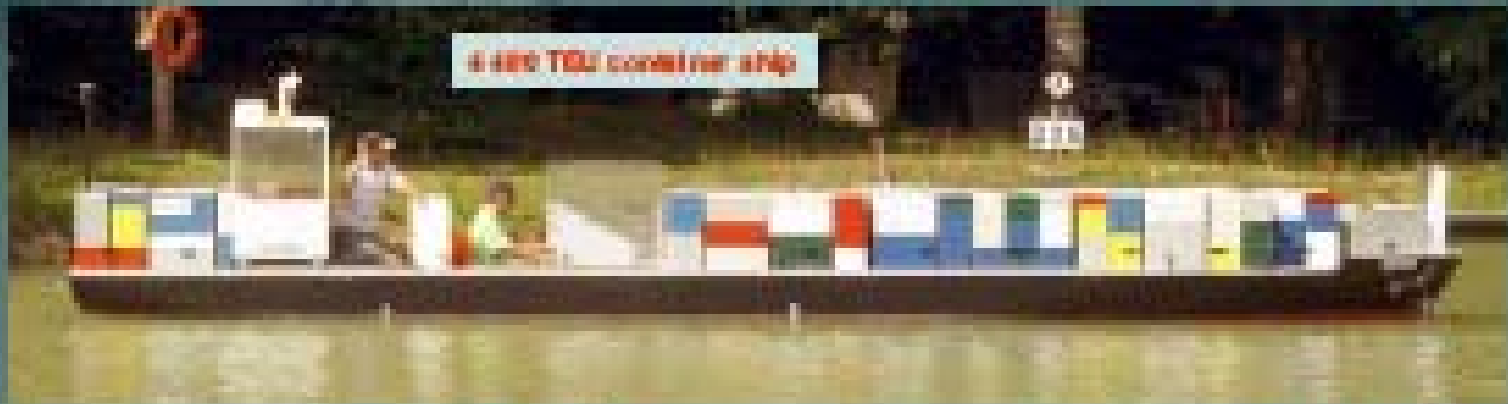


266 000 m<sup>3</sup> LNG carrier





# The fleet



4 400 TEU container ship



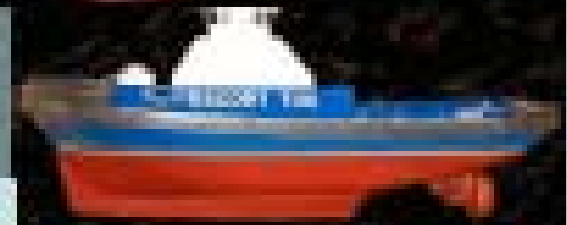
same as car carrier and cable ship



21 Moth Baller tug

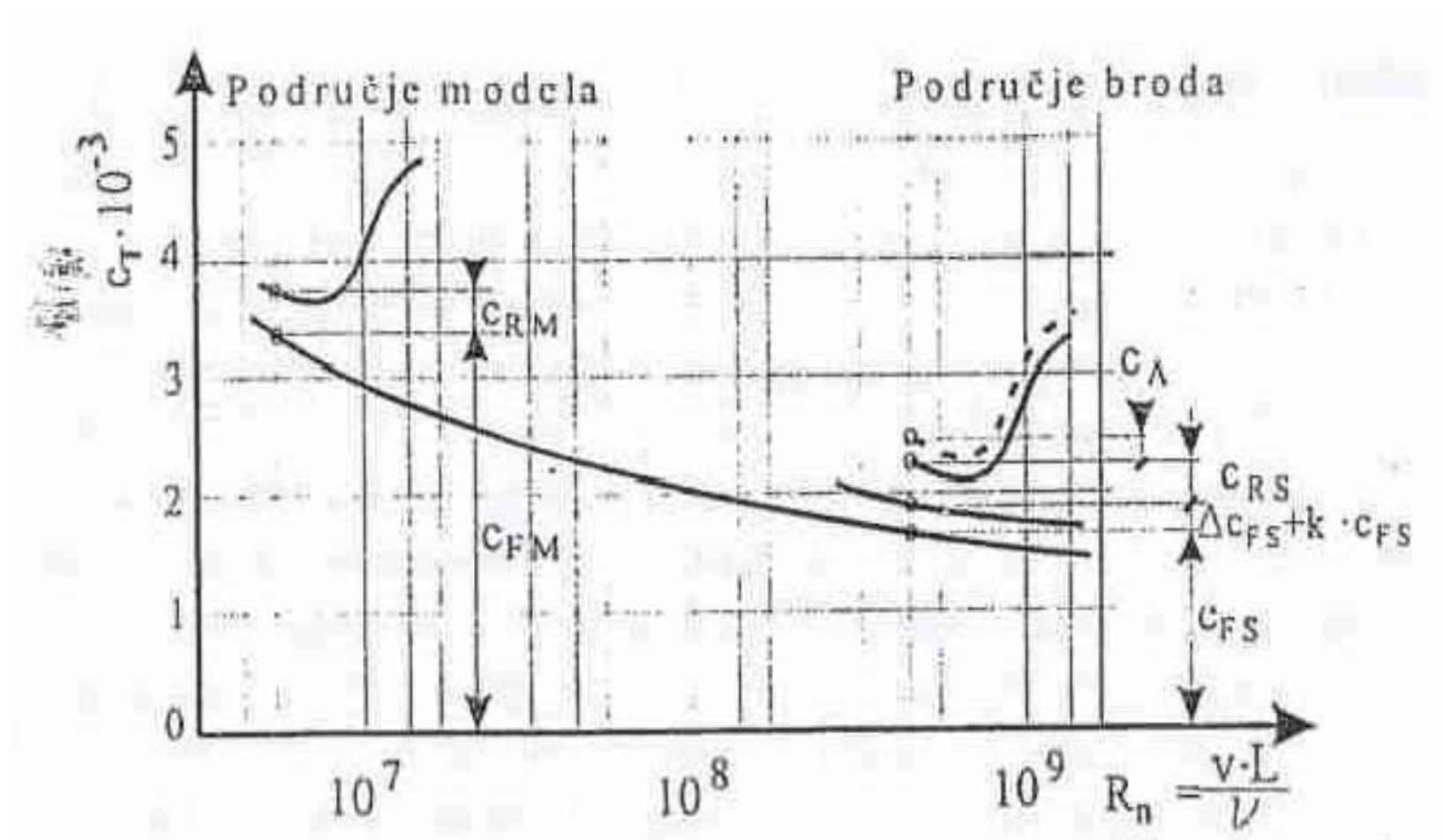


21. 2 BW pods



2000 tug

# Određivanje otpora broda preko Froudeovog zakona sličnosti



## **Pored naprijed pomenutih komponenti otpora broda, u realnosti se pojavljuju još neke:**

- **otpor dodataka** na brodskom trupu odnosi se na ljuljnu kobilicu, kormilo, skegove, stabilizatorska peraja i druge izdanke. Može biti od 0.5% do 10% od ukupnog otpora.
- **otpor prskanja** odnosi se na, stvaranje vodenog spreja oko vodne linije broda prilikom kretanja. Ovaj otpor je kod najvećeg dijela brodova koji se kreću komercijalnim brzinama zanemarljiv.
- **otpor vazduha** se odnosi na otpor nadvodnog djela trupa broda pri kretanju i obuhvata i otpor trenja i otpor pritiska zbog viskoznosti. Otpor vazduha zavisi od lateralne površine broda izložene vazduhu i proporcionalan je gustini vazduha i brzini na kvadrat.

## ***1.4 Izračunavanje otpora broda***

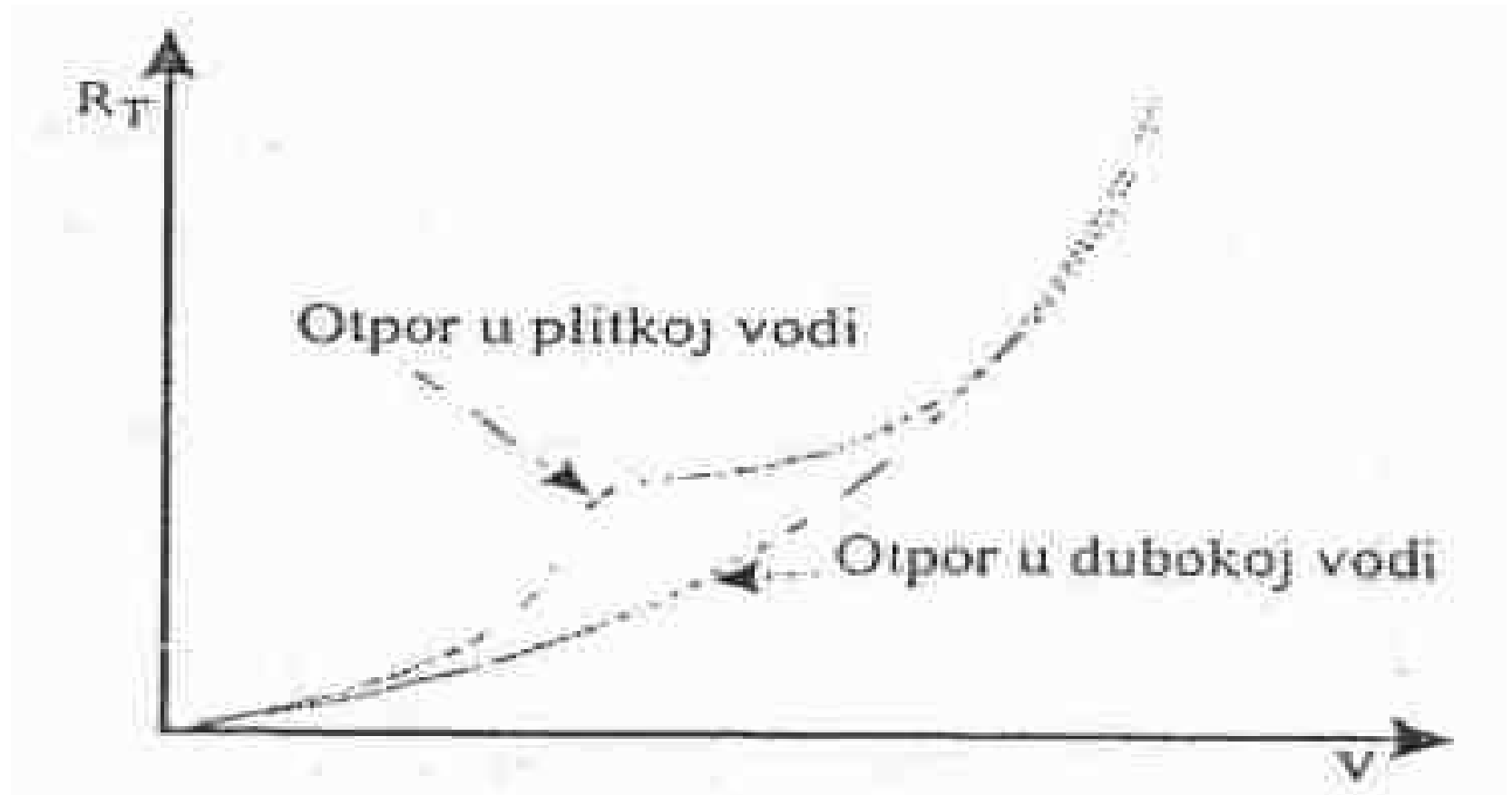
**Ranije je rečeno da je nauka o otporima broda započela eksperimentalnim bazenskim mjerenjima.**

**I danas se ova nauka zasniva na bazenskim ispitivanjima sistematizovanih serija modela.**

**Tih bazena ima više u svijetu, a najpoznatiji su Wageningen, Goeteborg, Osaka, itd.**

**Podatci koji se dobiju bazenskim ispitivanjima prikupljaju se i koriste se za procjenu novih brodova.**

# *1.5 Otpor broda u plitkoj vodi i kanalima*

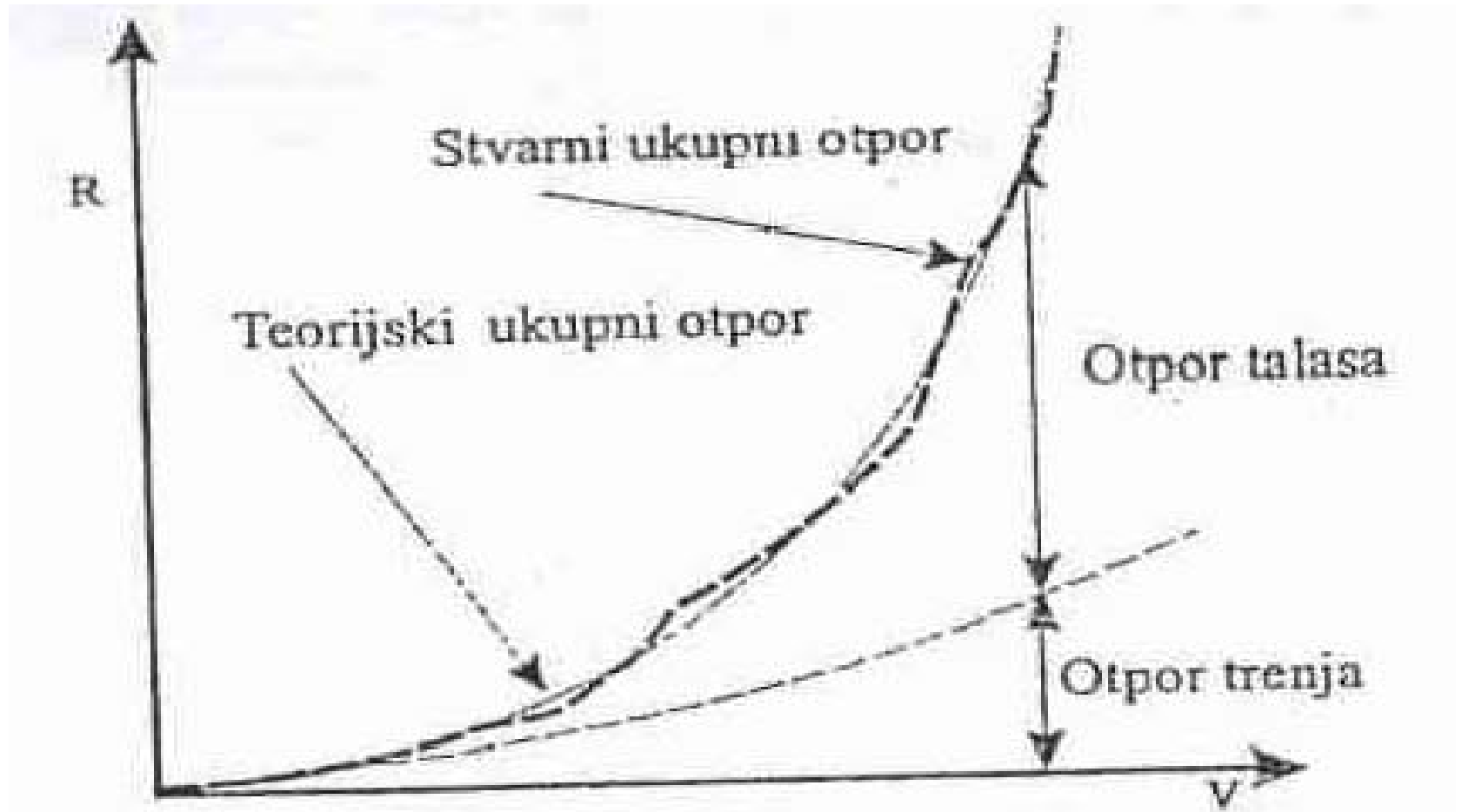


## **2. Snaga poganskog uređaja i interakcija trupa i propelera**

Da bi se **energija** proizvedena u **poganskom uređaju** na brodu transformisala u **porivnu silu**, nophodno je da na brodu postoji **propulzor**.

U ranim fazama primjene parne mašine na brodu je kao propulzor upotrebljavan, točak, koji je kasnije zamjenjen propelerom, prvenstveno zbog većeg **stepena korisnosti** koji propeler ima u odnosu na točak .

**Otpor koji se dobija proračunom ne razlikuje se od stvarnog kod trgovačkih deplasmanskih brodova.**



**Na bazi izračunatog otpora broda, može se izračunati i snaga koja je neophodno za savlađivanje ukupnog otpora.**

**Ova snaga se naziva efektivna snaga i obilježava se sa  $P_E$ .**

**Ona predstavlja energiju u jedinici vremena koju je neophodno uležiti u "guranje" ili "vuču", odnosno poriv broda da bi se on kretao brzinom  $v$ .**

$$P_E = R_T \cdot v \text{ (kW)}$$

**Međutim u pogonskom uređaju je neophodno proizvesti znatno veću snagu, budući da se jedan dio nje izgubi prije nego se pretvori u efektivnu.**

**Porivna snaga koju propeler daje za kretanje broda može se predstaviti kao **T** - porivna sila koju stvara propeler.**

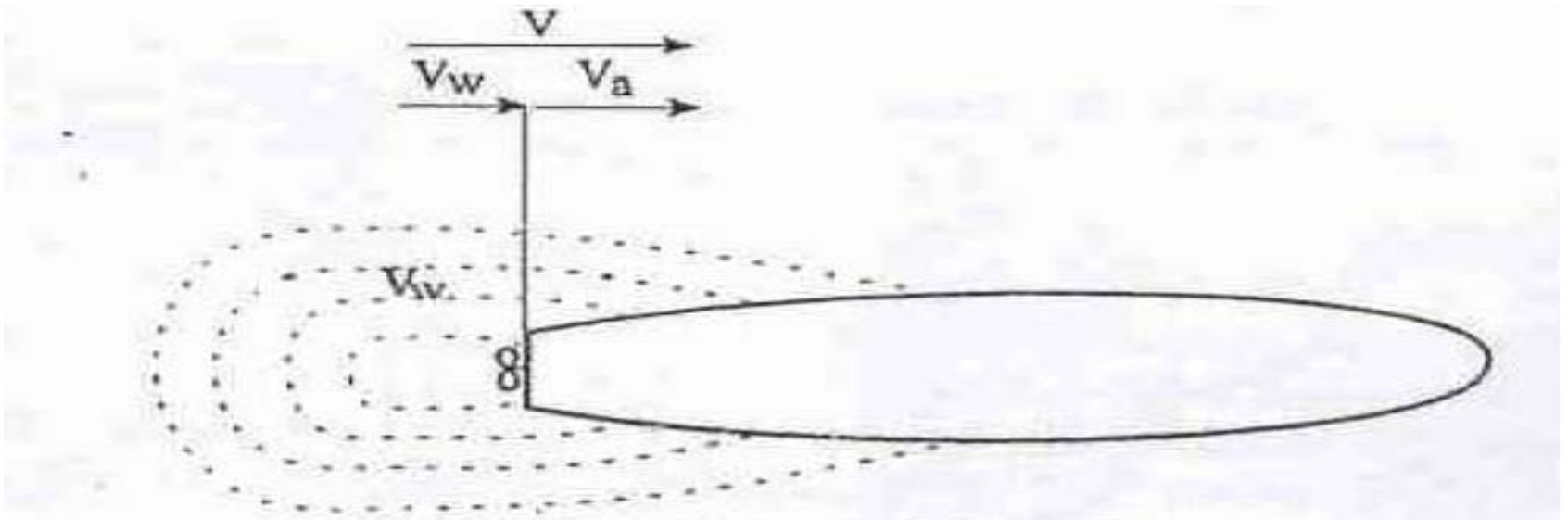
**Neophodno je da porivna sila **T** - koja je uzrok kretanju broda, bude veću od otpora broda za gubitke koji nastaju uslijed interakcije trupa i propelera odnosno za efekat te interakcije.**

**Ova interakcija ima nekoliko elemenata.**

**Prvi element ove interakcije** - zajedno sa brodskim tijelom koje se kreće brzinom  $v$ , putuje i određena količina vode u okolini njegove krme i to brzinom  $v_w$  je prouzrokovane viskoznošću tečnosti u kojoj se brod kreće i koju brod "vuče" za sobom.

Pored ovog, krmeni talas stvara i orbitalno kretanje vode u blizini krme, što takođe utiče na brzinu vode.

Ovaj efekat kretanja vode u blizini krme broda određenom brzinom se naziva **sustrujanje [wake]** i njegova konačna posledica jeste da propeler u vodi u svojoj okolini napreduje brzinom  $v_a$ , koja je jednaka razlici brzina broda i vode koja putuje za brodom. Ova se brzina naziva **brzina napredovanja propelera**.



**Na brzinu napredovanja propelera utiče i koeficijent sustrujanja  $W$  koji utiče na izračunavanje snage koju propeler treba da preda. Veličina ovog koeficijenta se može dobiti proračunski i eksperimentalno, gdje se mora uzeti u obzir i koeficijent punoće brodske forme.**

**Efekat ovog faktora na sami propeler je pozitivan s obzirom da je snaga koja se pretvara u poriv**

$$P_T = T \cdot v_a,$$

**a da je  $v_a$  manje od  $v$ .**

Isto tako svojim radom usisavajući vodu koja se nalazi ispred njega, a neposredno iza krme broda, propeler smanjuje pritisak iza broskog tijela, povećavajući na taj način razliku pritisaka ispred i iza broskog korita, odnosno "vukući" korito broda nazad i povećavajući na taj način otpor broda.

Drugi faktor; ovaj fenomen naziva se smanjenje poriva i može se posmatrati kroz povećanje porivne sile koja je neophodna za svaladavanje ovog otpora  $\Delta R_T = t \cdot T$ .

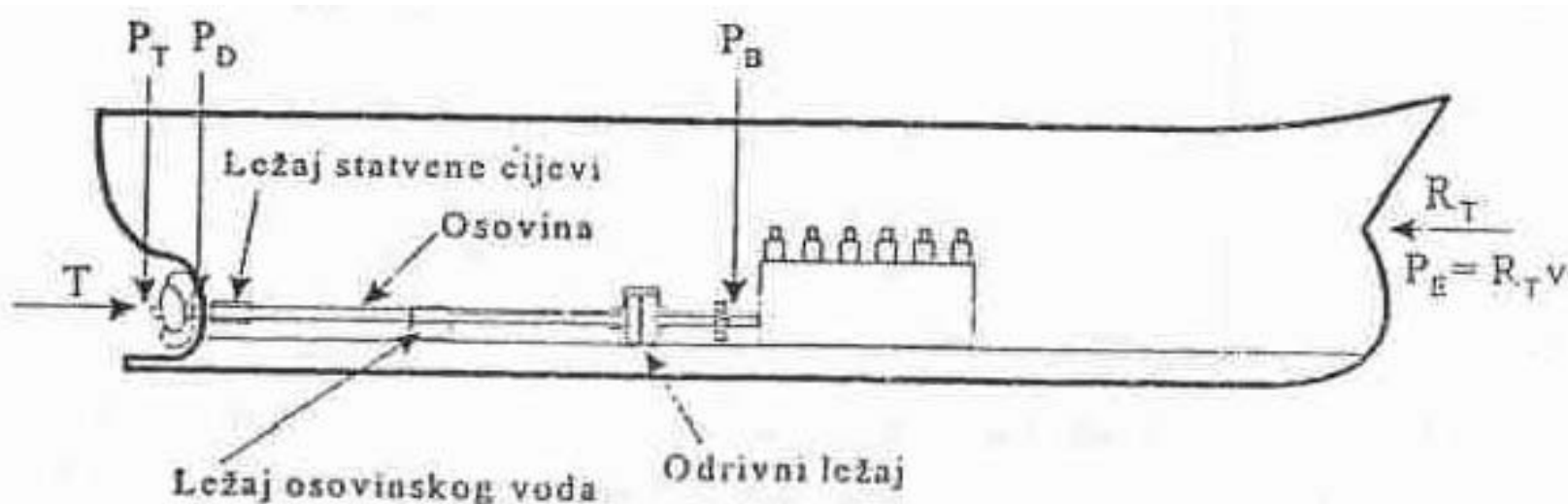
Gdje je  $t$  faktor smanjenja poriva  $t = T - R_T / T$

Treći faktor koji se odnosi na činjenicu da je propeler smješten neposredno iza korita i da mu dotok vode nije konstantan niti dolazi pod pravim uglom u odnosu na površinu diska propelera, već ima određenu rotaciju.

**Stepen korisnosti propelera** dobija se na bazi eksperimentalnih merenja na slobodnom propeleru. Kod dobro izabranih propelera na trgovačkim brodovima kreće se od **0.45 do 0.7**.

**Stepen korisnosti osovinskog voda** kreće se od 0.97 do 0.98 za brodove bez reduktora, za brodove sa reduktorom on je manji zbog gubitaka na reduktoru (**2 – 4%**).

**U praksi se kod izbora pogonskog uređaja uvijek ide na obezbjeđenje rezervne snage, kod dizel motora to je približno 15%.**



# 3. Propeler

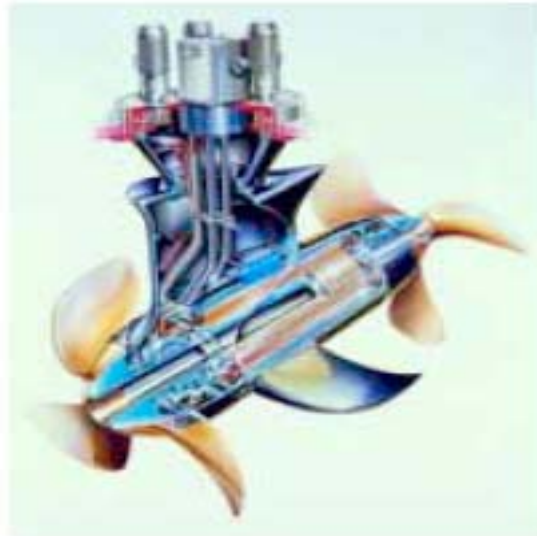
**Propeler je patentiran u Engleskoj četrdesetih godima devetnajestog vijeka, ali je pokušaja njegove primjene bilo i ranije.**

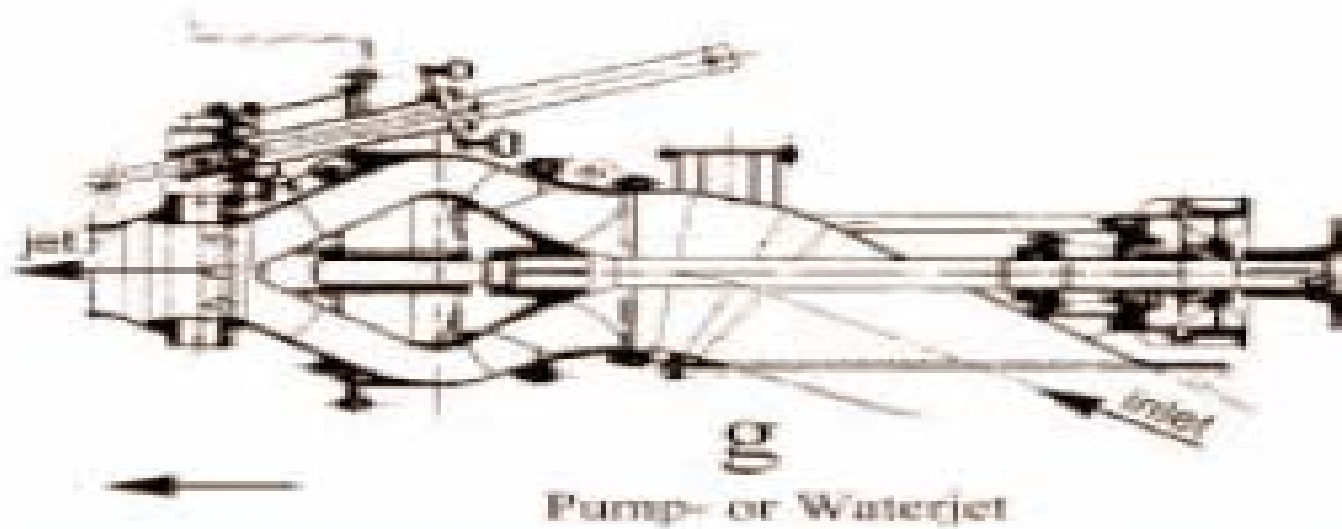
**Danas se na brodovima susreće veći broj različitih vrsta propelera:**

- propeler Voith-Schnaider-ov.**
- propeler sa zakošenim krilima,**
- mlazni propeler,**
- propeler sa sapnicom,**
- tandem propeler, itd**



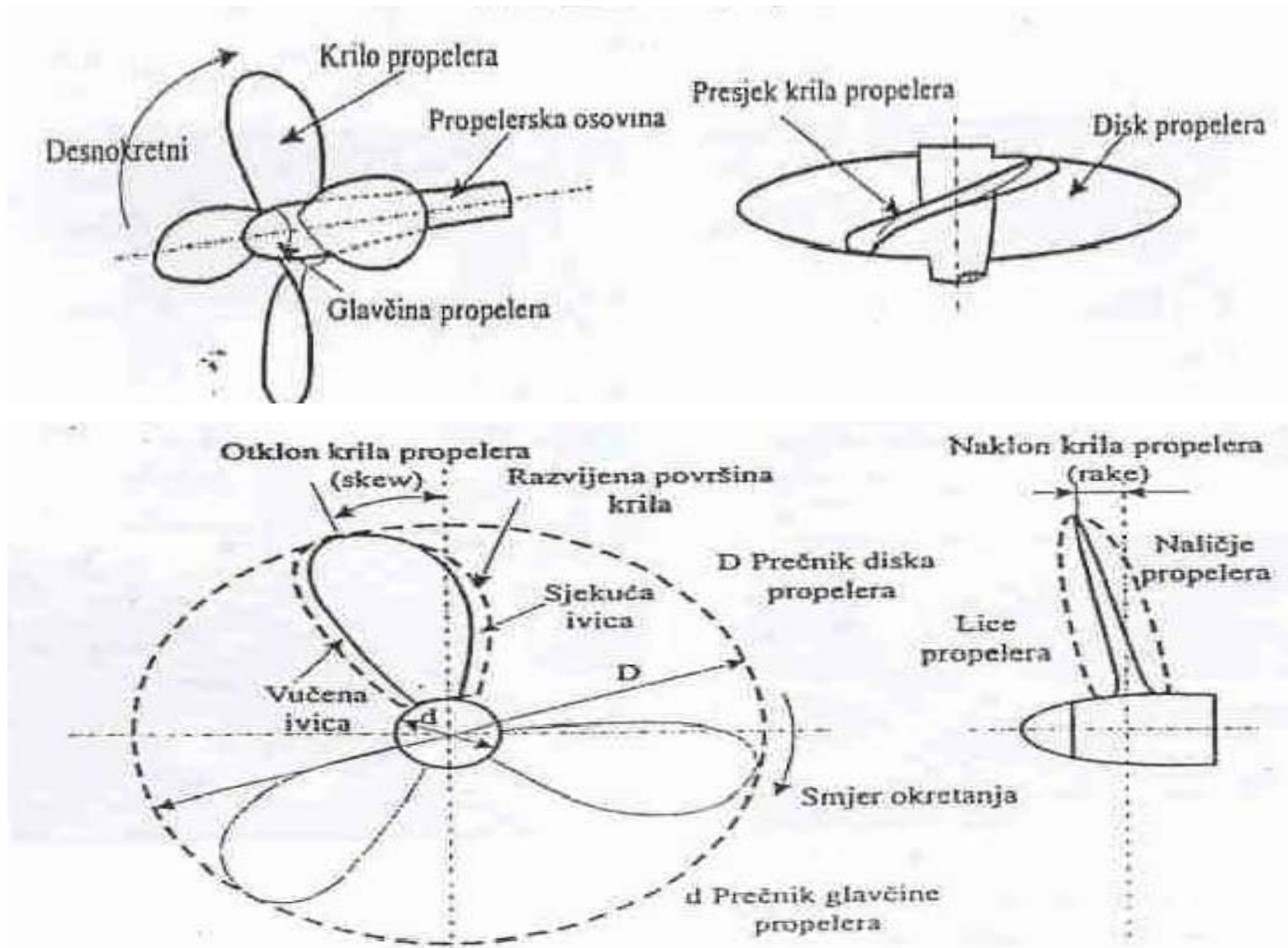






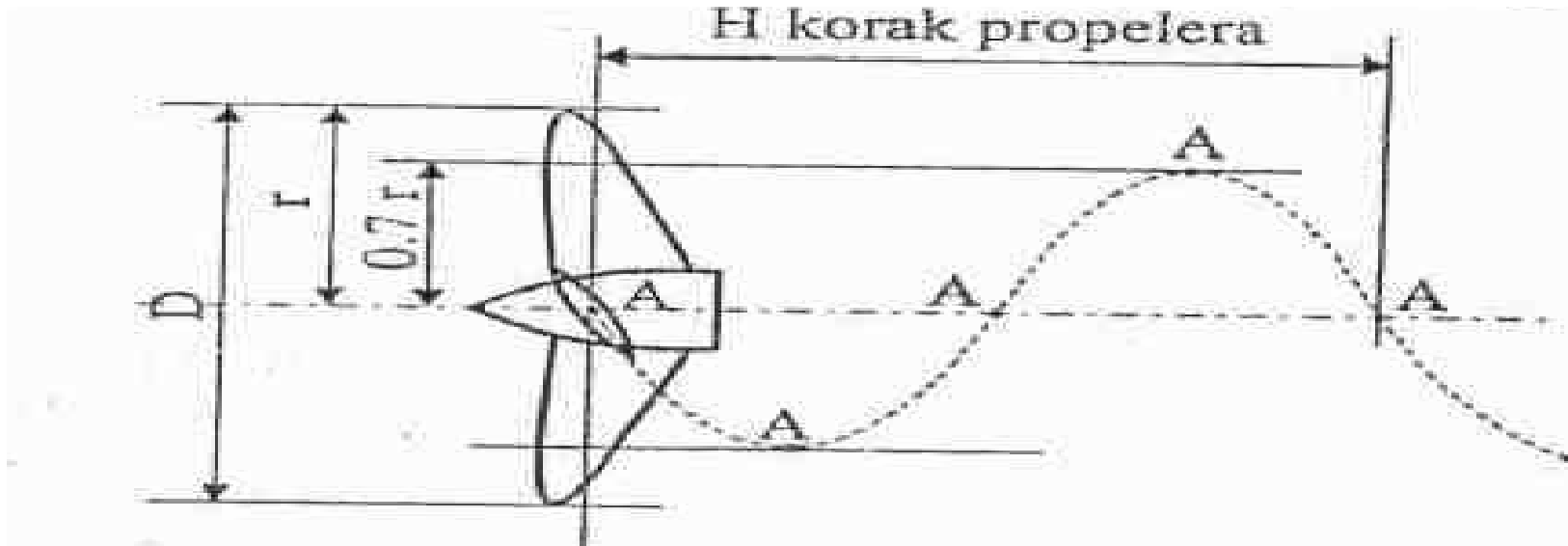
Slika 2.1. g) Vodomlazni propulzor

# Glavni dijelovi propelera



Slika 123 Karakteristične veličine propelera

## Korak Propelera



**Korak propelera predstavlja put koji vrh krila pređe u smjeru kretanja broda za vrijeme od jednog okretaja propelera. Da nema proklizavanja propelera (**slip ili skliz**) prilikom kretanja kroz vodu, kretanje bi bilo kao što je prikazano na slici.**

**Korak propelera se još nazivu i ugao nagiba krila propelera, jer zavisi od nagiba krila propelera u odnosu na osu kretanja broda.**

## Kavitacija propelera

**Kretanje vode u blizini krila propelera (zbog različitih oblika površina), odvija se kroz proces velikih promjena brzina, pritisaka.**

**U skladu sa Bernulijevom jednačinom, rast brzine uzrokuje povećanje pritiska i obrnuto.**

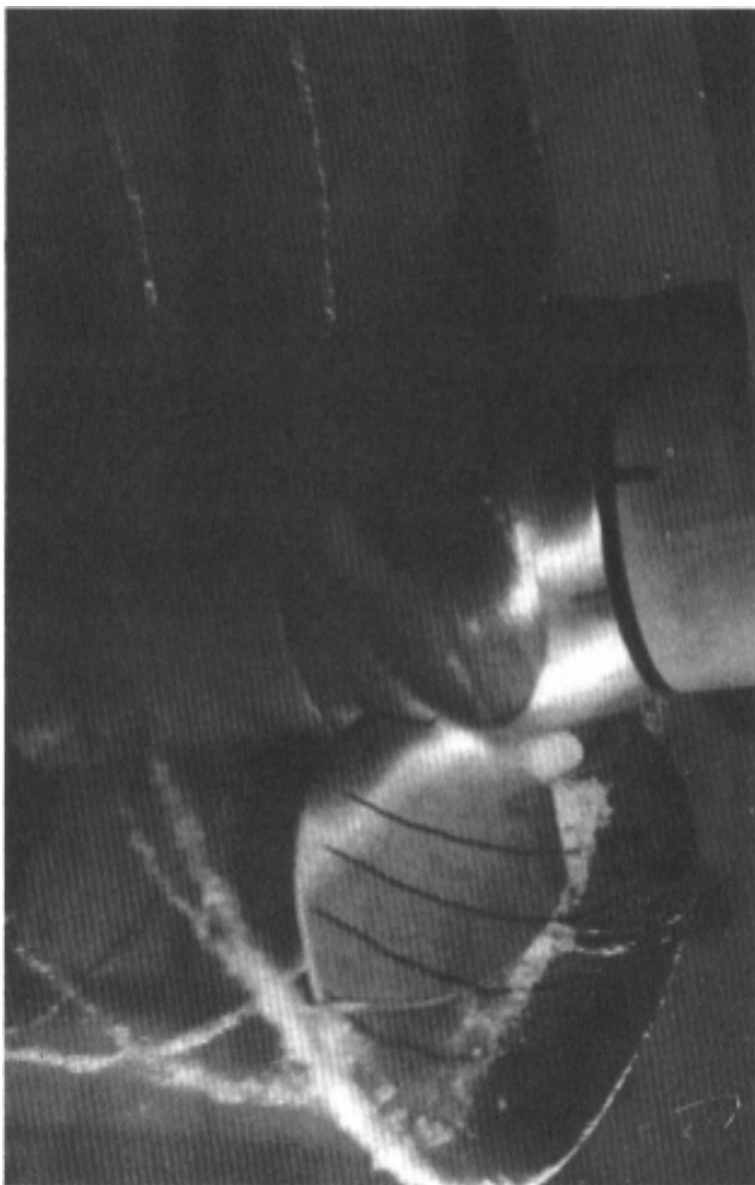
**U slučajevima kada pritisaksak u vodi padne ispod određenog pritiska, dolazi do isparavanja čestica vode (**eksplozije**), odnosno, ukoliko opet naglo 'poraste do' kavitacionog pritiska: doći će do kondenzacije čestica vodene pare (**implozije**).**

**Ova pojava poznata je kao kavitacija.**

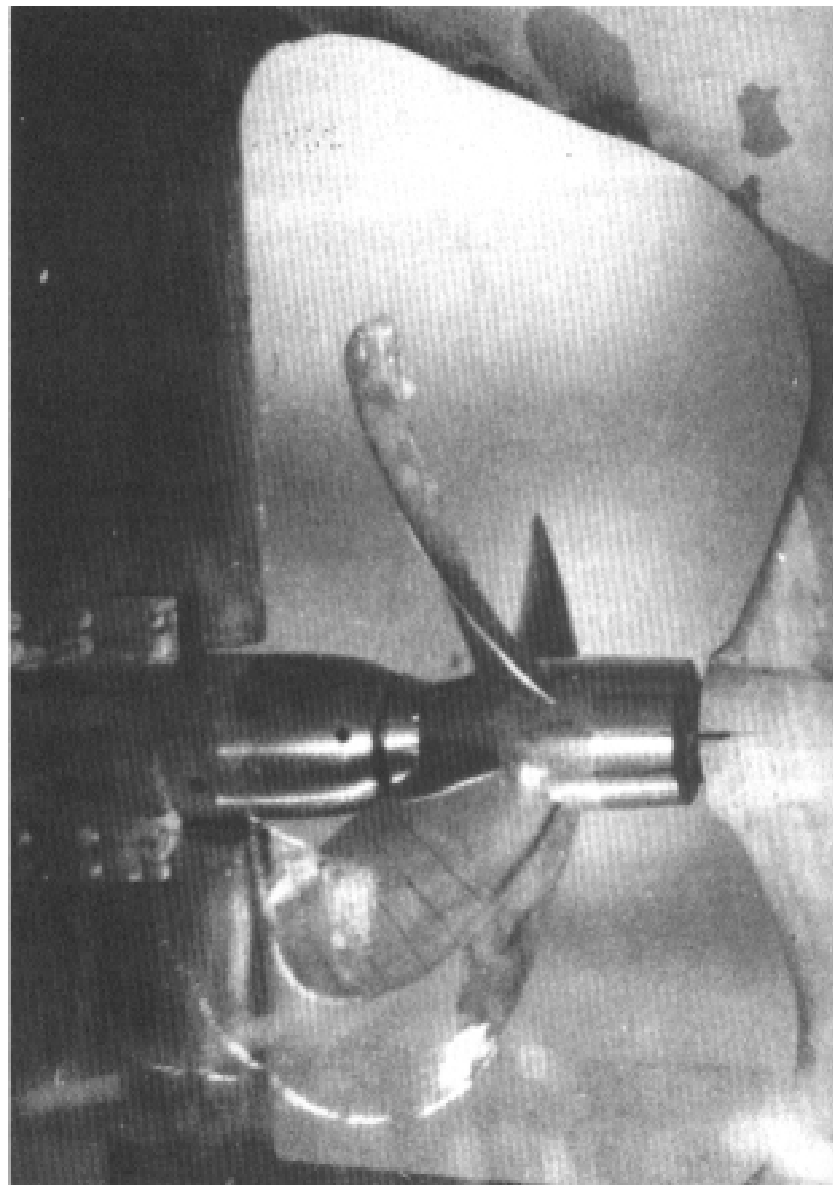
**Kavitacija u blizini površine krila propelera uzrokuje kavitacionu eroziju krila propelera.**

**Mjehurić pare koji putuje od vodene ivice ka vučenoj ivici po površini krila gdje je pritisak veći od kaviteclonog, naglo se kondezuje pri čemu nastaje **implozija** sa lokalnim usisnim - silama na površini krila propelera i do  $3000 \text{ kN/cm}^2$ .**

**Ova sila oštećuje površinu krila stvarajući neravnine i udubljenja.**



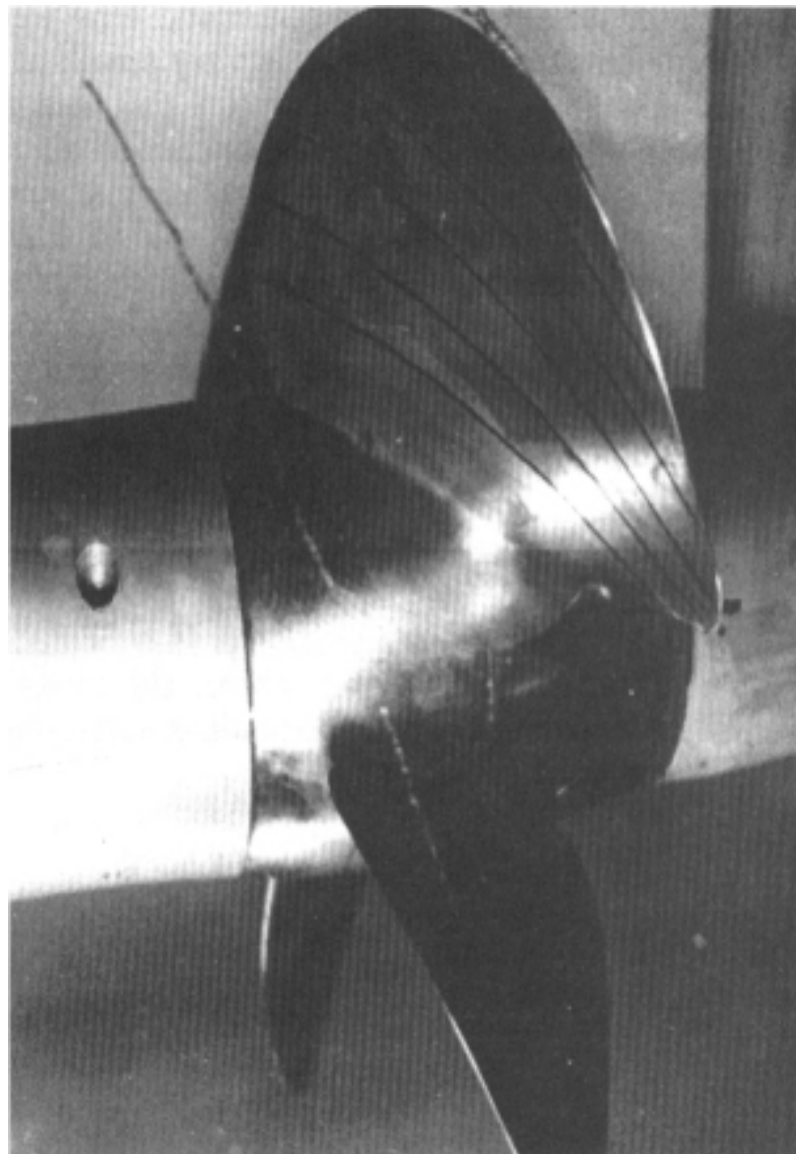
**STABILNI SLOJ Kav.**



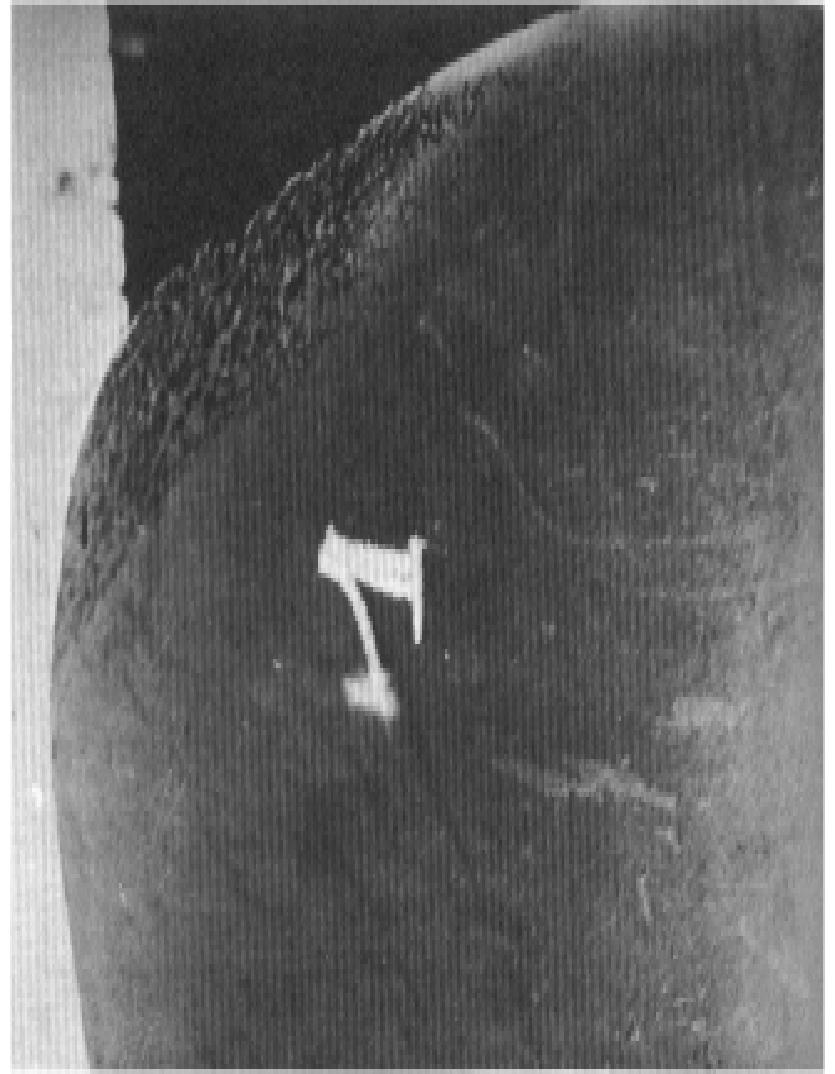
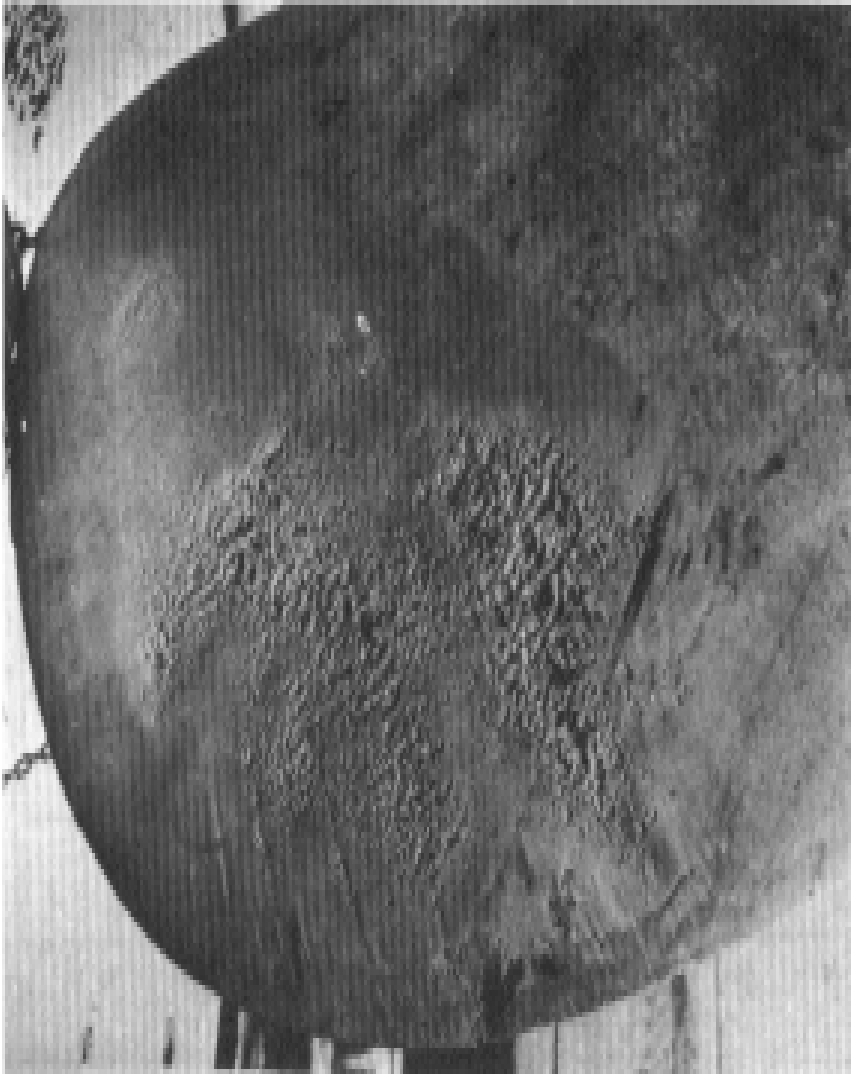
**MEJHURIČASTI SLOJ**



**NASTAJANJE.**



**VRTLOŽENJE**

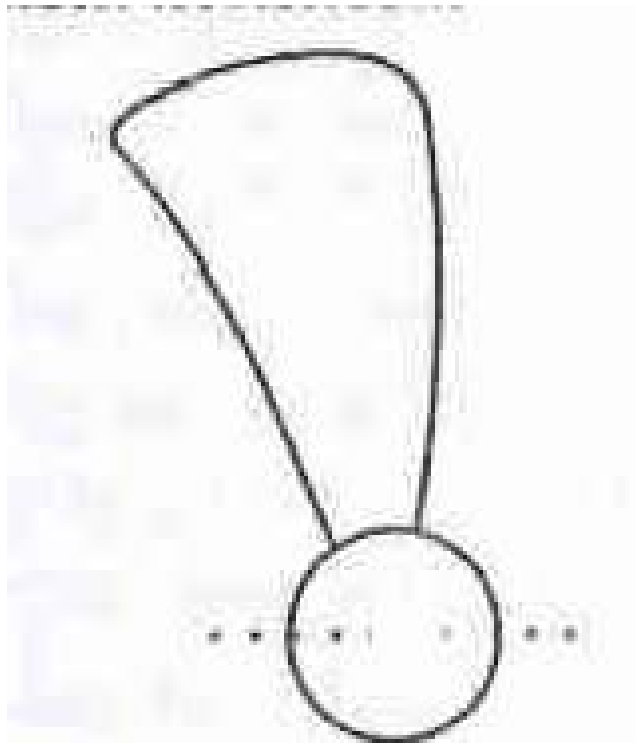


**OŠTEĆENJA LISTA PROPLELERA**

# Superkavitirujući propeleri

**Da bi se izbegao uticaj kavitacije ovi propeleri se projektuju tako da se pojava kavitacija dešava izvan površina lista propelera.**

**Zato imaju zasječak na vrhu lista.**



# Materijal za izradu propelera

**Brodski propeleri se najčešće liju od bronzе i livenog gvožđa ili čelika.**

**Propeleri od bronzе najčešće se liju od:**

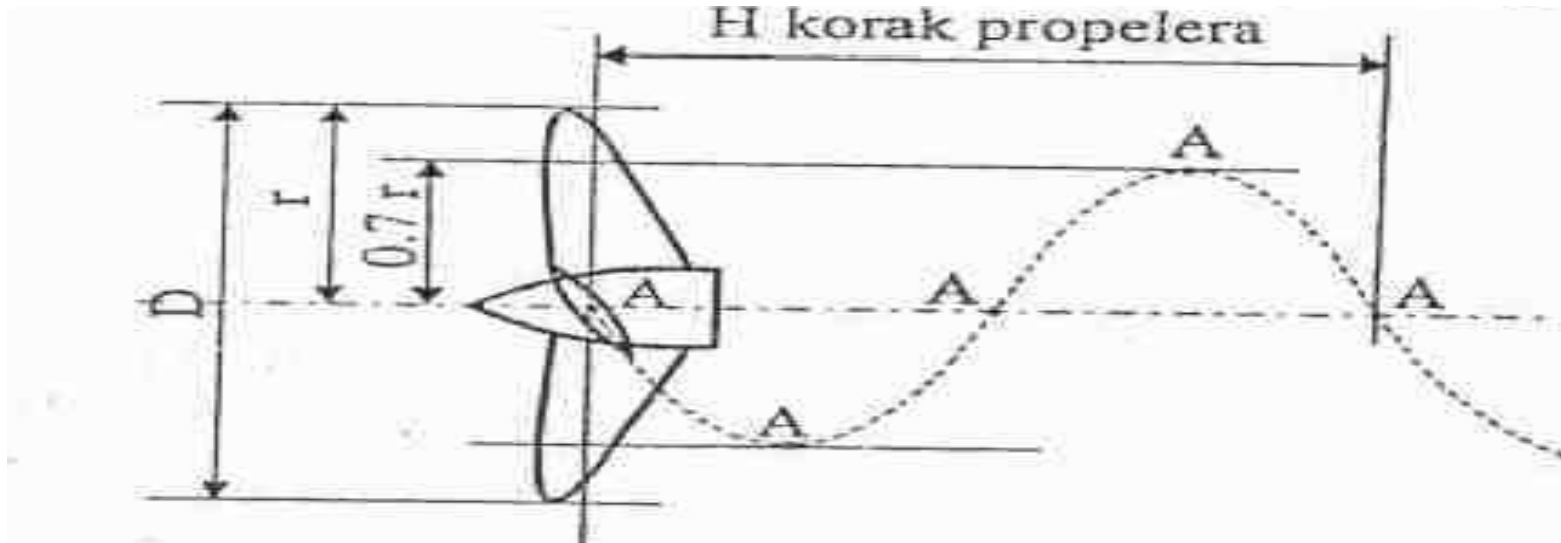
- manganske bronzе,**
- mangan-aluminijumske bronzе i**
- nikal - aluminijumske bronzе.**

**Bronza obezbjeđuje dovoljnu čvrstoću propeleru, ima veliku otpornost na površinska oštećenja i posebnim postupcima brušenja i poliranja postiže se minimalna hrapavost koja se dugo zadržava.**

# Skliz propelera i koeficijent napredovanja propelera

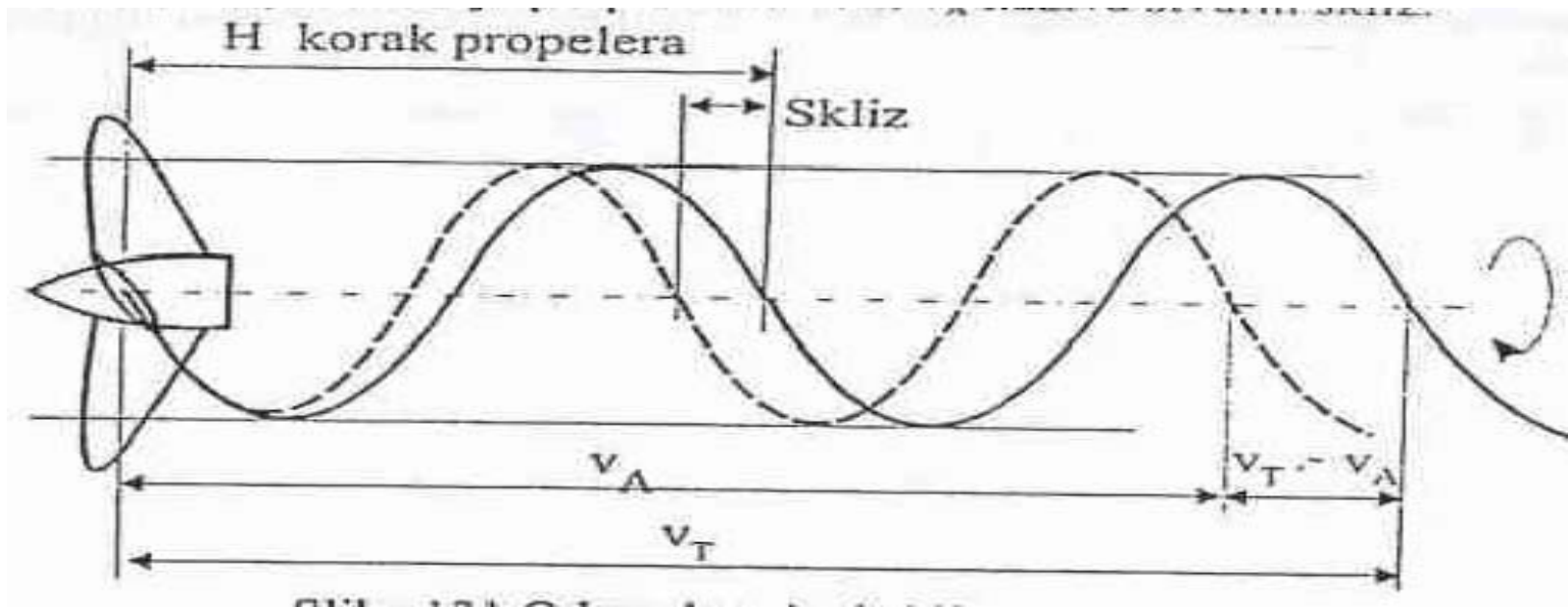
Kada bi se propeler ponašao kao vijak u matici, on bi za jedan okret prešao put od jednog svog koraka  $H$ . To znači da bi imao brzinu  $v_T = H \cdot \omega$  (m/s).

Ova brzina naziva se teorijska brzina kretanja broda i propelera.



Međutim s obzirom da se propeler kreće u fluidu on za vrijeme jednog okreta neće preći put  $l$ , nego nešto manji put  $hp$ , jer će mu i brzina biti manja.

Razlika između teorijske brzine i brzine broda naziva se prividni skliz, dok se razlike između teorijske brzine i brzine napredovanja propelera u vodi  $v_A$  naziva stvarni skliz.



**Skliz i koeficijent napredovanja propelera predstavljaju veličine koje u zbiru daju jedinicu, odnosno kad je skliz jednak nuli, koeficijent napredovanja je 1 i obrnuto.**

**Odnos između koeficijenta napredovanja i skliza prikazan je formulom;**

$$J = (1 - S) \cdot \frac{H}{D}$$

**Pitanja ?**

**HVALA NA PAŽNJI**

