

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 φ	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 β	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 rebra	$P < 0,6$: krajevi areale rebra 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.

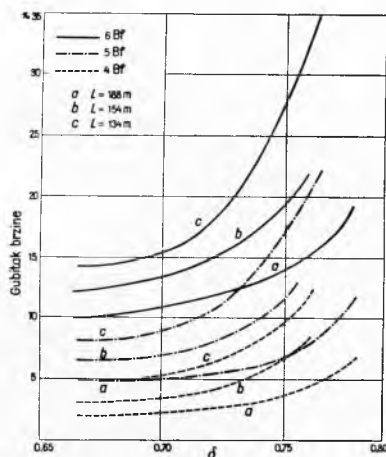
4) Za niže vrijednosti P pramac konkavan, a za više ravan.

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 oštih brodova s vrlo niskim omjerom $L/\Delta^{1/3}$.



Sl. 21. Gubitak brzine trgovačkog broda uslijed vjetrova 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 δ ne smije biti iznad 0,74 (sl. 21), a za pramčana rebra je povoljniji oblik V.

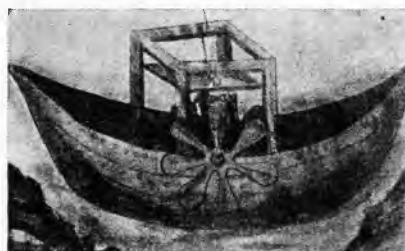
Za različite tipove brodova prikazane su u tablici 1 karakteristike oblika trupa povoljne s obzirom na otpor.

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 vjetrova 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 vjetrova ili velikog broja veslača datiraju još iz XV st. Ideja je bila da se jedra i vesla zamijene bočnim kotačima, a raznim sistemima prijenosa

da se znatno smanji muskularna snaga potrebna za okretanje kotača i time postigne ekonomičniji i efikasniji pogon broda (sl. 1). Predlagana su vrlo različita rješenja, kao npr. da bočne kotače pokreću volovi (sl. 2) ili konji, da na bokovima broda bude po nekoliko parova kotača itd. Leonardo da Vinci se je također bavio problemom mehaničkog pogona broda, pa je razradio prijenosni sistem kojim se je pravolinijsko gibanje dvaju pedala pretvaralo u rotacijsko gibanje



Sl. 2. Brod s bočnim kotačima koje pokreću volovi (oko 1527)

osovine bočnih kotača. Bilo je i pokušaja da se složenim sistemom poluga povećaju učin veslanja pa su predlagane razne konstrukcije tzv. strojeva za veslanje. Međutim, do konca XVIII st. sva ova nastojanja nisu dala nikakav praktičan rezultat jer se je pogon zasnivao samo na ljudskoj ili animalnoj muskularnoj snazi, a to je bio suviše slab i neekonomičan izvor energije da bi potisnuo pogon jedrima. Tek izum i usavršavanje parnog stroja pružio je realne mogućnosti da se pogon broda mehanizira.

Prve relativno uspjele eksperimente s parnim pogonom broda vršio je Papin još početkom XVIII st. Nakon njega više je pronalazača (J. Hulls, W. Henry, Jouffroy, P. Miller, S. Morey itd.) radilo na istom problemu, ali praktički rezultati nisu zadovoljavali. Tek početkom XIX st. parni pogon se afirmira gradnjom parobroda «Charlotte Dundas» u Engleskoj (1802) i Fultonovog «Clermonta» u USA (1807).

Prvi parobrodi su imali pogon pomoću bočnih kotača, ali se uskoro javlja i brodski vijak kao novi i prikladniji tip brodskog propulzora. Sporno je pitanje tko je prvi izumio brodski vijak. Poznato je da je još u XVII st. Hook predlagao Arhimedov vijak za pogon broda, ali se stvarnim pronalazačima brodskog vijaka mogu smatrati američki brodograditelj Stevens (1804 konstruirao mali dvovijčani parobrod), Čeh Josip Ressel (patent vijka iz 1812), engleski farmer F. P. Smith (patent vijka iz 1836) i švedski inženjer Ericsson (patent vijka iz 1836). Na morskim parobrodima brodski vijak je ubrzo istisnuo bočne kotače, a u drugoj polovini XIX st. poprimio je oblik kakav ima i danas.

Nastojanja da se pronade što bolji, efikasniji i ekonomičniji brodski propulzor dala su osim brodskog kotača i brodskog vijka i neka druga rješenja. Već u XVII i XVIII st. predlagao se reaktivni pogon broda pomoću pumpi koje izbacujući mlaz vode pokreću brod. Praktičko rješenje reaktivnog pogona broda uspjelo je sredinom XIX st. kad je u Engleskoj sagrađena topovnjača «Waterwitch» s reaktivnim pogonom na centrifugalne pumpe i s mogućnošću da se zakretanjem izlaznog dijela mlaznih cijevi usmjeruje mlaz vode u željenom smjeru. Nakon Prvog svjetskog rata nove tipove mlaznih propulzora izumili su Hotchkiss i Gill, ali ti se mlazni propulzori, kao i reaktivni pogon broda općenito, upotrebljavaju samo u specijalnim slučajevima. Između dva svjetska rata izumljena su dva tipa brodskih propulzora na vertikalnoj osovini: Kirsten-Boeingov (1925), i Voith-Schneiderov (1930) propeler. Ti propeleri mogu proizvoditi poriv u bilo kojem smjeru, čime se bitno razlikuju od ostalih vrsta brodskih propulzora.

Karakteristično je da su se teorije propulzije i teorije djelovanja brodskih propulzora razvile relativno vrlo kasno. Brodski vijak, koji je daleko najčešći tip brodskog propulzora, razvijao se je kroz dugi period vremena na osnovu čiste invencije i empirije, i tek su Rankin (1865) i W. Froude (1878) prvi dali naučne osnove teorije djelovanja brodskog vijka. U XX st. brojni naučnjaci počinju da se bave teorijom propulzije i propulzora (Lorenz, Betz, Rateau, Helmbold, Taylor, Schaffran, Lerbs, Gutsche, van Lammeren itd.), što je doprinijelo razvoju efikasnih tipova brodskih vijaka i brojnih praktičkih metoda projektiranja propulzora. U istraživanjima pojava vezanih s djelovanjem propulzora i propulzijom broda važnu ulogu su imala, i još uvijek imaju, ispitivanja modela u bazenima, strujnim kanalima i aerotunelima.

Poriv, T , jest sila kojom brodski propulzor savladava silu otpora broda. Poriv dakle djeluje u smjeru suprotnom od smjera sile otpora. Da bi se proizveo poriv, treba utrošiti snagu. Snaga otpora ili *efektivna snaga*, P_E , jest snaga koja je potrebna da se savlada otpor broda, a definirana je jednadžbom

$$P_E = R \cdot V,$$

gdje je R otpor broda a V njegova brzina.

Kočena snaga, P_B , jest snaga pogonskog stroja određena ispitivanjem na kočnici. Ova snaga služi kod izbora i narudžbe pogonskog stroja. *Indicirana snaga*, P_I , je snaga pogonskog stroja određena mjerenjem srednjeg pritiska u cilindrima. Služi za kontrolu rada stroja i proračun specifičnog potroška goriva. *Snaga na osovini*, P_S , određuje se mjerenjem pomoću torziometra, koji je smješten na osovini, obično ispred statvene cijevi. Jednaka je kočenoj snazi umanjenoj za gubitke trenja u ležajima osovine između spojke stroja i mjesta na kojem je smješten torziometar. Snaga na osovini se mjeri radi određivanja opterećenja stroja, odnosno da se utvrdi da li propeler pravilno opterećuje stroj. Definirana je izrazom:

$$P_S = Q \cdot N,$$

gdje je Q moment na osovini, a N broj okretaja osovine.

Snaga predana propeleru, P_D , jednaka je kočenoj snazi umanjenoj za sve gubitke trenja i prijenosa između propelera i spojke stroja. Ne može se direktno mjeriti, već se odredi iz P_B ili P_S pretpostavivši gubitke trenja na osovinskom vodu. Služi u proračunu propelera. Snaga poriva P_T je jednaka umnošku snage predane propeleru P_D i stepena djelovanja propelera η_P , a može se definirati i kao umnožak poriva T i brzine pritjecanja vode propeleru (V_A):

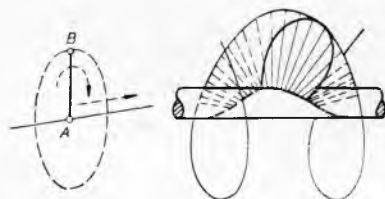
$$P_T = T \cdot V_A.$$

Služi pri proračunu i analizi rada propelera.

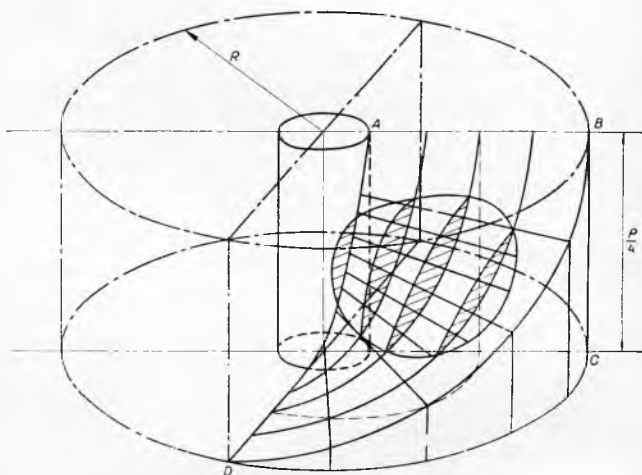
Omjer između snage otpora broda P_E i odgovarajuće snage pogonskog stroja P_B zove se *ukupni stepen propulzije*: $\eta_U = P_E/P_B$. Ukupni stepen propulzije služi kao mjerilo dobre djelovanja sistema brod + propeler.

Vijčani propeler ili brodski vijak

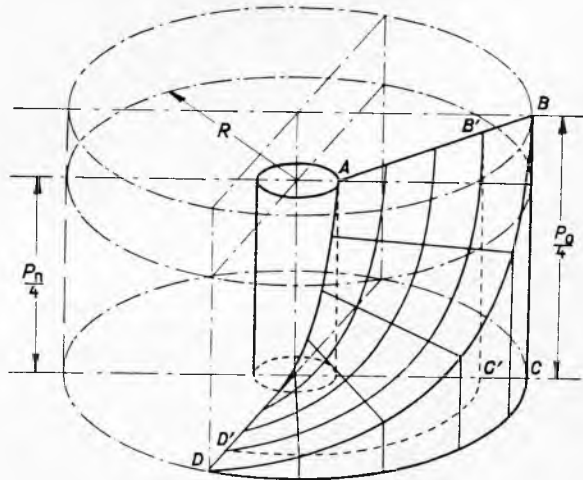
Brodski vijak je najrašireniji tip brodskog propulzora. Može imati dva do šest krila, a najčešće ima tri ili četiri krila. Konstrukcija vijka je vrlo jednostavna, trajnost mu je veća od trajnosti



Sl. 3. Nastanak vijčane površine konstantnog uspona



Sl. 4. Vijčana površina konstantnog uspona



Sl. 5. Vijčana površina promjenljivog uspona

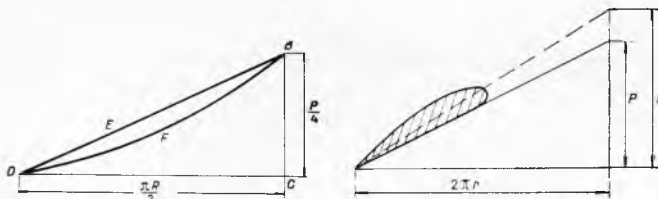
broda, troškova održavanja praktično nema, a nabavna cijena je relativno niska. Stepenn djelovanja brodskog vijka je relativno dobar, bar jednak stepenu djelovanja ostalih tipova brodskih propulzora. Zbog svih tih kvaliteta golema većina današnjih brodova ima pogon pomoću brodskog vijka.

Brodovi obično imaju jedan ili dva vijka na krmi, ali postoje i trovijčani i četervijčani brodovi. Neki specijalni tipovi brodova, kao npr. trajekti i ledolomci, osim vijka na krmi mogu imati i vučni vijak na pramcu. Takav pramčani vijak ima prvenstveno zadatak da olakša manevriranje brodom ili da sprečava gomilanje zdrobljenog leda na pramcu, a kao propulzor je tek od drugostepenog značaja.

Postoje i specijalne izvedbe brodskih vijaka kojima se u određenim specifičnim uslovima rada postiže bolji stepen propulzije i ekonomičniji pogon broda. *Vijak s prekretnim krilima* namijenjen je brodovima koji rade u vrlo promjenljivim uslovima, pa se i opterećenje vijka često i znatno mijenja. Takvi brodovi su npr. tegljači i ribarski brodovi: oni jedan dio vremena slobodno plove maksimalnom brzinom, a drugi dio vremena tegle drugi brod ili mrežu nekom vrlo malom brzinom. Prekretanjem krila takav vijak se prilagođava svakom opterećenju, što omogućava ekonomičan pogon i duži vijek trajanja pogonskog stroja. *Vijak u sapnici* je povoljniji od običnog vijka kad su opterećenja velika i brzine plovidbe male, također kad zbog ograničenog gaza broda promjer vijka mora biti manji od optimalnog. Zato vijak u sapnici naročito odgovara za tegljače i riječne brodove. *Koaksijalni kontra-rotirajući vijci* služe samo u vrlo specijalne svrhe, npr. za pogon torpeda. Koaksijalni kontra-rotirajući uređaj je suviše kompliciran, pa iako ima bolji stepen djelovanja nego odgovarajući optimalni obični vijak, za pogon brodova samo izuzetno može doći u obzir.

Geometrija brodskog vijka. Brodski vijak se sastoji od konične glavine na kojoj su postavljena okomito ili malo nagnuta krila vijka. U glavini je koničan provrt u koji dosjeda kraj propelerske osovine. Krila i glavina su većinom odliveni u jednom komadu, ali krila mogu biti izlivena zasebno pa vijcima pričvršćena na glavinu, ili su, u slučaju vijka s prekretnim krilima, preko posebnih izdanaka vezana s prekretnim mehanizmom smještenim u glavini. Kontura krila je elipsasta ili slična elipsi, a poprečni presjeci krila imaju polukružni, srpasti ili aerodinamički profil.

Strana krila koja se odupire o vodu zove se *pritisna strana* ili *lice krila*, a suprotna strana, tj. ona koja je okrenuta prema krmi broda, zove se *potpritisna* ili *naličje krila*. Lice krila je dio helikoidne površine koju opisuje pravac postavljen okomito ili koso na jednu os istovremenim jednoličnim gibanjem oko te osi i uzduž osi (sl. 3). Taj se pravac zove *izvodnica*, a njegov uzdužni pomak tokom jednog okretaja je *uspon P* krila vijka. Kad je izvodnica pravac koji zadržava uvijek isti kut prema osi oko koje rotira, uspon je jednak na svim radijusima vijčanog krila, tj. vijak je konstantnog uspona (sl. 4). Ako izvodnica tokom rotiranja mijenja kut nagiba prema uzdužnoj osi, ili ako izvodnica nije pravac već neka krivulja, uspon će na različitim radijusima biti različit, tj. vijak ima radijalno promjenljiv uspon (sl. 5). Zakrivljena ploha *BCD* na sl. 4, razvijena u ravninu, daje tzv. »trokut uspona« (sl. 6). U slučaju konstantnog uspona ili linearno promjenljivog



Sl. 6. Trokut uspona

Sl. 7. Nominalni i virtualni uspon

uspona spojnica *BD* je pravac, a ako se uspon mijenja nelinearno, ta spojnica je neka krivulja.

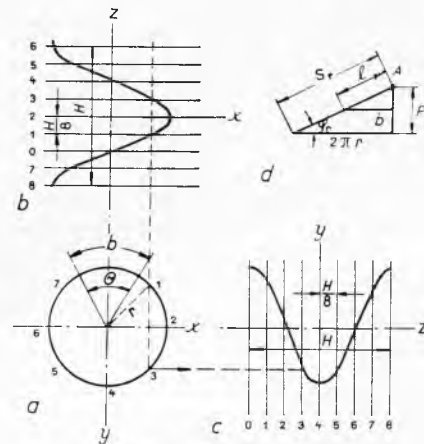
Naličje krila nije dio helikoidne površine, već mu je oblik određen potrebnom debljinom krila. Naličje krila također ima svoj uspon, pa prema tome krilo kao cjelina ima neki *virtualni uspon* P_v čija je vrijednost negdje između vrijednosti uspona lica i uspona naličja (sl. 7). Međutim, kad je riječ o usponu vijka,

uvijek se podrazumijeva uspon lica ili *nominalni uspon P*, koji ne ovisi o debljini krila, tj. o obliku krilnih presjeka; time su znatno olakšani proračun, konstrukcija i izrada vijka.

Među najvažnije geometrijske karakteristike vijka spada površina vijka. Razlikuju se: *površina diska vijka* A_0 , tj. površina kruga koji opisuju vrhovi krila vijka, *projicirana površina krila* A_P dobivena projekcijom krila vijka u ravninu okomitu na propelersku os, *razvijena površina krila* A_D dobivena zakretanjem pojedinih presjeka krila vijka u ravninu crteža, i *raširena površina krila* A_E dobivena tako da se zakrenuti, zakrivljeni cilindrički presjeci krila izravnavaju.

Karakteristične dimenzije vijka i presjeka krila obično se izražavaju bezdimenzijskim omjerima. Linearne dimenzije vijka većinom se stavljaju u omjer s promjerom vijka D , a površine vijka s površinom diska A_0 . Najvažniji omjeri linearnih dimenzija i promjera vijka jesu: *omjer uspona* P/D , *omjer srednje širine krila* l_m/D , gdje je l_m srednja dužina raširenih presjeka krila, *omjer maksimalne debljine krila* s_1/D , *omjer promjera glavine* d/D i *omjer nagiba krila* x/D (značenje pojedinih oznaka vidi se na slici 9). Omjer raširene površine krila i površine diska, nazvan *omjer površine krila* A_E/A_0 , predstavlja jedan od polaznih podataka pri konstrukciji nacrtu vijka. Osim tog omjera važni su također *omjer projicirane površine krila* A_P/A_0 i *omjer razvijene površine krila* A_D/A_0 .

Brodski vijak se prikazuje nacrtom koji se sastoji od bokocрта, nacrtu projicirane površine krila i nacrtu raširene površine



Sl. 8. Projekcija vijčane linije

krila s raširenim profilima presjeka krila. Tlocrt se crta samo u iznimnim slučajevima, kad je neophodan za tačniju konstrukciju ostalog dijela nacrtu. Konstrukcija nacrtu vijka predstavlja izvesnu poteškoću jer je u jednoj ravnini nemoguće potpuno egzaktno prikazati nepravilno zakrivljene površine krila a da pri tome nacrt bude dovoljno jasan i jednostavan za praktičnu primjenu. Danas postoji nekoliko jednostavnih metoda crtanja nacrtu vijka koje su dovoljno tačne i kojima se dobivaju jednostavni nacrti za izradu vijka i za kontrolu izrađenog vijka.

Konstrukcija nacrtu vijka zasniva se na činjenici da je pritisna strana krila dio helikoidne površine. Sistem koordinatnih osi x , y , z postavi se tako da os x bude horizontalna i okomita na uzdužnu os vijka, os y vertikalna i okomita na uzdužnu os vijka, a os z identična s uzdužnom osi vijka. Oko uzdužne osi vijka, tj. z -osi, rotira i translatorno se kreće izvodnica koja opisuje helikoidnu površinu, pa će projekcija putanje jedne određene tačke na izvodnici u ravnini xy biti kružnica (sl. 8a). Podijelivši tu kružnicu na n jednakih dijelova dobivaju se na obodu kružnice tačke međusobno razmaknute za $2\pi r/n$, odnosno položaje u kojima se nalazi izvodnica kad zarotira za kut $\theta = 360^\circ/n$. Pri toj rotaciji izvodnica se uz os z translatorno pomakne za n -ti dio uspona P , što znači da su u ravnini xz odgovarajuće tačke po vertikali jedna od druge razmaknute za P/n , a u ravnini yz horizontalni razmak tih tačaka također je P/n . Na taj se način može konstruirati vijčana linija u sve tri projekcije, kao što je prikazano na sl. 8b, c.

Ako se vijčana linija razvije u ravninu, dobiva se pravac koji je hipotenuza pravokutnog trokuta, a katete su uspon P i opseg kruga $2\pi r$ (sl. 8d). Kut uspona je prema tome

$$\operatorname{tg} \varphi = P/2\pi r, \quad (1)$$

a razvijena dužina vijčane linije S :

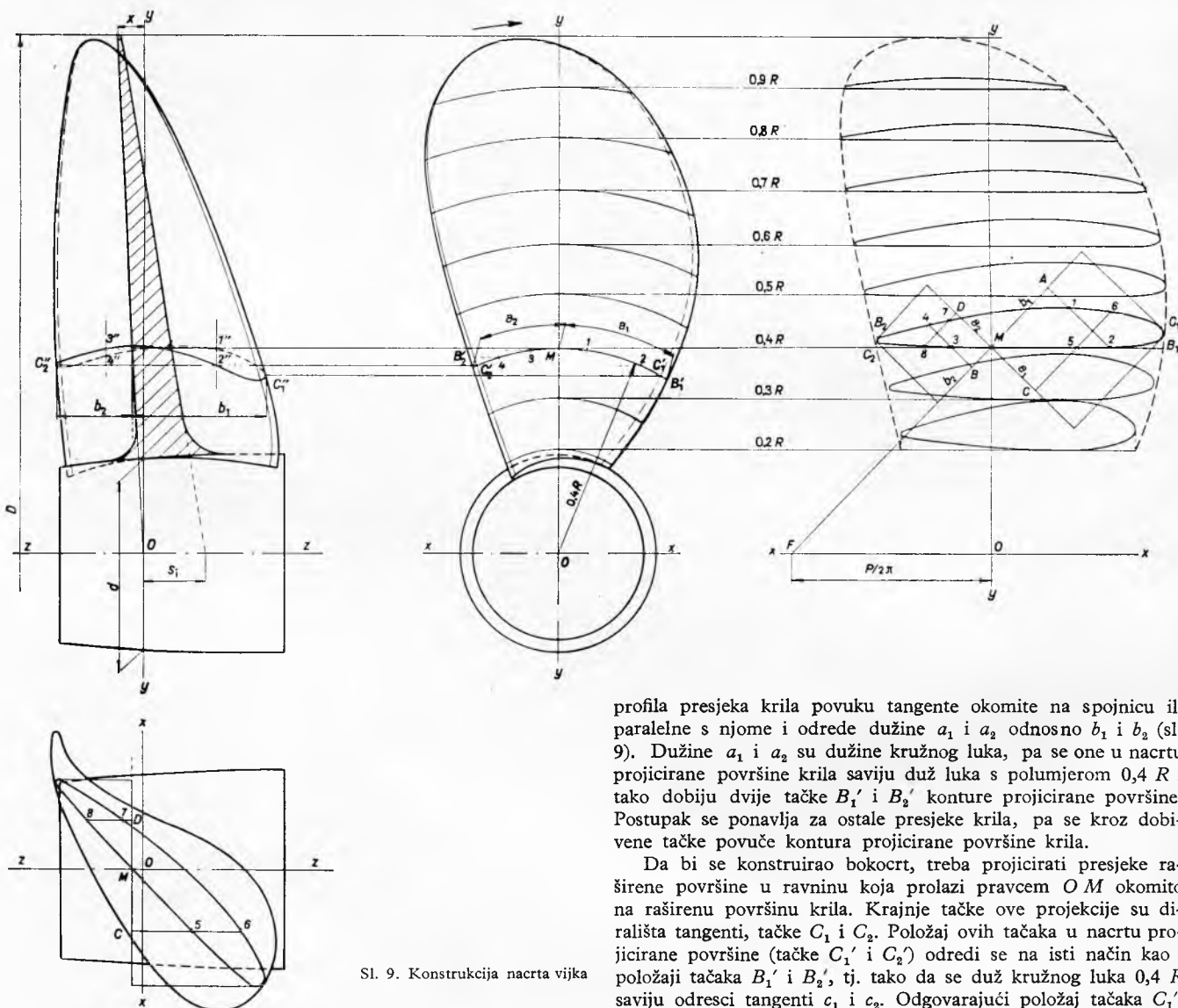
$$S_r = 2\pi r / \cos \varphi_r. \quad (2)$$

Ako se nanese u sl. 8 od tačke A dužina presjeka krila l na hipotenuzu S_r i povuče paralela s katetom $2\pi r$, dobiva se dužina projekcije kružnog luka b u ravnini xy :

$$b = l \cos \varphi_r. \quad (3)$$

U principu sve metode konstruiranja nacrt vijka polaze od iznesenog načina prikazivanja pojedinih tačaka helikoidne plohe u tri različite projekcije. Površina krila, projicirana u ravninu xy , siječe se sistemom koncentričnih cilindara kojima se os poklapa s uzdužnom osi vijka; sjecišta cilindara i projicirane površine

je i kontura raširene površine krila, pa se ona može bez teškoće nacrtati. Na raširenoj površini krila, između $0,2 R$ i R uzme se osam presjeka, međusobno razmaknutih za $0,1 R$. Ti su presjeci na raširenoj površini krila paralelni horizontalni pravci, a na projiciranoj površini krila su koncentrični lukovi. Dužine pojedinih lukova, a time i projicirana površina krila, dobivaju se kako je u nastavku opisano. U nacrtu raširene površine krila na pojedinim dijelovima radijusa konstruiraju se raširene konture profila presjeka krila, koje su poznate jer su proračunom vijka određeni debljina krila i tip profila presjeka krila. Zatim se na os x u udaljenosti $P/2\pi$ od ishodišta O nanese tačka F . Kroz tačku F i sjecišta osi y s pojedinim presjecima krila polože se pravci; npr. za presjek na $0,4 R$ taj pravac prolazi kroz tačke F i M i predstavlja položaj presjeka na $0,4 R$ s obzirom na ravninu okomitu na os vijka. Kut između FM i MO je prema (1) jednak kutu uspona φ na presjeku krila $0,4 R$. Dužina kružnog luka projicirane površine, koji odgovara dužini raširenog presjeka na $0,4 R$, dobiva se prema (3) tako da se na krajnje tačke konture



Sl. 9. Konstrukcija nacrt vijka

krila vijka u ravnini xy su koncentrični kružni lukovi. Kako je uspon svake tačke pritisne strane vijka na tim lukovima poznat, mogu se odrediti i odgovarajuće tačke u druge dvije projekcije.

Jednu od najviše upotrebljivanih, jednostavnih i tačnih metoda crtanja nacrt vijka razvio je van Lammeren. U ovoj metodi polazna osnova konstrukcije nacrt je kontura raširene površine vijka (sl. 9). Iz proračuna vijka poznat je omjer površina krila A_E/A_0 , tj. i raširena površina A_E , a za poznati tip vijka poznata

profila presjeka krila povuku tangente okomite na spojnicu ili paralelne s njome i odrede dužine a_1 i a_2 odnosno b_1 i b_2 (sl. 9). Dužine a_1 i a_2 su dužine kružnog luka, pa se one u nacrtu projicirane površine krila saviju duž luka s polumjerom $0,4 R$ i tako dobiju dvije tačke B_1' i B_2' konture projicirane površine. Postupak se ponavlja za ostale presjeka krila, pa se kroz dobivene tačke povuče kontura projicirane površine krila.

Da bi se konstruirao bokocrt, treba projicirati presjeke raširene površine u ravninu koja prolazi pravcem OM okomito na raširenu površinu krila. Krajnje tačke ove projekcije su dirališta tangenti, tačke C_1 i C_2 . Položaj ovih tačaka u nacrtu projicirane površine (tačke C_1' i C_2') odredi se na isti način kao i položaji tačaka B_1' i B_2' , tj. tako da se duž kružnog luka $0,4 R$ saviju odresci tangenti c_1 i c_2 . Odgovarajući položaj tačaka C_1'' i C_2'' u bokocrtu leži na horizontali povučenoj iz C_1' odnosno C_2' , a u udaljenosti b_1 odnosno b_2 od izvodnice vijka u nacrtu bokocrt. Istim postupkom odrede se krajnje tačke na ostalim presjecima krila, pa se tako može konstruirati kontura bokocrt krila.

Tlocrt krila je u većini slučajeva nepotreban i crta se jedino ako je posrijedi vijak sa zakretnim krilima. Način konstrukcije tlocrta vidljiv je iz sl. 9. Na istoj slici vidi se i način na koji se rašireni profil presjeka može projicirati u ostale projekcije krila.

Postupak je jednak kao kod konstruiranja konture krila prenošenjem krajnjih tačaka profila.

Teorije djelovanja vijka. Brodski vijak niti je izumljen niti se je u početku razvijao na temelju teorije. Vijak se je upotrebljavao za propulziju broda već razmjerno dugo vrijeme prije nego što su razvijene prve teorije o njegovu djelovanju. U početku se je pretpostavljalo da brodski vijak djeluje analogno običnom vijku s narezom, koji se uvrće u drvo ili maticu, samo što zbog žitkosti vode pri tom uvrćanju brzina vijka nije jednaka umnošku broja okretaja n i uspona P , kolika bi bila kad bi se uvrtao u čvrstu tvar, već manja. Tako se je došlo do pojma *skliz*. Brzina skliza je definirana kao razlika između teorijske brzine napredovanja vijka nP i brzine pritjecanja vode vijku, V_A , a skliz je izražen omjerom:

$$s = (nP - V_A)/nP = 1 - \frac{V_A}{nP}. \quad (4)$$

Skliz izražen brzinom pritjecanja vode vijku zove se *stvarni* ili *pravi skliz*. Često se umjesto brzine pritjecanja vode vijku V_A upotrebljava brzina broda V , pa se dobiva *prividni skliz*:

$$s_A = (nP - V)/nP = 1 - V/nP. \quad (5)$$

Prema prvobitnoj teoriji, stepen djelovanja vijka ovisi samo o sklizu i definiran je sa:

$$\eta_P = 1 - s. \quad (6)$$

Ovakva definicija stepena djelovanja vijka pokazala se je potpuno pogrešnom.

Početkom druge polovice XIX st. Rankin je postavio tzv. *teoriju količine gibanja* prema kojoj je djelovanje vijka ovisno o promjeni količine gibanja u okolnoj vodi. Vijak povećava pritisak vode koja protječe njegovom površinom, pa kao reakcija na to povećanje pritiska nastaje poriv jednak površini vijčanog kruga pomnoženoj s razlikom pritiska: $T = \Delta p \cdot A_0$. Sila poriva je ujedno jednaka nastaloj promjeni količine gibanja u vodi, odnosno količini protekle vode pomnoženoj s ubrzanjem vode u ravnini vijka.

Ako je V_1 brzina vode daleko ispred vijka a V_2 brzina vode daleko iza njega, ukupna je promjena brzine: $c_a = V_2 - V_1$ (sl. 10). Brzina je na samoj ravnini vijka V_A , pa je: $V_2 - V_A = c_a/2$ odnosno $V_A = V_1 + c_a/2$. Prema nastaloj promjeni količine gibanja sila poriva je jednaka

$$T = \rho Q c_a, \quad (7)$$

gdje je Q količina vode protekla u jedinici vremena kroz ravninu vijka. Kako je $Q = A_0 V_A$, može se pisati da je poriv:

$$T = \rho A_0 V_A c_a = \rho A_0 (V_A + c_a/2) c_a. \quad (8)$$

Idealni stepen djelovanja vijka, tj. kad se zanemari trenje, jednak je omjeru snage koju vijak daje, N_2 , i snage koju prima, N_1 :

$$\eta_{PI} = N_2/N_1. \quad (9)$$

Kako je:

$$N_2 = T V_1 = \rho Q c_a V_1; \quad N_1 = T V_A = \rho Q c_a V_A,$$

to se za idealni stepen djelovanja vijka dobiva:

$$\eta_{PI} = V_1/V_A = V_1 / \left(V_1 + \frac{1}{2} c_a \right) = \frac{2}{2 + c_a/V_A}. \quad (9a)$$

Prema ovom je izrazu stepen djelovanja vijka to bolji što je manji omjer između promjene brzine c_a i brzine pritjecanja vode V_1 . Stepenn djelovanja postaje jednak jedinici kad je $c_a = 0$, ali u tom slučaju prema formuli (8) vijak prestaje stvarati poriv.

Ako se poriv izrazi bezdimenzijskim koeficijentom u obliku

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V_1^2 A_0}$$

pa se za T uvrsti vrijednost iz (8), dobiva se:

$$C_t = \frac{c_a}{2 V_1} + \frac{c_a^2}{2 V_1^2}, \quad (10)$$

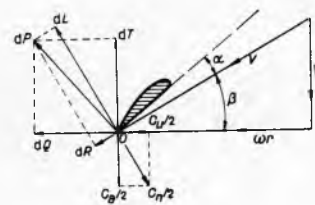
odakle proizlazi da je: $c_a/V_1 = \sqrt{C_t + 1} - 1$, što uvršteno u (9a) daje:

$$\eta_{PI} = 2/(1 + \sqrt{C_t + 1}). \quad (11)$$

To znači da stepen djelovanja vijka opada s porastom koeficijenta poriva, tj. da stepen djelovanja ovisi o opterećenju vijka i da pada s porastom opterećenja. Stepenn djelovanja bi bio jednak jedinici kad je u $C_t = 0$, ali u tom slučaju ne bi bilo ni poriva.

Teorija količine gibanja ne odnosi se samo na brodske vijke već na sve brodske propulzore općenito. Izraz (11) je u stvari gornja teorijska granica stepena djelovanja svakog propulzora koji izaziva promjenu količine gibanja u mediju u kojem djeluje. Zasluga je ove teorije što je pokazala da stepenn djelovanja vijka ovisi o njegovom opterećenju, a njen je nedostatak što ne pruža nikakve informacije o najpovoljnijem obliku vijka.

Teoriju elementa krila vijka postavio je W. Froude (1878). Prema toj teoriji ukupni poriv i ukupni moment vijka jednaki su sumi lokalnih poriva i lokalnih momenata koji nastaju na pojedinim elementima krila. Znači, za svaki pojedini element krila treba odrediti sile koje ovisi o brzini strujanja vode V , o upadnom kutu vode α i o površini elementa krila. Na sl. 11 predložene su brzine i sile na jednom krilnom elementu. Element krila na radijusu r , širine dr , dužine l , sa relativnom brzinom



Sl. 11. Sile i brzine na elementu krila vijka

strujanja vode V (koja je rezultanta brzine pritjecanja vode V_A i brzine vrtnje ωr) i upadnim kutom α ima elementarni uzgon dL sa smjerom okomitim na smjer upada vode i elementarni otpor dR u smjeru rezultantne brzine. Obje komponente dL i dR daju rezultantu dP , koja se može rastaviti na elementarni poriv dT u smjeru gibanja i elementarni moment dQ u smjeru okomitom na smjer gibanja. Integracijom dT i dQ duž radijusa vijka dobiva se poriv odnosno moment jednog krila, što pomnoženo s brojem krila daje ukupni poriv i ukupni moment vijka.

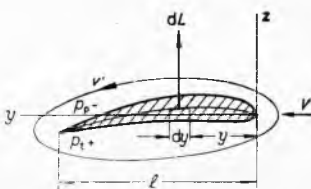
Ova teorija ne uzima u obzir promjenu brzine vode na samom krilu vijka ni utjecaj jednih elemenata krila na druge, pa se zato rješenja dobivena ovom teorijom nikad nisu slagala s rezultatima eksperimenata.

Jasnu sliku o djelovanju vijka i pouzdanu osnovu za projektiranje vijka dala je tek *cirkulacijska teorija*, koja povezuje sile na pojedinim elementima krila s promjenom impulsa u okolnoj vodi. Ova teorija je bila prvobitno razvijena za avionske elise, a kasnije je primijenjena i na brodske vijke.

Osnovne postavke cirkulacijske teorije su ove: Kad se jedan profil stavi pod nekim napadnim kutom u homogenu, jednoliku struju fluida, na pritisnoj i potpritisnoj strani profila javlja se razlika u pritiscima i brzinama strujanja pa uslijed toga nastaje uzgon. Relativno se strujanje fluida s obzirom na profil može zamijeniti jednolikim translatornim strujanjem V i cirkulacijskim strujanjem oko profila v' (sl. 12), pa je elementarni uzgon na jednom elementu krila vijka širine dx , prema teoremu Kutta-Žukovskog:

$$dL = \rho V \Gamma dx. \quad (12)$$

Cirkulacija Γ je mjera za kružno strujanje oko profila, a ma-



Sl. 12. Cirkulacija oko elementa krila vijka

tematički je definirana kao linijski integral brzine u zatvorenoj krivulji oko profila:

$$\Gamma = \oint v ds = v' \cdot 2\pi r. \quad (13)$$

Cirkulacija Γ se može proračunati, pa je time moguće odrediti i uzgon na određenom elementu krila.

Princip proračuna brodskog vijka pomoću cirkulacijske teorije zasniva se na uvjetu minimalnog gubitka energije, tj. maksimalno mogućeg stepena djelovanja vijka. Taj uvjet je ispunjen određenom raspodjelom uzgona duž krila vijka, što znači da duž krila mora postojati neka određena raspodjela cirkulacije. Ta određena raspodjela cirkulacije zahtijeva određeni oblik krila vijka. Razrađene su matematičke metode proračuna profila elemenata vijka kojima se dobiva pretpostavljena raspodjela cirkulacije, a time i optimalni stepen djelovanja vijka. Taj je proračun prilično kompliciran jer se moraju uzeti u obzir razni utjecaji koji djeluju na raspodjelu cirkulacije, kao što su: ograničena dužina krila vijka, ograničeni broj krila i njihov međusobni utjecaj, otpor profila, smanjenje pritiska uslijed centrifugalne sile, itd.

Rezultati eksperimenata s modelima vijaka potvrdili su ispravnost cirkulacijske teorije i dokazali da se za poznate uvjete rada pomoću ove teorije može pouzdano proračunati optimalni oblik krila vijka. (Detaljnije o cirkulacijskoj teoriji vidi *Mehanika fluida* i *Elisa avionska*.)

Međusobni utjecaj vijka i trupa broda. Brzina strujanja vode na krmi broda obično je manja od brzine kretanja broda. Razlog tome je širenje strujnica na krmenom dijelu broda i ubrzanje čestica tekućine u smjeru vožnje broda, izazvano trenjem između vode i brodske oplate. Razlika između brzine broda V i brzine strujanja čestica vode uz krmu V_A zove se *brzina sustrujanja* V_w .

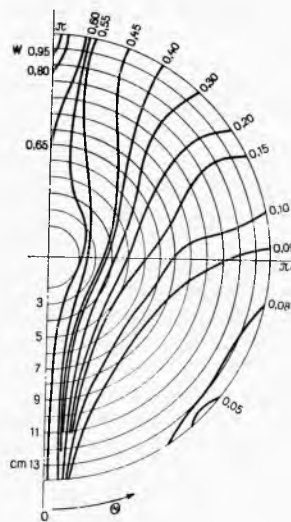
$$V_A = V - V_w. \quad (14)$$

Brzina sustrujanja se redovito izražava koeficijentom sustrujanja w :

$$w = \frac{V - V_A}{V}. \quad (15)$$

Pojavu sustrujanja izazivaju tri faktora: trenje i stvaranje graničnog sloja, nesimetričnost između potencijalnog strujanja na pramčanom i na krmenom dijelu broda i stvaranje valova na krmenom dijelu. Prema tome i koeficijent sustrujanja može se podijeliti na tri komponente: *koeficijent sustrujanja trenja*, *koeficijent potencijalnog sustrujanja* i *koeficijent sustrujanja valova*. Najvažnije je sustrujanje izazvano trenjem, a jedino kod vrlo brzih brodova sustrujanje valova može postati dominantno. Sustrujanje valova može biti pozitivno ili negativno, jer ovisi o tome da li se na krmi nalazi valni brijeg ili valni dol. Naime, ono nastaje zato što se čestice vode na grebenu vala gibaju u smjeru kretanja vala i broda, a u dolini vala obratno.

Razlikuje se *nominalno sustrujanje*, koje nastaje kad se brod kreće bez propelera (npr. sustrujanje na krmi jedrenjaka), i *efektivno sustrujanje*, na čiju brzinu utječe rad vijka mijenjajući raspodjelu pritiska na krmi. Uslijed rada vijka smanjuje se sustrujanje trenja, naročito ako je vijak jako opterećen, a potencijalno sustrujanje u blizini oplate broda znatno se povećava. Sistem valova broda superponira se sistemu valova koje stvara vijak, a kako je sustrujanje uslijed valova stvorenih vijkom uvijek negativno, to je i efektivno sustrujanje valova uvijek manje od nominalnog sustrujanja valova.



Sl. 13. Raspored sustrujanja iza krme jednovijačanog broda

Brzina V_A definirana izrazom (14), predstavlja brzinu pritjecanja vode vijku ili translatornu brzinu vijka s obzirom na okolišnu vodu. To je, u stvari, neka srednja brzina, jer je sustrujanje na površini diska vijka obodno i radijalno nejednoliko, pa je u različitim tačkama ravnine vijka lokalna brzina pritjecanja vode različita i po veličini i po smjeru. Na sl. 13 prikazan je raspored sustrujanja iza krme modela jednovijačanog broda.

Zbog obodne i radijalne nejednolikosti strujnog polja i zbog promjena smjera strujanja stalno se mijenja napadni kut na svakom elementu krila vijka, pa je po krmi broda stepen djelovanja vijka η_B različit od stepena djelovanja vijka u slobodnoj vožnji η_0 , premda su srednje brzine pritjecanja vode jednake. Razlike između načina strujanja uz jednoliku brzinu pritjecanja u slobodnoj vožnji i nejednoliku brzinu pritjecanja po krmi broda odražavaju se u koeficijentu prijelaza:

$$\eta_R = \eta_B / \eta_0. \quad (16)$$

Kod jednovijačnih brodova je nejednoliki radijalni raspored brzina takav da se najveće brzine pritjecanja vode podudaraju s mjestima najvećeg lokalnog poriva, zbog čega stepen djelovanja vijka redovito poraste kad je vijak iza krme broda. Zato za jednovijačne brodove koeficijent prijelaza η_R iznosi od 1,02 do 1,07 (kao srednja vrijednost može se uzeti 1,05), tj. stepen djelovanja vijka po krmi broda je prosječno za 5% bolji nego u slobodnoj vožnji. Za dvovijačne brodove se η_R kreće između 0,95 i 1,0, a srednja vrijednost je oko 0,97.

Brod vuče za sobom stanovitu masu vode brzinom sustrujanja. Brzina sustrujanja je neka vrsta mjerila za energiju izgublenu u zaostaloj vodi koja se povlači s brodom, jer što je veća brzina sustrujanja to je veći i otpor broda. Sa stanovišta otpora broda sustrujanje je negativna pojava, sa stanovišta propulzije ona je pozitivna. Ako je propeler smješten po krmi broda, u području najvećeg sustrujanja, djelovanje sistema brod + vijak je povoljnije nego kad bi vijak bio smješten ispred broda gdje nema sustrujanja. Ali propeler ne iskorištava svu energiju izgublenu u sustrujanju, već samo jedan dio. Prema tome, u konačnoj bilanci sustrujanje izaziva uvijek gubitak energije.

Brzina pritjecanja vode, odnosno brzina sustrujanja, jedan je od osnovnih podataka potrebnih za proračun vijka. Brzina sustrujanja se može dovoljno tačno odrediti jedino ispitivanjima modela. Postoji i velik broj približnih formula za određivanje koeficijenta sustrujanja, ali rezultate dobivene tim formulama treba smatrati grubim približenjima koja odgovaraju samo za prethodni proračun. Od približnih formula najčešće se upotrebljavaju Taylorove, prema kojima je koeficijent sustrujanja jednovijačnih brodova $w = 0,5\delta - 0,05$, a dvovijačnih brodova $w = 0,55\delta - 0,2$, gdje je δ koeficijent istisnine broda.

Ispred ravnine vijka nastaje područje niskog pritiska, koje smanjuje pritisak na krmenom dijelu broda i time povećava otpor broda. Zato sila poriva vijka nije jednaka sili otpora broda, već mora biti veća za iznos povećanja otpora izazvanog djelovanjem vijka. To povećanje otpora izražava se kao dio poriva i naziva *smanjenjem poriva*:

$$T = R_T + t T, \quad (17)$$

gdje je T poriv, R_T ukupni otpor broda, t koeficijent smanjenja poriva definiran jednačom

$$t = (T - R_T) / T. \quad (17a)$$

Smanjenje poriva, kao i sustrujanje, ovisi o mnogo faktora, pa se može dovoljno pouzdano odrediti samo ispitivanjima modela. Za približni proračun mogu poslužiti i različne približne formule, kao npr. Heckscherova:

$$\begin{aligned} \text{za jednovijačne brodove: } t &= 0,5 \varphi - 0,12, \\ \text{za dvovijačne brodove: } t &= 0,5 \varphi - 0,18, \end{aligned}$$

gdje je φ prizmatički koeficijent broda.

Smanjenje poriva uzrokuje neizbježivi gubitak energije, a za razliku od prilika kod sustrujanja, ni najmanji dio te izgubljene energije ne može se povratiti.

Propulzija broda direktno ovisi o strujanju, smanjenju poriva i stepenu djelovanja vijka, dakle o veličinama koje sa svoje strane ovisе o djelovanju sistema brod + vijak. Zbog toga su te veličine nazvane *komponentama propulzije*. Kao glavno mjerilo do-

brote djelovanja sistema brod + vijak služi *ukupni stepen propulzije* η_D koji se može definirati kao omjer snage otpora broda P_E i snage predane vijku P_D :

$$\eta_D = P_E / P_D. \quad (18)$$

Kad ne bi postojao nikakav međusobni utjecaj između trupa broda i vijka, ukupni stepen propulzije η_D bio bi jednak stepenu djelovanja vijka u slobodnoj vožnji η_o . Uslijed nejednolikog strujnog polja na krmi broda, uslijed sustrujanja i uslijed smanjenja poriva ta jednakost ne postoji, već je ukupni stepen propulzije manji ili veći od stepena djelovanja samog vijka. To je jasno vidljivo ako se jednadžba (18) transformira u oblik kojim je ukupni stepen propulzije izražen kao umnožak triju stepena djelovanja:

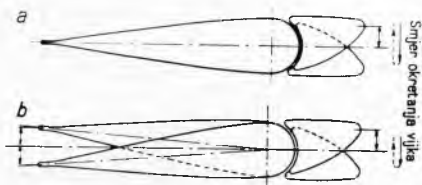
$$\eta_D = \eta_o \frac{1-t}{1-w} \cdot \frac{\eta_B}{\eta_o} = \eta_o \eta_H \eta_R. \quad (19)$$

Omjer $(1-t)/(1-w)$ pokazuje utjecaj prisutnosti trupa broda na rad vijka, pa se zato zove *stepen utjecaja trupa* η_H . Za jednovijčane brodove η_H je obično veći, a za dvovijčane manji od jedan. Koeficijent prijelaza η_R , koji odražava utjecaj nejednolikog strujnog polja na stepen djelovanja vijka, također je za jednovijčane brodove veći a za dvovijčane brodove manji od jedan, pa je zato obično za jednovijčane brodove $\eta_D > \eta_o$, a za dvovijčane $\eta_D < \eta_o$.

Optimalni koeficijent propulzije η_D postiže se smještajem vijka u područje jakog sustrujanja trenja i pozitivnog sustrujanja valova (ispod valnog grebena). Pogodnim izborom zračnosti između krila vijka i trupa broda postiže se manja nejednolikost strujanja na ravnini vijka a time i manji koeficijent smanjenog poriva.

Kormilo smješteno iza vijka može se smatrati dijelom propulzijskog uređaja. Kormilo se nalazi u vrtložnom mlazu vode te je njegovo djelovanje jednako djelovanju profila. Zbog napadnog kuta mlaza vode javlja se na kormilu jedna sila s pozitivnom komponentom u smjeru gibanja broda. Kad je forma kormila loša, ova pozitivna komponenta se poništava povećanim otporom profila kormila. Pogodan oblik i smještaj kormila može povećati koeficijent propulzije za 4...6%.

Da bi iskoristio dio inače izgubljene energije koja je sadržana u vodenom mlazu iza vijka, Rigg je 1867 konstruirao prvi fiksni kontra-propeler iza rotirajućeg vijka. Taj izum nije naišao na širu primjenu, ali su razvijeni specijalni tipovi kormila koja svojim oblikom smanjuju rotacijsko strujanje propelerskog mlaza, čime se smanjuju i gubici energije zadržane u mlazu, a povećava stepen djelovanja vijka. To su tzv. kontra-kormila koja su nesimetrična i ekscentrična s obzirom na os vijka. Postoji izvedba kod koje je nesimetrična i ekscentrična samo fiksna kormilska statva (sl. 14a) i izvedba kod koje je čitavo kormilo nesimetrično s ekscentrično postavljenim izlaznim rubom (sl. 14b). Ekscentricitet je suprotan smjeru vrtnje propelernog mlaza, najveći je u visini osi vijka a postepeno se smanjuje na nulu u visini vrhova krila.



Sl. 14. Kontra-kormilo. a simetrično kormilo s nesimetričnom i ekscentričnom kormilnom statvom, b nesimetrično kormilo s ekscentričnim izlaznim rubom

Gubici rotacije propelerskog mlaza bit će manji ako struja vode ispred vijka rotira u smjeru suprotnom smjeru vrtnje vijka. Takvo rotacijsko strujanje vode postiže se *skretnim lopaticama* postavljenim ispred vijka ili *propelerskom kontra-statvom* koja je izvedena na isti način kao i kontra-kormilo. Na dvovijčanim brodovima može se pravilnim oblikom nogavica propelerskih osovina postići isti efekt kao skretnim lopaticama ispred vijka.

Pri nižim brzinama broda stepen djelovanja vijka može se poboljšati pomoću kormila s *Costa-bulbom* (sl. 15). Costa-bulb

je simetrično strujno tijelo montirano na kormilu u visini propelerske osovine. To tijelo ujednačuje pritiske u propelerskom mlazu i time smanjuje stvaranje vrtloga. Naročito pri vožnji uzburkanim morem ovaj tip kormila djeluje povoljno na poboljšanje stepena propulzije, ali kad je brzina broda veća od 18 čv, Costa-bulb nema više nikakvog efekta.



Sl. 15. Costa-bulb

Oblik krmenog dijela broda utječe na režim strujanja vode u području vijka, a to znači da utječe i na komponente propulzije. Mnogobrojna ispitivanja propulzije jednovijčanih brodskih modela pokazuju da su u krmenom dijelu broda rebra umjerene V-forme nešto povoljnija pri višim brzinama i višim brojevima okretaja vijka, a rebra U-forme pri nižim brojevima okretaja vijka. Ekstremna V-forma krmenih rebara je pri svim brzinama nepovoljna, dok ekstremna U-forma rebara u području nižih relativnih brzina $V/\sqrt{L} < 0,7$ omogućava bar jednako dobar stepen propulzije kao i normalne forme krme.

Ispitivanje modela brodskih vijaka. Danas još ne postoje pouzdane čisto matematičke metode za određivanje radnih karakteristika vijka, komponenti propulzije i međusobnog utjecaja vijka i trupa broda. Zato se rezultati matematičkih proračuna provjeravaju pokusima s modelima vijaka, jer jedino ispitivanja modela daju dovoljno pouzdane podatke. U stvari, sve metode projektiranja brodskih vijaka zasnivaju se na rezultatima sistematskih ispitivanja modela određenih tipova vijaka ili na rezultatima eksperimenata s profilima.

Postoje tri osnovna tipa ispitivanja modela brodskih vijaka: 1. ispitivanje modela vijka u slobodnoj vožnji, tj. ispitivanje samog vijka bez trupa broda; 2. ispitivanje vlastitog pogona modela broda (autopropulzija), tj. ispitivanje sistema: trup broda + vijak; 3. ispitivanje modela vijka u kavitacijskom tunelu. Ispitivanjem vijka u slobodnoj vožnji određuju se radne karakteristike vijka (poriv, moment, stepen djelovanja) u homogenom strujnom polju. Pokus vlastitog pogona daje podatke o radu vijka iza trupa broda, pa se iz rezultata tog pokusa i ispitivanja modela vijka u slobodnoj vožnji mogu odrediti komponente propulzije. Ispitivanjima u kavitacijskom tunelu proučavaju se pojave kavitacije i određuje se pri kojim uvjetima i na koji način neki vijak počinje kavitirati.

Pri ispitivanju modela treba zadovoljiti uvjete geometrijske i kinematičke sličnosti vijka (odnosno broda) u naravnoj veličini i njegovog modela. Uvjet geometrijske sličnosti je zadovoljen ako su omjeri linearnih dimenzija vijka (ili broda) u naravi i linearnih dimenzija modela uvijek isti, i to jednaki mjerilu modela λ . Kinematička sličnost postoji ako je omjer homolognih brzina na modelu i brodu konstantan. To znači da omjeri između brzine pritjecanja vode i obodne brzine vijka moraju na modelu i brodu biti jednaki.

Označivši indeksom m vrijednosti koje se odnose na model, može se taj uvjet kinematičke sličnosti formulirati ovako:

$$\begin{aligned} (V_A)_m / V_A &= \pi n_m D_m / \pi n D = n_m D_m / n D, \\ (V_A)_m / n_m D_m &= V_A / n D = J, \end{aligned} \quad (20)$$

gdje je n broj okretaja vijka, D promjer vijka, V_A brzina pritjecanja vode vijku.

Omjer J zove se koeficijent brzine, a može se izraziti i pomoću skliza:

$$J = \frac{V_A}{n D} = \frac{V_A}{n P} \frac{P}{D} = (1-s)(P/D), \quad (21)$$

što znači da su za jednake koeficijente brzine J i sklizovi jednaki.

Pri ispitivanju modela vijka u slobodnoj vožnji mjeri se poriv, moment i broj okretaja vijka uz poznatu brzinu pritjecanja vode, pa se izmjerene vrijednosti prikazuju bezdimenzijskim konstan-

tama, koje su u stvari uvjeti sličnosti, te su jednake za model i vijak u naravnoj veličini. Konstanta poriva je:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad (22)$$

a konstanta momenta:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}. \quad (23)$$

Stepen djelovanja vijka u slobodnoj vožnji proračuna se iz poriva i momenta na ovaj način:

$$\eta_0 = \frac{T V_A}{Q \cdot 2 \pi n} = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{V_A}{n D} \cdot \frac{1}{2 \pi} = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2 \pi}. \quad (24)$$

Rezultati ispitivanja modela vijka u slobodnoj vožnji grafički se predložuju dijagramom u kojem su krivulje koeficijenta poriva K_T , koeficijenta momenta K_Q i stepena djelovanja vijka η_0 nanesene kao funkcije koeficijenta brzine J odnosno skliza s (sl. 16).

Obično se pri ispitivanju u slobodnoj vožnji nastoji zadovoljiti samo opći Newtonov zakon sličnosti, prema kojemu je:

$$\frac{(V_A)_m}{n_m} = \frac{V_A}{n} \cdot \frac{1}{\lambda}, \quad (25)$$

jer se može pretpostaviti da konstante K_T i K_Q ne ovise o Froudeovu ni o Reynoldsovu kriteriju sličnosti. To znači da se brzina

pritjecanja vode vijku V_A i broj okretaja vijka n mogu odabrati po volji, a jedini je uvjet da bude zadovoljen uvjet jednakosti njihova kvocijenta prema izrazu (25).

Ako se uzme u obzir da zbog blizine slobodne površine vode vijak može stvarati valove, treba zadovoljiti i Froudeov kriterij sličnosti, koji je u slučaju brodskog vijka definiran ovako:

$$Fr = \frac{\pi n_m D_m}{\sqrt{g D_m}} = \frac{\pi n D}{\sqrt{g D}}. \quad (26)$$

Iz tog kriterija sličnosti proizlazi da omjer brojeva okretaja stvarnog vijka i njegovog modela mora biti jednak drugom korijenu iz mjerila modela:

$$n_m \sqrt{D_m} = n \sqrt{D} \text{ ili } \frac{n_m}{n} = \sqrt{D/D_m} = \sqrt{\lambda}. \quad (27)$$

Uvrstivši ovu vrijednost u jednadžbu (25), dobiva se da i omjer brzina pritjecanja vode vijku mora biti jednak recipročnoj vrijednosti drugog korijena iz mjerila:

$$\frac{(V_A)_m}{n \sqrt{\lambda}} = \frac{V_A}{n} \cdot \frac{1}{\lambda} \text{ ili } \frac{(V_A)_m}{V_A} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}. \quad (28)$$

Prema Reynoldsovu zakonu, sličnost u pogledu trenja na vijku i njegovom modelu postojat će ako je omjer sila trenja i inercijskih sila jednak za stvarni vijak i za njegov geometrijski slični model. Taj uvjet je izražen jednakošću Reynoldsovih brojeva Re vijka i modela. U slučaju brodskog vijka postoji nekoliko definicija Reynoldsova broja jer različni autori uzimaju različite brzine i različite linearne dimenzije kao karakteristične. Najčešće se uzimaju ove dvije definicije Reynoldsova broja za brodski vijak:

prema Gutscheu:

$$Re = \frac{n D^2}{\nu} \cdot \frac{l_m}{D}, \quad (29)$$

prema Kempfu:

$$Re = \frac{l_{0,7} \sqrt{V_A^2 + U^2}}{\nu}, \quad (30)$$

gdje je l_m srednja dužina raširenih presjeka krila, $l_{0,7}$ dužina krilnog presjeka na 0,7 radijusa vijka, U obodna brzina na 0,7 radijusa vijka, ν koeficijent kinematičkog viskoziteta tekućine.

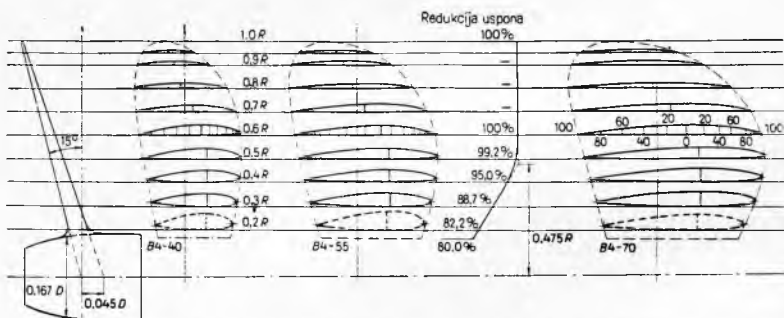
Iz jednadžbe (29) može se izvesti omjer između brojeva okretaja modela i stvarnog vijka, kojim je zadovoljen Reynoldsov kriterij sličnosti:

$$\frac{n_m}{n} = \frac{v_m}{v} \lambda^{\frac{3}{2}}. \quad (31)$$

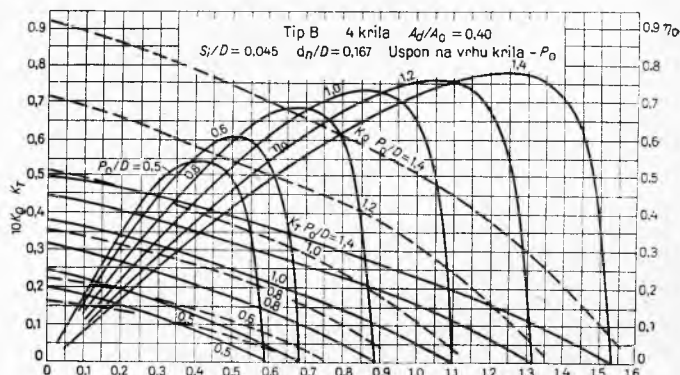
Koeficijent kinematičkog viskoziteta tekućine je praktički isti za model i za stvarni vijak, tj. $v_m \approx v$, pa je očito da se ne može istovremeno zadovoljiti Reynoldsov kriterij sličnosti prema (31) i Froudeov kriterij sličnosti prema (27). Kad se ispituje vijak u slobodnoj vožnji, redovno se zanemaruje Froudeov uvjet sličnosti, jer gravitacijske sile nisu od presudnog značaja, a broj okretaja modela vijka se odabere tako da bude veći od jednog kritičnog Reynoldsova broja, pa se za taj broj okretaja iz izraza (25) odredi brzina pritjecanja vode modelu vijka tako da bude zadovoljen Newtonov uvjet sličnosti. Nemogućnost da se istovremeno zadovolje svi uvjeti sličnosti ima za posljedicu manju ili veću grešku u ekstrapoliranim rezultatima ispitivanja modela (utjecaj mjerila). Kako utjecaj mjerila najviše zavisi od mjerila modela i broja okretaja, važno je da Reynoldsov broj modela vijka bude veći od $5 \cdot 10^5$. To je kritična granica iznad koje je strujanje duž krila modela turbulentno, pa je utjecaj mjerila manji, a rezultati su mjerenja konsistentni i reproducibilni.

Sistematska ispitivanja serija modela vijaka. Danas se brodski vijci uglavnom projektiraju pomoću tzv. serijskih dijagrama, razrađenih na osnovu rezultata ispitivanja serija vijaka u slobodnoj vožnji. Serije modela vijaka su dobivene sistematskim mijenjanjem omjera uspona P/D , broja krila z , omjera krilnih površina A_D/A_0 , oblika konture krila i profila krilnih presjeka. Rezultati ispitivanja u slobodnoj vožnji serije modela vijaka prikazuju se grafički na različite načine, tako da se za poznate ili zadane vrijednosti mogu očitati ili proračunati karakteristike vijka i njegov stepen djelovanja.

U najpoznatije serijske dijagrame za projektiranje brodskih vijaka spadaju Schaffranovi, Taylorovi, Troostovi i Gawnovi dijagrami. Za projektiranje vijaka trgovačkih brodova vrlo često se upotrebljavaju Troostovi dijagrami tzv. B-serije brodskih vijaka, jer se je taj tip vijka pokazao vrlo efikasnim. Ti su dijagrami razrađeni za 2-, 3-, 4- i 5-krilne brodske vijke. Na sl. 17 prikazan je oblik 4-krilnih vijaka Troostove B-serije omjera



Sl. 17. Generalni plan 4-krilnih vijaka omjera $A_D/A_0 = 0,40; 0,55$ i $0,70$ Troostove B-serije



krilnih površina $A_D/A_0 = 0,40, 0,55$ i $0,70$, a na sl. 18 rezultati ispitivanja modela tih vijaka, omjera $A_D/A_0 = 0,40$.

Ispitivanje vlastitog pogona modela broda služi prvenstveno za to da se odredi ukupni stepen propulzije sistema brod + vijak, a zatim da se dobiju podaci o pojedinim komponentama propulzije i o djelovanju propelera iza trupa broda. Rezultati ispitivanja vlastitog pogona modela broda omogućavaju da se korigiraju karakteristike vijaka ukoliko vijak pri određenim okretajima ne apsorbira određenu snagu i da se za raspoloživu snagu pogonskog stroja i odgovarajući broj okretaja predvidi brzina stvarnog broda na pokusnoj vožnji i u uvjetima službe.

Kako se ispitivanja izvode s kombinacijom modela trupa broda i modela vijka, ne može se zanemariti Froudeov kriterij sličnosti kao pri ispitivanju samog modela vijka u slobodnoj vožnji. S druge strane je nužno da se ispitivanja vrše iznad kritičnog Reynoldsova broja za model vijka, jer je inače utjecaj mjerila znatan i rezultati su nepouzdati. Zato se za ispitivanja vlastitog pogona modela broda brzina modela i broj okretaja vijka odrede prema Froudeovim uvjetima sličnosti, definiranim u jednadžbama (27) i (28), a mjerilo modela se odabere tako da i uz tu brzinu i taj broj okretaja Reynoldsov broj modela vijka bude veći od $5 \cdot 10^6$.

Postoje dvije metode izvođenja pokusa vlastitog pogona modela: kontinentalna i engleska. Po kontinentalnoj se metodi model broda ispituje pri više različitih brzina, uzimajući u obzir da je specifični otpor trenja modela relativno veći nego stvarnog broda. Da bi se specifični otpori trenja broda i njegova modela izjednačili, otpor modela se smanjuje dodatnom vanjskom silom koja je jednaka izračunatoj razlici u otporu trenja (korekturi trenja). Prednost je kontinentalne metode ispitivanja vlastitog pogona modela broda da se sve izmjerene vrijednosti, kao brzina modela, poriv, moment i broj okretaja modela vijka, mogu jednostavno preračunati na vrijednosti koje odgovaraju za stvarni brod, a time se mogu odrediti i krivulje snage i broja okretaja pogonskog stroja broda u ovisnosti o brzini broda. Rezultati ispitivanja modela preračunavaju se za uvjete stvarnog broda tako da se moment modela vijka pomnoži sa λ^4 , poriv modela pomnoži sa λ^3 , broj okretaja modela vijka podijeli sa $\sqrt{\lambda}$, a brzina pomnoži sa $\sqrt{\lambda}$, gdje je λ mjerilo modela.

Po engleskoj metodi autopropulzije brzina modela broda je stalno ista (obično brzina koja odgovara brzini broda u službi), a mijenja se opterećenje modela vijka dodavanjem poznate vanjske sile, koja povećava ili smanjuje ukupni otpor modela. Takvim načinom ispitivanja dobiva se jasan uvid u to kako se uz neku konstantnu brzinu broda mijenja broj okretaja i stepen djelovanja vijka kad se uslijed promjene otpora broda mijenja opterećenje vijka. Danas se obično ispitivanja modela provode na oba načina: za jedno šire područje brzina model se ispita po kontinentalnoj metodi, a za brzinu u službi se pokus ponovi i po engleskoj metodi.

Rezultati ispitivanja autopropulzije modela, preračunati za stvarni brod, važe za idealne uvjete bazena, pa njima još treba dodati dodatke zbog hrapavosti brodske oplate, povećanja otpora broda na uzburkanom moru, otpora zraka i vjetra kao i zbog pada stepena djelovanja vijka uslijed povećanog opterećenja vijka. Dodaci na izračunatu snagu pogonskog stroja ovise o tipu broda, načinu gradnje broda (zakivana ili zavarena konstrukcija) i o području u kojem će brod ploviti. To su iskustveni dodaci koji uključuju i greške izazvane utjecajem mjerila i tehnikom ispitivanja modela, pa zato nisu jedinstveni, već razni instituti za ispitivanja brodskih modela imaju različite, svoje vlastite dodatke.

Izračunati broj okretaja brodskog vijka treba također korigirati zbog utjecaja mjerila i zato što je stvarni vijak relativno jače opterećen nego njegov model. Ta je korektura također iskustvena, pa je razni instituti provode na različit način.

Na osnovu rezultata ispitivanja vlastitog pogona modela broda može se za ispitano područje brzina razraditi dijagram u kojem su snaga stroja i broj okretaja vijka predloženi kao funkcije brzine. Takav se dijagram zove *dijagram predskazanih podataka*, a predložen je na sl. 19. Obično se na tom dijagramu nanese odvojeno krivulje snage i brojeva okretaja za uslove bazena (A) i krivulje snage sa svim dodacima za uslove pokusnih vožnja (B), odnosno

uslove službe, kao i krivulje broja okretaja za te uslove, ispravljene za utjecaj mjerila i veće opterećenje stvarnog vijka (C).

Iz rezultata ispitivanja vlastitog pogona modela broda i ispitivanja modela vijka u slobodnoj vožnji mogu se odrediti komponente propulzije. Prema uvjetima sličnosti proizlazi da je konstanta poriva K_T uz jednake koeficijente brzine J jednaka za vijak u slobodnoj vožnji i vijak koji radi iza trupa broda.

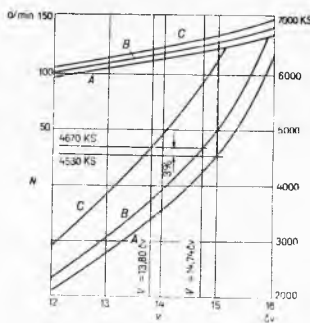
To znači da je uz jednaki broj okretaja i jednaki poriv vijka i brzina pritjecanja vode vijku jednaka. Prema tome, ako se sa vrijednostima poriva i broja okretaja vijka izmjerenim pri pokusu vlastitog pogona modela broda izračuna konstanta poriva K_T , može se na K_T -krivulji određenoj ispitivanjem vijka u slobodnoj vožnji očitati odgovarajuća vrijednost koeficijenta brzine J , pa se množenjem sa ND dobiva brzina pritjecanja vode vijku, V_A . Kako je brzina modela broda V poznata, može se prema formuli (15) odrediti koeficijent sustrujanja w .

Koeficijent smanjenog poriva t odredi se prema formuli (17 a) time što se uvrsti izmjerena vrijednost poriva modela T i vrijednost ukupnog otpora R_T koja je dobivena ispitivanjem otpora modela broda. Stepent djelovanja modela vijka iza trupa broda η_B odredi se prema formuli (24) pa se uz poznati stepent djelovanja modela vijka u slobodnoj vožnji η_0 može pomoću izraza (19) izračunati ukupni stepent propulzije η_D . Jednako kao snaga i broj okretaja vijka, i komponente propulzije proračunate na osnovu rezultata ispitivanja modela podložne su utjecaju mjerila, pa se i one korigiraju različnim iskustvenim metodama.

Kavitacija i zujanje vijka. Kavitacijom se naziva pojava stvaranja mjehura ili praznih prostora na krilu vijka. U struji tekućine kavitacija nastaje kad u pojedinim tačkama strujnog polja pritisak padne ispod pritiska isparavanja tekućine, uslijed čega tekućina na tim mjestima prelazi u paru i time poremeti homogenost strujanja. Prema Bernoullijevom zakonu ta se mjesta najnižeg pritiska poklapaju s mjestima najveće brzine strujanja.

Na brodskom vijku nastaje kavitacija na mjestima gdje dolazi do naglog porasta brzine strujanja tekućine. Poremećaj strujanja oko krila vijka, izazvan kavitacijom, virtualno mijenja svojstva profila krila, uslijed čega se povećava broj okretaja vijka, a smanjuje poriv, moment i stepent djelovanja vijka, pa je za istu brzinu broda potrebna veća snaga pogonskog stroja.

Osim nepovoljnog utjecaja na stepent djelovanja vijka, kavitacija može imati za posljedicu i erozijsko razaranje materijala vijka. Mehanizam tog razaranja još nije potpuno razjašnjen i postoji nekoliko teorija o djelovanju kavitacijske erozije. Prema nekim teorijama primarni razlog erozijskog razaranja materijala vijka su mehanički udari koji nastaju uslijed kolapsa kavitacijskih mjehura na krilu vijka. Druge teorije uzimaju kao primarne uzroke mehaničko-kemijska, elektrokemijska ili termoelektrična djelovanja izazvana pulzirajućim promjenama veličine kavitacijskih mjehura ili njihovim kolapsom. Eksperimentima je utvrđeno da kavitacijska erozija nastaje i na materijalima kao što su staklo, bakelit itd., kod kojih je isključeno elektrokemijsko ili termoelektrično djelovanje. Zato je najvjerojatnija pretpostavka da je uzrok početnog oštećenja umornost materijala izazvana velikim lokalnim pritiscima koji nastaju smanjivanjem kavitacijskog mjehura na krilu vijka. Nakon tog početnog oštećenja izazvanog mehaničkim djelovanjem kavitacije može doći i do kemijske, elektrokemijske ili termoelektričke korozije, već prema tome od kakvog je materijala izrađen vijak. Erozijska i korozijska razaranja se međusobno isprepleću i mogu biti različitog intenziteta. Proces može biti vrlo brz, pa već nakon svega desetak sati rada krila kavitirajućeg vijka postanu toliko izjedena da se slome, a proces može teći i vrlo sporo, pa vijak izdrži i nekoliko godina prije nego se mora zamijeniti novim. U svakom slučaju erozijsko nagrizanje



Sl. 19. Dijagram predskazanih podataka (prognosti dijagram)

površine krila vijka povećava otpor trenja vijka i time smanjuje njegov stepen djelovanja.

Kao posljedica kavitacije mogu nastati *vibracije vijka*. Stalne oscilacije pritisa i brzina duž krila izazvane kavitacijom dovode do vibracija čitavog vijka. Te se vibracije mogu prenijeti i na krmeni dio broskog trupa i uzrokovati lom krila vijka, skrokova ili propellerske osovine.

Razlikuje se nekoliko oblika kavitacije broskog vijka. Tipovi *stacionarne kavitacije* su plošna kavitacija i vrtložna kavitacija. *Plošna kavitacija* izgleda kao srebrnasta ploha, a nastaje na krilima s tankim i ostrim profilima kad se kut pritjecanja vode razlikuje od ulaznog kuta profila. U izvjesnim slučajevima plošna kavitacija može čak i povećati uzgon krila, jer korigira male netačnosti profila. *Vrtložna kavitacija* je posljedica smanjenog pritiska u središtu vrtloga, a javlja se na vrhu krila, gdje se odljepljuje vršni vrtlog, i na vrhu glavine vijka.

Stacionarna kavitacija nije naročito opasna. Ona ne izaziva vibracije vijka i erozija koju izaziva je minimalna ili je i nema, jer je kavitacijska šupljina odijeljena od površine krila tankim slojem tekućine pa ne dolazi do kolapsa kavitacijskih mjehura na samom krilu vijka.

Nestacionarna kavitacija broskog vijka također ima dva oblika: mjehurasti i pjenasti. *Mjehurasta kavitacija* nastaje na krilima s debelim i tupim profilima u slučaju sudarnog pritjecanja vode. Nagli pad pritiska izaziva kavitaciju, ali ne i odljepljenje kavitacijskog sloja i strujnica od krila vijka kao kod plošne kavitacije, pa su kavitacijski mjehuri u direktnom dodiru s površinom krila. Kavitacijska zona se sastoji od brojnih mjehura koji nisu stabilni, već stalno mijenjaju veličinu, nastaju i iščezavaju, izazivajući neprekidne promjene pritisa i brzina, što ima za posljedicu eroziju, a eventualno i vibracije vijka.

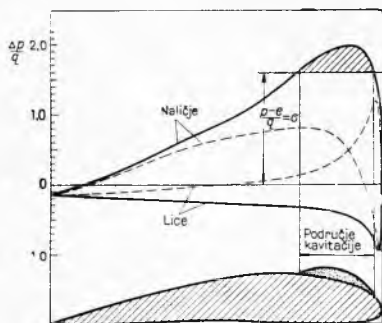
Pjenasta kavitacija je najštetniji i najopasniji tip kavitacije. Nastaje iza područja plošne ili mjehuraste kavitacije ako zona kavitacije više ne slijedi konturu profila. Sastoji se od oblaka sitnih kavitacijskih mjehurića. Može u vrlo kratkom roku razoriti materijal krila, a osim toga znatno smanjuje stepen djelovanja vijka jer vijak više ne radi u homogenoj tekućini već u razrijeđenoj smjesi zasićene pare, zraka i tekućine.

Od primarne je važnosti da se pri projektiranju broskog vijka odaberu takvi profili krila uz koje neće doći do pojave kavitacije. Kao osnovni kriterij kavitacije služi *kavitacijski broj* σ definiran jednadžbom:

$$\sigma = \frac{p - e}{q}, \quad (32)$$

gdje je p statički pritisak na mjestu vijka, jednak sumi atmosferskog pritiska i hidrostatskog pritiska, e pritisak pri kojem voda na danoj temperaturi počinje ključati, $q = \frac{1}{2} \rho V^2$ dinamički pritisak na vijku.

Na sl. 20 prikazan je raspored pritisa oko profila krila pri pozitivnom i negativnom upadnom kutu vode. Ako je p statički



Sl. 20. Raspored pritisa oko profila krila

pritisak u vodi daleko od vijka, a pritisak na nekom mjestu krila vijka p_a , kavitacija će nastati na tom mjestu ako je:

$$\frac{p - p_a}{q} = \frac{\Delta p}{q} > \sigma.$$

Prema tome, profile krila treba izabrati tako da pritisak duž

krila vijka nigdje ne padne ispod ravnotežnog pritiska pare, što znači da treba izbjeći sudarno pritjecanje vode i nagle promjene brzina i pritisa duž krila. To često zahtijeva duge i tanke profile krila, tj. široka krila vijka i veliki omjer krilnih površina A_D/A_0 . Na osnovu brojnih ispitivanja modela vijka razrađeni su razni približni kriteriji za veličinu površine krila vijka koja je potrebna da se izbjegne pojava kavitacije. Prema van Lammerenu za sprečavanje kavitacije potrebno je da projicirana površina krila vijka bude najmanje

$$(A_P)_{\min} = \frac{T}{1,84 (p - e)^{0,76} V_A^{0,8}}. \quad (33)$$

Ovakve približne formule nisu u svima slučajevima dovoljno pouzdane, naročito kad su posrijedi jako opterećeni vijci i vijci s vrlo velikim brojem okretaja. Mnogo tačnije rezultate daju ispitivanja modela u *kavitacijskom tunelu*. Kavitacijski tunel je posebni uređaj u kojem se može po volji mijenjati pritisak i brzina strujanja vode i promatrati pojava i razvoj kavitacije na krilima modela vijka.

Da bi takva ispitivanja na modelu vijka pružila vjernu sliku razvoja i tipa kavitacije, potrebno je zadovoljiti uvjete geometrijske, kinematičke i dinamičke sličnosti. Geometrijska sličnost je zadovoljena konstantnim omjerom λ linearnih dimenzija stvarnog vijka i njegovog modela. Kinematička sličnost postoji ako je zadovoljen odnos brzina i brojeva okretaja prema jednadžbi (25). Za dinamičku sličnost mora biti zadovoljen Froudeov uvjet prema izrazu (28) i Reynoldsov uvjet:

$$(V_A)_m/V_A = \lambda.$$

Za dinamičku sličnost treba postojati i jednakost kavitacijskog broja σ za model i za stvarni vijak, jer je taj broj u stvari kriterij sličnosti raspodjele pritisa na krilu vijka.

Na pojavu kavitacije izvjestan utjecaj ima i napetost površine tekućine, pa bi za potpunu sličnost kavitacijskih mjehura trebalo zadovoljiti i Weberov zakon, prema kojem će slične kavitacijske šupljine nastati na stvarnom vijku i na njegovom modelu ako je u oba slučaja jednak tzv. Weberov broj We :

$$We = V_A \frac{D}{\kappa}, \quad (34)$$

gdje je D promjer vijka, κ kinematički kapilaritet, koji je jednak omjeru površinske napetosti k i gustoće tekućine ρ . Iz izraza (34) proizlazi da bi brzine pritjecanja vode modelu i stvarnom vijku trebalo da stoje u omjeru:

$$(V_A)_m/V_A = \sqrt{\frac{\kappa_m}{\kappa}} \cdot \sqrt{\lambda}. \quad (35)$$

Može se pretpostaviti da je kinematički kapilaritet za uvjete modela jednak kinematičkom kapilaritetu za uvjete rada stvarnog vijka: $\kappa_m \approx \kappa$, pa se Weberov kriterij sličnosti može pisati:

$$(V_A)_m/V_A = \sqrt{\lambda}. \quad (35 a)$$

Očito je da se pri ispitivanju na modelu vijka u kavitacijskom tunelu ne može istovremeno zadovoljiti svih navedenih pet uvjeta sličnosti. Zato se, osim geometrijske sličnosti, zadovoljava samo uvjet kinematičke sličnosti, tj. jednakost koeficijenta brzine J i jednakost kavitacijskog broja σ . Froudeov uvjet sličnosti se potpuno zanemaruje, a Reynoldsov broj za model se odabere dovoljno velik da bude osigurano turbulentno strujanje na čitavom krilu modela. Weberov uvjet sličnosti ne može se nikako zadovoljiti, ali to nema znatnijeg utjecaja jer sile kapilariteta postaju važne samo u slučaju vanredno intenzivne kavitacije, kakva se praktički nikad ne javlja na brodskim vijcima.

Zbog nemogućnosti da se ispune svi uvjeti sličnosti, rezultati ispitivanja modela u kavitacijskom tunelu su podložni utjecaju mjerila. Ipak kvalitativna slika dobivena tim ispitivanjima dovoljno je tačna za to da se odrede tip, intenzitet i mjesta na kojima nastaje kavitacija. Na osnovu toga mogu se izvršiti korekture profila krila potrebne da se kavitacija potpuno izbjegne ili, ako su uvjeti rada vijka takvi da je kavitacija neizbježna, bar da se svede na najmanju moguću mjeru i da se izbjegnu tipovi kavitacije koji izazivaju jaku eroziju materijala vijka.

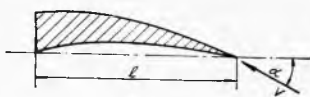
Za neke tipove brodova, kao što su brzi čamci, hidrokrilni brodovi, razarači, brzi putnički brodovi, itd., kavitacija vijka može predstavljati glavnu zapreku za postizanje većih brzina. Vijci takvih brodova rade pri niskim kavitacijskim brojevima ($\sigma = 0,2 \dots 0,8$) pa, bez obzira na raspoloživu snagu, uslijed kavitacije ne mogu razviti poriv iznad neke granice, a osim toga, zbog erozijskog djelovanja kavitacije, te vijke treba često zamjenjivati novima.

U novije vrijeme se ovakvi slučajevi rješavaju *superkavitirajućim vijcima*. To su vijci koji rade pri vrlo niskim kavitacijskim brojevima, $\sigma < 0,05$, pa je krilo potpuno pokriveno kavitacijskim oblakom. Ti vijci moraju imati vrlo visok broj okretaja (čak do 10 000 o/min), poriv im je veći, a stepen djelovanja bolji nego običnog vijka koji radi u istim uvjetima i intenzivno kavitira. Velika je prednost superkavitirajućeg vijka što na njemu ne dolazi do kavitacijske erozije, jer kolaps kavitacijskih mjehura nastaje tek iza krila vijka, a ne na samom krilu.

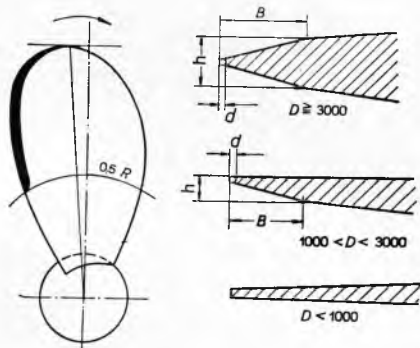
Superkavitirajući vijak ima profile presjeka krila znatno različite od profila krila običnog vijka. Umjesto oštrog izlaznog dijela, superkavitirajući profili su na izlazu potpuno tupi, kao da im je kraj odrezan. Na sl. 21 prikazan je Tulinov profil krila superkavitirajućeg vijka.

Ponekad u određenim područjima brojeva okretaja brodski vijak počinje stvarati vrlo jake šumove. Ta se pojava naziva *zujanje vijka* i do sada još nije dovoljno istraжена ni objašnjena. Najvjerojatnija je pretpostavka da je zujanje vijka izazvano vibracijama krila vijka koje nastaju uslijed oscilacija tačke u kojoj se otkidaju strujnice na izlaznom dijelu krila. U rjeđim slučajevima zujanje vijka može uzrokovati prskotine na izlaznom bridu krila. Ipak u principu se ta pojava ne smatra naročito opasnom za vijak ili brod, već samo vrlo neugodnom za putnike i posadu. Uslijed zujanja vijka život na brodu može postati gotovo nesnosan, pa ukoliko zujanje nastaje baš pri radnim okretajima vijka, treba poduzeti mjere da se otkloni.

Zujanje vijka se najefikasnije i najjednostavnije sprečava time da se izlazni brid gornjeg dijela krila vijka izbruši kako je prikazano na sl. 22. Tako izbrušeni izlazni brid krila prisiljava strujnice i



Sl. 21. Tulinov profil krila superkavitirajućeg vijka



Sl. 22. Izvedba ruba krila vijka za sprečavanje zujanja

vrtnog da se nešto ranije otkinu od krila, i to uvijek na oštrom ivici gdje počinje izbrušeni rub, pa ne dolazi do osciliranja tačke otkidanja strujnica ni do vibracija krila.

Čvrstoća brodskog vijka. Tanki profili krila vijka imaju bolji stepen djelovanja i manje su podložni pojavi kavitacije nego debeli profili. To znači da je sa hidrodinamičkog stanovišta to povoljnije što su krila vijka tanja. S druge strane, krila vijka moraju imati neku određenu čvrstoću, tj. i neku određenu debljinu, kako bi mogla izdržati opterećenja izazvana hidrodinamičkim silama i centrifugalnom silom a da se ne deformiraju ili polome.

Za sada ne postoji egzaktna metoda proračuna čvrstoće brodskog vijka, već samo približni računski postupci. Opterećenja krila su vrlo komplicirana, oblik krila je takav da neutralna os nije ravna nego zakrivljena, naponi nisu proporcionalni udalje-

nosti od neutralne osi, pa sve to onemogućava da se sa današnjim znanjem problem postavi i riješi matematički potpuno ispravno.

Postojeći načini proračuna čvrstoće vijka zasniavaju se na principu elementarne teorije grede. Pokušaji da se teorija čvrstoće ljske primijeni na krila vijka do sada još nisu dali metodu proračuna koja bi bila primjenljiva u praksi.

Starije metode proračuna čvrstoće krila vijka, kao što je npr. Taylorova, pretpostavljaju linearnu raspodjelu poriva duž krila, a time i linearno smanjenje debljine krila od korijena prema vrhu. Proračun se svodi samo na kontrolu kritičnog presjeka na korijenu krila (na mjestu gdje krilo prelazi u glavinu), jer ako debljina krila linearno opada prema vrhu krila, onda prema teoriji grede ni na jednom drugom presjeku ne mogu nastati veći naponi. Kasnije je Romson uveo proračun napona u dva različita presjeka, i to presjeka na $0,2 R$ (na korijenu krila) i presjeka na $0,6 R$. Ova metoda polazi od pretpostavke da je u slučaju linearne raspodjele debljine krila presjek na $0,6 R$ predimenzioniran. Proračunom se odredi potrebna debljina tog presjeka, pa čitavo krilo vijka postaje tanje, jer raspodjela debljine krila više nije linearna. Najnovije metode proračuna čvrstoće brodskog vijka polaze od principa jednake čvrstoće krila. To znači da treba izračunati napone u većem broju presjeka krila, pa presjeke dimenzionirati tako da radijalna raspodjela napona izazvanih opterećenjem krila bude što jednoličnija, tj. da nijedan presjek ne bude deblji nego što je nužno s obzirom na potrebnu čvrstoću. Time se dobivaju tanja krila, manja težina vijka i manji moment tromosti, bolji stepen djelovanja vijka i manja osjetljivost na kavitaciju.

Krilo vijka je opterećeno momentom tangencijalne sile, silom poriva i centrifugalnom silom. Ako se debljina krila vijka dimenzionira samo na osnovu proračuna napona u presjeku $0,2 R$, uzima se da moment tangencijalne sile za čitav vijak iznosi:

$$M_Q = \frac{V_A T}{\omega \eta_0}, \quad (36)$$

gdje je ω kutna brzina vijka, η_0 stepen djelovanja vijka. Moment uslijed sile poriva je

$$M_T = \int_r^R r \frac{dT}{dr} dr, \quad (37)$$

a približno se može uzeti da je

$$M_T \approx T \cdot 0,68 R. \quad (37a)$$

Centrifugalna sila iznosi:

$$C = \frac{U^2 G}{r_G g}, \quad (38)$$

gdje je U obodna brzina vijka, G težina krila vijka, r_G radijus na kome se nalazi težište krila vijka, g ubrzanje sile teže.

Momenti tangencijalne sile i poriva izazivaju složena naprezanja krila. Ako se ti momenti proračunaju za smjer glavnih osi presjeka na $0,2 R$, dobiva se (sl. 23):

$$M_1 = M_Q \sin \varphi + M_T \cos \varphi, \quad (39)$$

$$M_2 = M_T \sin \varphi - M_Q \cos \varphi, \quad (40)$$

gdje je φ kut uspona na presjeku $0,2 R$. Prema sl. 23 moment M_1 izaziva vlačni napon u tački C , a tlačni napon u tački D ; moment M_2 izaziva vlačni napon u tački A , a tlačni u tački B .

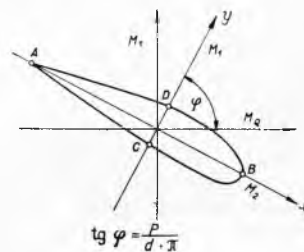
Za ukupni napon treba uzeti u obzir i djelovanje centrifugalne sile. Ako krila vijka stoje okomito na glavinu, centrifugalna sila izaziva samo dodatni vlačni napon, koji je jednak:

$$\sigma_C = C/A, \quad (41)$$

gdje je C centrifugalna sila prema jednačbi (38), A površina presjeka. Ako krilo vijka stoji koso, onda pored vlačne sile djeluje i moment centrifugalne sile:

$$M_C = C \cdot e. \quad (42)$$

(e je aksijalna komponenta poluge centrifugalne sile, jednaka



Sl. 23. Naprezanja na presjeku krila $0,2 R$

aksijalnoj udaljenosti težišta krila od sjecišta glavnih osi presjeka krila na 0,2 R .) Taj moment izaziva dodatni tlačni napon u tački D , sl. 23, i dodatni vlačni napon u tački C .

Prema tome je ukupni vlačni napon:

$$\sigma_v = \frac{M_1 s_1}{I_x} + \frac{M_2 s}{I_y} + \frac{C}{A} + \frac{M_c s_1}{I_x}, \quad (43)$$

a ukupni tlačni napon:

$$\sigma_t = \frac{M_1 s_2}{I_x} + \frac{M_2 s_4}{I_y} - \frac{C}{A} + \frac{M_c s_2}{I_x}, \quad (44)$$

gdje su I_x i I_y momenti tromosti profila s obzirom na os x odnosno y , a s_1 , s_2 , s_3 i s_4 su dužine $\overline{OC}$, $\overline{OD}$, $\overline{OA}$ odn. $\overline{OB}$ na sl. 23, pri čemu je O ishodište koordinatnog sistema.

Uvrštavajući odgovarajuće vrijednosti u jednadžbe (43) i (44) kontroliraju se naponi u presjeku na korijenu vijka, pa ukoliko proračun pokaže da se napon znatno razlikuje od dopuštenog, debljina profila se mijenja i čitav postupak ponavlja tako dugo dok se ne dođe do debljine profila uz koju će napon biti jednak dopuštenom ili nešto malo manji od njega.

Iz tablice 1 se vidi da su dopušteni naponi bar deset puta manji od maksimalnog napona koji može izdržati materijal. Tako veliki koeficijent sigurnosti uzima se iz ovih razloga:

1. Sve metode proračuna čvrstoće vijka pretpostavljaju konstantno statičko opterećenje krila, što je pogrešno. Brzina i smjer protjecanja vode u ravni vijka nisu jednoliki, već su u različitim tačkama različiti. Zbog toga se tokom jednog okretaja stalno mijenja poriv, a time i opterećenje krila, pa stvarno dinamičko opterećenje u pojedinim momentima znatno prelazi pretpostavljeno statičko opterećenje. Kod jednovijčanih brodova je veća nejednakost brzine strujanja vode u ravni vijka nego kod dvovijčanih brodova, pa su i fluktuacije opterećenja krila vijka kod jednovijčanih brodova veće. Zato je dopušteni napon materijala vijka jednovijčanih brodova niži nego vijka dvovijčanih.

2. Uslijed stalnih fluktuacija opterećenja dolazi do umornosti materijala krila, pa se i čvrstoća materijala smanjuje.

3. Svaki put kad se mijenja smjer vrtnje vijka i uopće kad se naglo mijenja broj okretaja vijka, višestruko poraste opterećenje krila vijka. Izvanredna dinamička opterećenja nastaju i kad vijak zapne o kakav ploveći objekt.

Tablica 1
KARAKTERISTIKE MATERIJALA ZA IZRADU BRODSKIH VIJAKA

<i>Materijal</i>	<i>Vlačna čvrstoća kp/cm²</i>	<i>Istezanje %</i>	<i>Dopušteni napon kp/cm²</i>	<i>Otpornost korozivnom djelovanju morske vode</i>	<i>P r i m j e d b e</i>
Ljeveno željezo	1800...2600	0	193...270 (vlačno)	nikakva	Ne može se popravljati; $\rho = 7600 \text{ kg/m}^3$; krila 30 do 35% deblja nego krila vijka od bronce
Grafitni čelik	~ 4000	normalno 2...7, napušteni čelik 10...15	260...280	nikakva	Nodularno ljeveno željezo; praktički se ne može popravljati; $\rho = 7600 \text{ kg/m}^3$; krila deblja 25...30% nego krila vijka od bronce
Manganska bronca	4000...5500	18...22	457...492	dobra	Vrlo glatka površina; mogućnost popravka; $\rho = 8100 \text{ kg/m}^3$, ponekad mogu nastati poteškoće zbog izlučivanja cinka
Cunial bronca	6500	18	492...527	vrlo dobra	Cu-Ni-Al-legura; $\rho = 7650 \text{ kg/m}^3$; 12...20% uštede težine u poređenju s manganskom bronom zbog manje specifične mase i tanjih krila vijka
Ljeveni čelik	5000...5800	18	457...492	mala	Prilično hrapava površina; $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$; proračunate debljine krila treba povećati za 10% zbog opasnosti korozije
Novostone-bronca	6400	22	~ 500	vrlo dobra	Legura Cu-Mn-Al-Ni; $\rho = 7500 \text{ kg/m}^3$; ušteda težine u poređenju s manganskom bronom 12...20% zbog manje specifične mase i tanjih krila vijka
Nikalium-bronca	6600	18	~ 500	vrlo dobra	$\rho = 7650 \text{ kg/m}^3$; 12...20% uštede težine u poređenju s manganskom bronom zbog manje specifične mase i tanjih krila vijka
Nerdajući čelik	~ 7000	25	~ 500	vrlo dobra	Može se postići vrlo glatka površina; $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$; teško se lijeva; vrlo otporan prema koroziji

Više vrijednosti dopuštenog napona vrijede za dvovijčane a niže za jednovijčane brodove

Na tom principu se zasnivaju sve praktične metode proračuna čvrstoće vijaka kojim se kontrolira samo debljina presjeka krila na glavini, a raspodjela debljine duž krila uzima da linearno opada od glavine do vrha krila. Takve metode obično pretpostavljaju da su dopuštena i neka pojednostavnjenja računskog postupka, odnosno daju grafikone iz kojih se mogu očitati neke vrijednosti, čime proračun postaje brži i jednostavniji.

Moderne metode proračuna čvrstoće broskog vijka određuju naprezanja u većem broju presjeka krila. Pomoću cirkulacijske teorije vijka mogu se iz raspodjele cirkulacije oko krila vijka za svaki presjek krila proračunati poriv i tangencijalna sila, a time i moment savijanja, pa na osnovu toga profili tako dimenzionirani da u svima presjecima ekstremni naponi budu jednaki. I kod ovih metoda se upotrebljavaju dijagrami i tablice s nekim već unaprijed izračunatim vrijednostima, što znatno skraćuje inače dugotrajni računski postupak.

Debljina krila, a time i radne karakteristike vijka, ne ovise samo o veličini opterećenja krila, već i o materijalu od kojeg je izrađen vijak. Što je veći dopušteni napon za neki materijal, to je krilo vijka tanje. U tablici 1 prikazane su karakteristike materijala koji se upotrebljavaju za izradu broskih vijaka.

Zbog svih ovih faktora potreban je veliki koeficijent sigurnosti pri određivanju debljine krila vijka i dopušteni naponi s kojima se danas računa čvrstoća vijka u stvari su samo rezultat dugogodišnjeg iskustva projektanata broskih vijaka.

Izbor karakteristika vijka. Glavne karakteristike vijka jesu: broj krila, promjer vijka, uspon krila, omjer površina krila, kontura krila i oblik profila presjeka krila.

Zadatak projektanta je da odredi karakteristike vijka tako da pri zadanom broju okretaja vijak apsorbira određenu snagu i proizvodi poriv potreban da se brod kreće određenom brzinom.

Sve metode proračuna broskog vijka polaze od već unaprijed odabranog broja krila vijka. Od broja krila zavisi promjer vijka, stepen djelovanja, svojstva vijka s obzirom na kavitaciju i vibracije. Za iste radne uvjete manji broj krila vijka znači veći promjer vijka, niži broj okretaja, veći stepen djelovanja, veću površinu krila pa time i manju opasnost od kavitacije, veću opasnost od vibracija izazvanih radom vijka. To u principu znači da je manji broj krila vijka povoljniji za dobar rad i stepen djelovanja vijka, ali obično postoji više razloga koji za neki konkretan slučaj zahtijevaju veći broj krila.

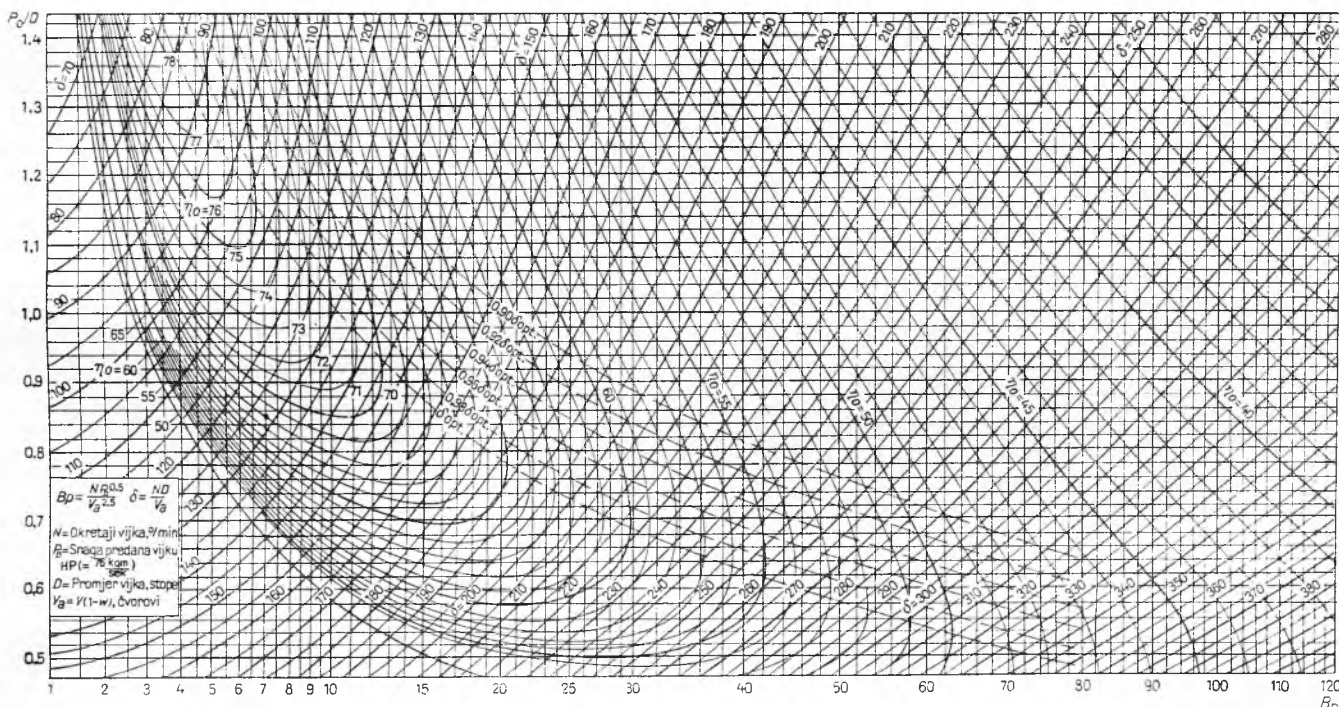
U prvom redu promjer vijka ne može biti proizvoljno velik već mora odgovarati gazu broda. Uzima se da promjer vijka može iznositi najviše 0,7 do 0,75 gaza broda. Vijak većeg promjera stvarao bi valove na površini vode, ili bi mu vrhovi krila čak izranjali. U prvom slučaju gubi se energija na stvaranje valova a u drugom vijak upija zrak, pa stepen djelovanja naglo padne. Promjer vijka može biti ograničen i veličinom propelerskog otvora na krmi jednovijčanog broda, odnosno potrebnom udaljenošću krila od oplata dvovijčanog broda. Prema tome treba odabrati broj krila koji će uz moguću maksimalni promjer vijka dati najbolji stepen djelovanja.

Zbog lokalne promjene brzine pritjecanja vode, svaki prolaz krila vijka iza statve broda stvara jedan impuls, koji može uzrokovati vibracije broskog trupa. Ako je isti ukupni poriv razdijeljen na veći broj krila, oscilacije poriva izazvane nejednolikim

Postoji više tipova serijskih dijagrama za projektiranje brodskih vijaka. Ti se dijagrami međusobno razlikuju u načinu generaliziranja rezultata sistematskih ispitivanja modela vijka, tj. u načinu svodenja rezultata na koeficijente koji omogućuju da se na osnovu poznatih ili zadanih veličina odrede tražene veličine. Ti su koeficijenti u stvari uvijek neki uvjeti sličnosti, pa su jednaki za model i za stvarni vijak. Za proračun broskog vijka redovito su zadani: brzina broda V , snaga pogonskog stroja P_B i broj okretaja vijka N , a traži se u prvom redu promjer vijka D i uspon krila P .

Na sl. 24 prikazan je dijagram poznate Troostove B-serije četverokrilih vijaka omjera površina krila $A_D/A_0 = 0,4$. Ovaj tip dijagrama ima kao ordinatu omjer uspona P/D a kao apscisu koeficijent opterećenja B_p , definiran jednačbom

$$B_p = N \sqrt{P_D/V_A^{2,5}}, \quad (45)$$



Sl. 24. Dijagram za proračun 4-krilnih vijaka omjera $A_D/A_0 = 0,40$ Troostove B-serije

brzinama strujanja u ravnini vijka su manje i manji su impulsi. Ako su impulsi izazvani radom vijka sinhroni s impulsima izazvanim eksplozijama u cilindrima pogonskog motora, redovito su neizbježne vibracije trupa broda. Prema tome, vijak s više krila je manje opasan kao pobuđivač vibracija, a dobro je da se broj krila vijka već unaprijed odabere tako da se isključi svaka mogućnost sinhronizacije impulsa izazvanih radom vijka i radom pogonskog motora.

Brodski vijci imaju od dva do pet krila. Dvokriline vijke imaju motorni čamci, manji ribarski brodovi, jedrenjaci s pomoćnim motorom, a iznimno i jednovijčani brodovi koji imaju dovoljno velik gaz na krmi. Peterokriline vijke imaju veliki jednovijčani tanker, jer obično nema dovoljno prostora da se ugradi četverokrilni vijak, a s obzirom na veliku snagu pogonskog stroja važno je da se poriv podijeli na što veći broj krila i da se smanji opasnost od vibracija. Velika većina brodova ima trokrilne ili četverokrilne vijke. Trokrilne vijke imaju skoro svi dvovijčani brodovi i jednovijčani brodovi s brzohodnim pogonskim strojem, a jednovijčani brodovi sa sporohodnim ili srednje brzim pogonskim strojem obično imaju četverokrilne vijke. U pogledu pobude vibracija trokrilni vijak nije pogodan u kombinaciji sa 6-cilindarskim pogonskim motorom, a četverokrilni vijak u kombinaciji sa 4- ili 8-cilindarskim motorom.

Kad je odabran broj krila, ostale se karakteristike vijka određuju pomoću različitih dijagrama za projektiranje vijka, razrađenih na osnovu sistematskih ispitivanja serija modela ili proračunom na osnovu principa cirkulacijske teorije vijka.

gdje je N broj okretaja vijka, min^{-1} , P_D vijku predana snaga u HP, jednaka snazi na spoju motora umanjenju za gubitke trenja u ležajima osovine: $P_D = P_B \cdot \eta_{os} \approx 0,97 \cdot P_B$; $V_A = V(1-w)$, brzina pritjecanja vode vijka, u čvorovima.

Kao parametri su u dijagramu nanosene krivulje stepena djelovanja vijka η_0 i koeficijenta brzine δ definiranog jednačbom

$$\delta = ND/V_A, \quad (46)$$

gdje je D promjer vijka u stopama.

Na osnovu zadane brzine broda, snage pogonskog stroja, broja okretaja vijka i koeficijenta sustrujanja w (koji je određen ispitivanjima modela ili proračunat pomoću neke približne formule) izračuna se koeficijent opterećenja B_p , pa se za tu vrijednost B_p u dijagramu očitava mogući optimalni stepen djelovanja vijka η_0 i odgovarajuće vrijednosti koeficijenta brzine δ i omjera uspona P/D . Iz koeficijenta brzine δ izračuna se promjer vijka D , a uspon P iz omjera uspona P/D .

Sličnim postupkom se određuju promjer, uspon i stepen djelovanja vijka pomoću ostalih tipova serijskih dijagrama, u kojim su generalizirane karakteristike vijka prikazane koeficijentima nekog drugog oblika.

Oblik konture krila vijka i oblik profila presjeka krila određeni su tipom serijskog dijagrama prema kojem se projektira vijak. Taylorove, Schaffranove i Gawnove serije vijaka imaju simetričnu eliptičnu konturu krila i polukružne profile presjeka krila. Troostovi vijci (sl. 17) imaju u donjem dijelu krila aerodinamičke, a pri vrhu krila polukružne profile presjeka krila, dok se kontura

krila, koja je nesimetrična, odredi prema podacima iz posebnih tablica.

Bez obzira na tip vijaka, debljina profila presjeka krila uvijek se određuje proračunom čvrstoće. Površina krila, odnosno omjer krilnih površina A_D/A_0 , odabere se prema nekom od približnih kriterija kavitacije. Ti su kriteriji razrađeni na osnovu brojnih ispitivanja modela vijaka u kavitacijskom tunelu, a obično daju površinu krila potrebnu da se izbjegne pojava kavitacije kao funkciju opterećenja vijka i brzine strujanja oko krila vijka.

Stepen djelovanja vijka se smanjuje s povećanjem omjera A_D/A_0 , jer veća površina krila ima veći otpor trenja. Zato u pojedinim slučajevima, kad bi se pojava kavitacije mogla potpuno spriječiti jedino vrlo velikom površinom krila, povoljnije je da se uzme nešto manja površina krila i dopusti djelomična kavitacija, ako je pad stepena djelovanja vijka uslijed kavitacije manji nego bi bio uslijed povećanog otpora trenja na vrlo širokim krilima vijka.

Proračun brodskog vijka prema teoriji cirkulacije zahtijeva opsežne računske operacije i iteracijske postupke, pa je znatno dugotrajniji i složeniji nego proračun pomoću serijskih dijagrama. Iako danas već postoje razrađene pomoćne tablice i grafikoni koji čine proračun jednostavnijim i kraćim, ipak je projektiranje brodskih vijaka prema cirkulacijskoj teoriji još uvijek manje ili više ograničeno na specijalne slučajeve. Međutim, taj se proračun može obaviti vrlo brzo pomoću elektroničkog računala. Zato treba očekivati da će se u budućnosti, kad projektanti budu imali na raspoloženju elektroničke računske strojeve, brodski vijci pretežno projektirati prema teoriji cirkulacije.

Optimalni promjer vijka ne može se izračunati pomoću cirkulacijske teorije, već se on određuje pomoću nekog serijskog dijagrama. Proračun ostalih karakteristika prema cirkulacijskoj teoriji zasniva se na principu minimalnog gubitka energije. Za zadane uvjete (promjer vijka, brzina pritjecanja vode vijku, snaga predana vijku i broj okretaja vijka) pretpostavi se neka određena raspodjela cirkulacije oko krila vijka pri kojoj je gubitak energije minimalan, tj. stepen djelovanja vijka je maksimalan, pa se izračuna uspon i profil pojedinih presjeka krila koji odgovaraju pretpostavljenoj raspodjeli cirkulacije.

Jedino pomoću cirkulacijske teorije može se proračunati vijak prilagođen sustrujanju. Ako se pokusom s modelom broda odredi ne samo srednja vrijednost brzine sustrujanja za čitavu ravninu vijka nego i srednje vrijednosti sustrujanja za pojedine radijuse vijka, može se svaki pojedini presjek krila proračunati sa srednjom brzinom pritjecanja vode koja odgovara tom radijusu. Takav vijak je bolje prilagođen stvarnim uvjetima strujanja po krmi broda pa ima bolji stepen djelovanja i manje je podložan kavitaciji nego vijak koji je proračunat za neku jednoliku brzinu pritjecanja vode.

Specijalne izvedbe brodskih vijaka. Za propulziju normalnih trgovačkih brodova u normalnim radnim uvjetima obični brodski vijak se je pokazao kao najpovoljniji, najjednostavniji i najjeftiniji tip propulzora. Međutim, ako propulzor mora da zadovolji neke posebne zahtjeve, onda umjesto običnog brodskog vijka može biti povoljnija neka specijalna izvedba vijka ili neki drugi tip propulzora. Do sada je predlagano i patentirano vrlo mnogo različitih specijalnih tipova brodskog vijka kojima je bio cilj da poboljšaju propulzivna svojstva broda, ali tek vrlo mali broj tih specijalnih izvedbi je opravdao očekivanja i održao se u praksi.

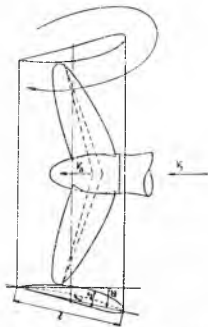
Vijak u sapnici. Kad je vijak jako opterećen ili kad je zbog ograničenog gaza broda promjer vijka manji od optimalnog, stepen djelovanja vijka može se poboljšati ako se vijak stavi u prstenastu sapnicu.

Vijak u sapnici je izumio Kort 1933. U početku je vijak bio smješten po sredini broda u kanalu koji se je protezao čitavom dužinom broda. Ovakvo rješenje je povoljno djelovalo na stepen propulzije broda, ali je konstruktivna izvedba bila skupa i složena, a gubici trenja u kanalu su bili veliki, pa je zato, umjesto u dugi kanal, vijak stavljen u prsten na krmi.

Stepen djelovanja se poboljšava prvenstveno zbog toga što sapnica smanjuje ili potpuno sprečava otkidanje vršnih vrtloga na krilu vijka, pa se smanjuju i gubici energije u mlazu iza vijka. Sapnica ima i svojstvo da ujednačuje brzine strujanja vode u ravnini vijka. Analizom je pokazano da se razlike od 80% između lokalnih brzina ispred sapnice svode na razlike brzine od svega

3% u samoj sapnici. Zbog homogenije brzine pritjecanja vode vijku fluktuacije poriva tokom jednog okretaja su manje, a time je i manja opasnost od vibracija izazvanih radom vijka. Daljnje su prednosti sistema vijak + sapnica da je optimalni promjer vijka u sapnici manji od optimalnog promjera vijka bez sapnice i da sapnica poboljšava stabilnost kursa broda i prigušuje posrtanje broda.

Sistem vijak + sapnica prestaje da bude povoljniji od običnog vijka kad gubitak energije uslijed otpora sapnice postane veći od uštede energije postignute djelovanjem sapnice. Otpor sapnice raste s brzinom pritjecanja vode sapnici, pa za brze brodove sistem vijak + sapnica ne znači poboljšanje nego pogoršanje stepena propulzije. Kao približan kriterij za izbor propulzora, tj. za odluku da li je u nekom konkretnom slučaju povoljniji sistem vijak + sapnica ili samo vijak, može da posluži koeficijent opterećenja B_p definiran izrazom (45). Ako je $B_p < 30$, sistem vijak + sapnica ne dolazi u obzir jer vijak bez sapnice ima bolji stepen djelovanja. Za vrijednosti $B_p = 30 \dots 100$ sistem vijak + sapnica već može biti povoljniji od samog vijka, što se može tačno utvrditi tek detaljnijom analizom konkretnog slučaja. U ovo područje opterećenja vijka spadaju sporiji jednovijčani teretni brodovi, veliki tankeri, obalni brodovi i većina riječnih brodova. Za vrijednosti $B_p > 100$ prednosti su sistema vijak + sapnica neosporne, pa brodovi s tako visokim koeficijentom opterećenja, a to su svi tipovi tegljača i neki tipovi ribarskog broda, primjenom sapnice postižu čak za 30 do 40% bolji stepen propulzije nego s običnim vijkom.

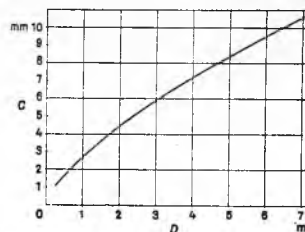


Sl. 25. Vijak u sapnici

Smještaj vijka u sapnici je prikazan na sl. 25. Uzdužni presjek sapnice je neki strujni profil. Danas se za profil sapnice vrlo često uzimaju profili NACA 4415 ili NACA 5415. Sistematska ispitivanja modela su pokazala da su ti profili vrlo povoljni za dobar stepen djelovanja sistema vijak + sapnica, a i moderne metode proračuna vijka u sapnici razrađene su baš za te tipove profila sapnice.

Rad sistema vijak + sapnica u principu je sličniji djelovanju aksijalne pumpe nego djelovanju vijka bez sapnice. Zato se u najnovije vrijeme umjesto normalnog brodskog vijka u sapnicu stavlja Kaplanov vijak. To je tip vijka koji ima široke, ravno podređane vrhove krila, a inače se upotrebljava za aksijalne pumpe. Kaplanov vijak dozvoljava znatno smanjenje optimalnog promjera, povoljniji je s obzirom na kavitaciju a stepen mu je djelovanja bar jednak stepenu djelovanja odgovarajućeg vijka sa zaobljenim vrhovima krila.

Od primarne je važnosti da raspor između vrha krila vijka i sapnice bude što je moguće manji. Idealno bi bilo da vrh krila vijka dosjeda uz sapnicu bez ikakvog raspora, jer se uslijed raspora smanjuje stepen djelovanja sistema vijak + sapnica.

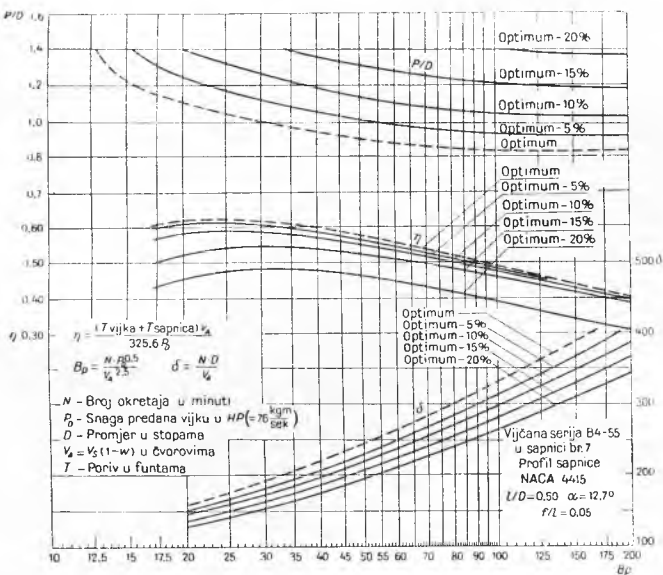


Sl. 26. Veličina raspora između vrha krila vijka i sapnice u ovisnosti o promjeru vijka

Aksijalne pumpe imaju raspor između vrha krila i unutarnje strane kućišta oko 1/1000 promjera vijka. Na brodskoj konstrukciji praktički se ne mogu izvesti tako mali raspori, ali oni ipak moraju ostati unutar nekih granica jer smanjenje stepena djelovanja sistema vijak + sapnica to je veće što je raspor veći, pa kad je raspor suviše velik, potpuno se gubi povoljno djelovanje sapnice. Dozvoljene veličine raspora kao funkcije promjera vijka prikazane su na sl. 26.

U samom rasporu, uslijed velike brzine strujanja i niskog pritiska, redovito nastaje kavitacija. Da se ublaže posljedice kavitacijske erozije, obično se u pojasu sapnice iznad vrhova krila vijka ugradi prsten od legiranog nerđajućeg čelika, jer je nerđajući čelik otporniji od drugih materijala prema erozijskom razaranju.

Važan je i način na koji je sapnica pričvršćena za trup broda. Da bi cirkulacijsko strujanje oko sapnice bilo što manje poremećeno, a time i homogenizirajuće djelovanje sapnice na brzinu strujanja što bolje, sapnica treba da ima što je više moguće cjevovit prstenasti oblik. Na mjestu gdje je sapnica vezana za trup cirkulacija oko sapnice ne postoji, pa prema tome konstrukcije krmenog dijela broda kod kojih je sapnica velikim dijelom »urasla« u trup broda, ili čak gornji dio sapnice prelazi u tunel, manje su povoljne od konstrukcije sapnice obješene na jednom ili na dva kratka profilirana skroka. Sapnica obješena na jednom skroku koji se može okretati oko vertikalne osi služi istovremeno i kao kormilo. Zakretanjem sapnice skreće se repelerski mlaz u stranu, i tako se dobiva potrebna bočna sila koja zaokreće brod.



Sl. 27. Dijagram za proračun vijaka u sapnici van Manenove serije B. 4.55

Praktične metode proračuna sistema vijak + sapnica datiraju tek iz novijeg vremena. Na osnovu teorijskih razmatranja i rezultata ispitivanja profila, Horn i Amsterberg su 1950 dali prvu praktičnu metodu proračuna vijaka u sapnici. 1957 van Manen je na osnovu rezultata sistematskih ispitivanja modela razradio dijagrame za projektiranje vijaka i sapnica. Ti su dijagrami vrlo jednostavni za upotrebu, a u njima su prikazani: stepen djelovanja sistema vijak + sapnica η i koeficijent brzine $\delta = ND/V_A$ kao funkcije koeficijenta opterećenja B_p (sl. 27). God. 1959 van Manen i Šuperina su primjenom cirkulacijske teorije vijaka i rezultata ispitivanja modela razradili metod proračuna za Kaplanov tip vijka u sapnici.

Vijak s prekretnim krilima je specijalna konstrukcija koja omogućava da se za vrijeme vožnje broda pomoću posebnog mehanizma zakreću krila oko osi okomite na osovini vijaka; uslijed toga se mijenja uspon krila a time i broj okretaja vijaka, moment i porivna sila.

Vijak s prekretnim krilima izumio je Wooderoft (1844), ali zbog složenosti i nepouzdanosti prekretnog mehanizma taj specijalni tip brodskog vijaka dugo vrijeme nije upotrebljavan. Napredak tehnike i tehnologije u posljednjih tridesetak godina omogućio je efikasna i pouzdana konstruktivna rješenja vijaka s prekretnim krilima, pa njegova važnost postaje danas sve veća.

Normalni vijak s fiksnim krilima je projektiran za određene radne uvjete. Čim se jedan od tih uvjeta znatnije promijeni (npr. ako uslijed nekog dodatnog opterećenja poraste otpor broda ili se uslijed promjene brzine broda izmijeni brzina pritjecanja vode vijku, itd.), vijak više nije optimalan. U novonastalim uvjetima mijenjaju se broj okretaja, moment i opterećenje vijaka, zbog čega se s jedne strane smanjuje stepen djelovanja vijaka a s druge strane poremećuju optimalni uvjeti za rad pogonskog stroja, pa potrošak goriva postaje veći. Promjene momenta i opterećenja vijaka djeluju naročito nepovoljno u slučaju pogona dizel-motorom. Dizel-motor razvija pri svim okretajima konstantan moment pa

se ne može prilagoditi momentu koji diktira vijak, što ima za posljedicu da dolazi do preopterećenja ili podopterećenja motora, dakle pored toga što se povećava potrošak goriva, postoji i opasnost kvarova na motoru.

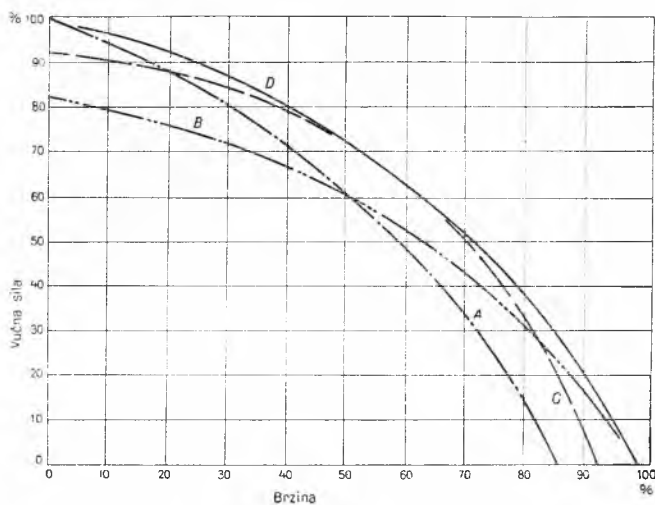
Vijak s prekretnim krilima omogućava da pogonski stroj uvijek radi pod optimalnim uvjetima snage, okretaja i momenta, a to znači i uz najekonomičniji potrošak goriva. Mijenjanjem uspona krila postiže se da pogonski dizel-motor pri raznim brojevima okretaja radi s konstantnim momentom i optimalnim srednjim efektivnim pritiskom, odnosno, da parna turbina konstantno radi s optimalnim brojem okretaja.

Daljnja je velika prednost vijka s prekretnim krilima da se mijenja smjer poriva kad se krila pokrenu, pa je za zaustavljanje broda ili za vožnju krmom nepotreban posebni prekretni uređaj, prekretni pogonski stroj, natražna turbina ili posebne spojke. Stepenn djelovanja vijka s krilima prekretnim za natražnu vožnju znatno je bolji nego stepen djelovanja običnog vijaka koji za zaustavljanje i vožnju broda krmom mora promijeniti smjer vrtnje, uslijed čega naliče krila preuzima funkciju njegove pritisne strane. Zato se brod sa vijkom s prekretnim krilima brže zaustavlja i bolje manevrira, a kako ne treba mijenjati smjer vrtnje osovine, pogonski stroj pri tim manevrima manje trpi.

Većina trgovačkih brodova plovi pod manje ili više jednolikim uvjetima, opterećenja vijka se znatnije ne mijenjaju, pa vijak s prekretnim krilima ne bi osjetljivije doprinio uštedi goriva. Prednosti vijka s prekretnim krilima dolaze od punog izražaja kod brodova koji rade pod vrlo promjenljivim uvjetima i opterećenjima ili koji mnogo manevriraju. Takvi su brodovi: tegljači, ledolomci, trajekti, ribarski brodovi, riječni brodovi, podmornice i neki drugi tipovi ratnih brodova. Zbog prirode svoje djelatnosti brodovi svakog od navedenih tipova nužno moraju da plove nekad s relativno vrlo niskom, a nekad s relativno vrlo visokom brzinom, pa se otpor tih brodova mijenja u vrlo širokim granicama; jedino vijak s prekretnim krilima može se prilagoditi tako promjenljivim uvjetima rada i osigurati ekonomičnost pogona. To se najbolje vidi iz sl. 28, u kojoj se za slučaj tegljača uspoređuje djelovanje vijka s prekretnim krilima s djelovanjem običnih vijaka, od kojih je jedan projektiran za uvjete maksimalne vuče uz brzinu jednaku nuli, drugi za uvjete slobodne vožnje broda bez vuče, a treći predstavlja kompromisno rješenje između prva dva.

U uspoređenju s običnim vijkom nedostaci su vijka s prekretnim krilima: veća osjetljivost prema vanjskim oštećenjima, mogućnost da mehanizam za prekrat krila zataji u kritičnom momentu, veća osjetljivost prema kavitaciji korijena krila (jer zbog konstruktivnih razloga krila imaju u korijenu reducirane dužine a povećane debljine presjeka) i, konačno, što je najvažnije, četiri do šest puta veća cijena.

Od prvog patenta vijka s prekretnim krilima iz 1844 pa do danas patentirano je preko 300 različnih tipova takvog vijaka, ali



Sl. 28. Usporedba vučne sile vijka s fiksnim i prekretnim krilima. A vijak s fiksnim krilima projektiran za uvjete vuče, B vijak s fiksnim krilima projektiran za uvjete slobodne vožnje, C kompromisni vijak s fiksnim krilima, D vijak s prekretnim krilima

je samo vrlo mali broj tih patenata našao praktičnu primjenu. Moderni vijak s prekretnim krilima sastavljen je od šuplje glavine u koju su utaknuta krila vijka. Krila su preko rukavaca na donjem kraju vezana sa sistemom za preket krila, smještenim u šupljolj glavini i u šupljolj propelerskoj osovini. Taj sistem može biti mehanički ili hidraulički. Hidraulički sistem prekrene krila iz pune brzine naprijed u punu brzinu natrag za tri do četiri puta kraće vrijeme nego mehanički sistem, a pri tome je i snaga potrebna za preketanje dva do tri puta manja. Ali mehanički je uređaj za preketanje krila konstruktivno jednostavniji, jeftiniji i pouzdaniji u pogonu.

Hidraulički uređaj za preket krila ima u šupljolj propelerskoj osovini ili u samoj glavini vijka ugrađen hidraulički servomotor, čiji je klip vezan s rukavcima krila. Aksijalnim pomicanjem klipa zakreću se krila vijka. Posebna pumpa dobavlja servomotoru ulje pod pritiskom. Rad pritiska pumpe i servomotora, a time i zakret krila vijka, regulira se iz kormilarnice, u kojoj je uvijek smještena komandna ručica prekretnog uređaja i indikator uspona krila vijka.

Mehanički uređaj za preket krila ima u šupljolj propelerskoj osovini smještenu prekretnu polugu. U glavini vijka je prekretna poluga preko zupčanog prijenosa ili preko sistema kratkih osovina i poluga vezana s rukavcima krila, pa se aksijalnim ili rotacijskim gibanjem poluge krila zakreću. Pokretanje poluge može biti ili pomoću elektro-motora ili ručno preko posebnog prijenosnog sistema. Mehanički sistem prekreta krila se upotrebljava samo za male vijke.

Najveći vijci s prekretnim krilima koji se danas izrađuju imaju promjer između 5 i 6 m a mogu preuzeti snagu od približno 8000 KS.

Tandem-vijci. Uvođenjem parne turbine za pogon broda dobio je kompaktan pogonski uređaj vrlo velike snage, pa se je pojavio problem kako tu veliku snagu raspodijeliti na brodske vijke, naročito ako gaz broda ne dozvoljava veliki promjer vijka. Na prvom turbinskom brodu »Turbinia« Parson je 1880 pokušao taj problem riješiti tandem-vijcima, tj. dvama ili trima vijcima postavljanim jedan iza drugog na zajedničkoj osovini. Taj uređaj nije bio naročito efikasan. Stražnji vijak, rađeci u mlazu prednjeg vijka, ima vrlo nizak stepen djelovanja jer su smjerovi rotiranja mlaza i stražnjeg vijka isti, pa su gubici rotacije vrlo veliki. Stepenn djelovanja tandem-vijaka se poboljšava ako se između vijaka ugrade skretne lopatice (kontra-propeler) koje rotacijsko strujanje u mlazu prednjeg vijka poništavaju ili mlaz tako usmjeruju da je pritjecanje vode stražnjem vijku povoljno.

Tandem-vijci se danas više ne upotrebljavaju, iako bi takav uređaj s kontra-propelerom mogao doći u obzir za brodove kod kojih je promjer vijka ograničen.

Koaksijalni kontra-rotirajući vijci su specijalan tip propulzora koji datira još iz prvih početaka pogona broda s vijkom. Prvi koaksijalni kontra-rotirajući vijak izumio je Ericsson još 1836. Uređaj se sastoji od dva koaksijalna vijka koji su smješteni neposredno jedan iza drugog, a okreću se u suprotnim smjerovima. Na taj se način smanjuju gubici energije u mlazu vijka, jer stražnji vijak iskorištava energiju sadržanu u rotacijskom gibanju mlaza prednjeg vijka.

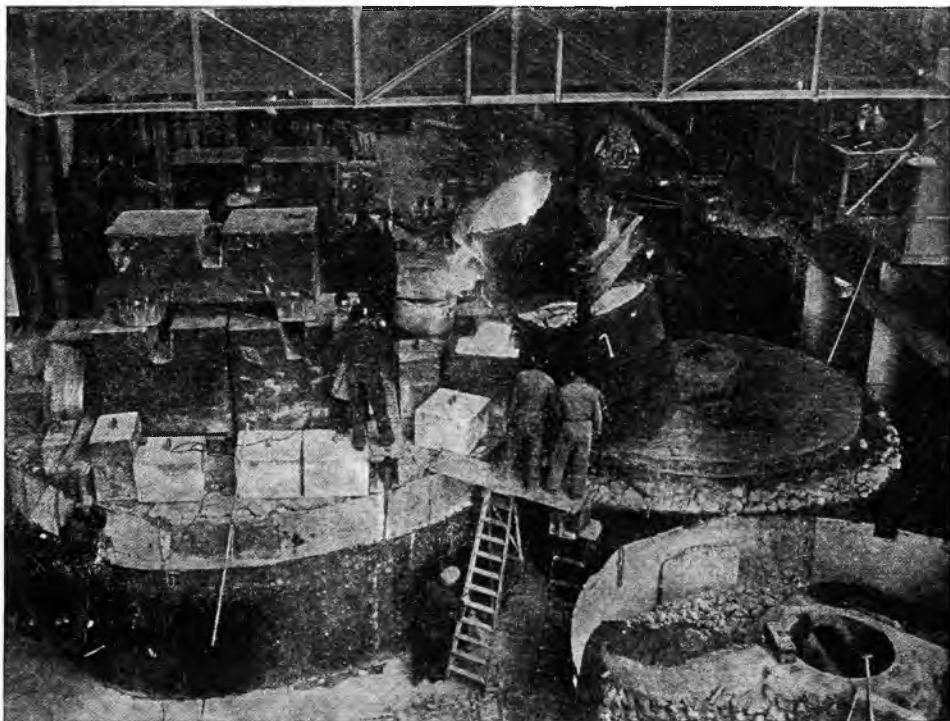
U uspoređenju s običnim vijkom kontra-rotirajući sistem ima **ove prednosti**: pri istim vrijednostima koeficijentata opterećenja B_p , stepenn djelovanja kontra-rotirajućeg sistema je znatno veći nego stepenn djelovanja običnog brodske vijka optimalnog pro-

mjera. Optimalni promjer kontra-rotirajućih vijaka je manji od optimalnog promjera običnog vijka. Momenti prednjeg i stražnjeg vijka kontra-rotirajućeg uređaja imaju suprotne predznake pa su međusobno uravnoteženi, što je u slučaju propulzije torpeda ili brze jedno-osovinske podmornice jedan od osnovnih uvjeta stabilnosti vožnje.

Iako se pomoću koaksijalnih kontra-rotirajućih vijaka može postići bolji stepenn propulzije nego jednim običnim vijkom, ipak se je taj tip propelera vrlo malo primjenjivao. Glavni razlog tome je vrlo komplicirana i skupa konstruktivna izvedba koaksijalnih osovina, od kojih vanjska šuplja osovina nosi u sebi unutarnju osovinu s njenim ležajima, a kompliciran je i prijenos snage s pogonskog stroja na koaksijalne osovine, koje imaju svaka svoj smjer vrtnje. Propulzija pomoću kontra-rotirajućih vijaka jedino je općenito primjenjivana na torpedu, i to zbog specijalnih zahtjeva koje postavlja automatski uređaj za upravljanje torpedom.

Izrada brodskih vijaka. Brodski vijci se lijevaju od raznih vrsta bronce, čelika ili željeza, a zatim se obrađuju na strojevima i ručno. Osim materijala za brodske vijke prikazanih u tablici 1, u najnovije vrijeme izrađuju se manji vijci, ili samo krila vijaka, i od plastičnih masa.

Mali vijci, do 2 m promjera, redovno se lijevaju u kalupe od pijeska, a veliki u betonskom kalupu (sl. 29). Kalup je dvodijelan, a izrađuje se prema šablonama s radnog nacrt, i to tako da je pritiska strana krila uvijek okrenuta prema dolje. Kad se ohlađeni odljevak vijka izvadi iz kalupa i očisti, najprije se na tokarilici obradi glavina vijka na potrebnu dužinu i u glavini se izbuši konični provrt za kraj propelerske osovine. Zatim se ručno ili na specijalnoj glodalici obrađuju krila vijka, kontrolirajući šablonama profile krila. Konačno poliranje krila vijka izvodi se ručno.



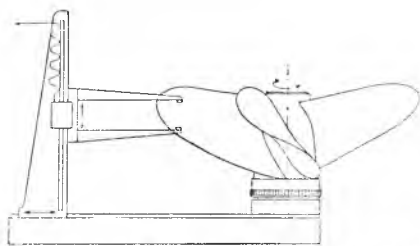
Sl. 29. Lijevanje velikog brodske vijka

Tačnost izrade vijka mora biti unutar propisanih tolerancija. To se provjerava premjeravanjem geometrijskih karakteristika vijka (promjera, uspona i debljine krila) pomoću posebnog instrumenta (sl. 30). U Evropi se vijci izrađuju prema tolerancijama ISO, koje predviđaju četiri klase vijaka.

Da bi vijak radio jednoliko i da ne bi pobuđivao vibracije, on mora biti potpuno uravnotežen. Zato se vijak balansira na specijalnom uređaju i to prvi put nakon grube obrade krila a drugi put nakon potpuno završene obrade čitavog vijka. Svi se

vijci balansiraju statički, a vijci s brojem okretaja iznad 200 min^{-1} balansiraju se i dinamički.

Najveći brodski vijci koji se danas izrađuju imaju promjer između 7,5 i 8 m a teški su do 45 t.



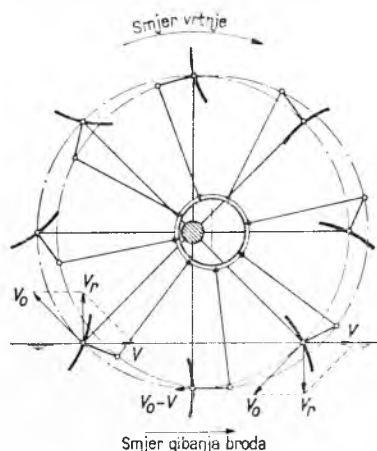
Sl. 30. Shema instrumenta za promjer vijka

Druge vrste propulzora

Kotač s lopaticama. Najstariji tip mehaničkog brodskog propulzora je kotač s lopaticama. Održao se je i do danas jer je u određenim uvjetima, npr. na plitkim divljim rijekama s velikim padom i brzacima, pogodniji nego brodski vijak. U poređenju s brodskim vijkom kotač ima jednako dobar stepen djelovanja, ali je mnogo teži, glomazniji, kompliciraniji i osjetljiviji prema oštećenjima. Zbog niskog broja okretaja kotača potrebni su teški sporohodni strojevi. Kotač s lopaticama je i znatno skuplji od brodskog vijka. Danas je primjena kotača s lopaticama ograničena na riječne brodove, jer morski valovi vrlo lako oštete nezgrapnu konstrukciju ovog propulzora.

Postoje dvije izvedbe kotača: s fiksnim i s pokretnim lopaticama. Pogon broda može biti pomoću bočnih kotača, smještenih oko sredine broda, na svakom boku po jedan, ili pomoću kotača smještenog iza krme broda. Bočni kotači povećavaju širinu broda i otežavaju manevriranje na uskim mjestima, a krmeni kotači su osjetljivi na promjene trima broda.

Prednosti kotača s lopaticama dolaze do izražaja na plitkim i brzim rijekama. Uslijed rada kotača ne smanjuje se pritisak u području krme broda, kao što je to u slučaju pogona brodskim vijkom, pa se ni ne povećava gaz broda. Ograničeni gaz broda nema nikakvog utjecaja na stepen djelovanja kotača, a tegljač s ovim propulzorom može tegliti teglenice na kratkom vezu, jer kotač ne stvara iza sebe vođeni mlaz koji bi povećavao otpor teglenice. Kotač s lopaticama znatno brže zaustavlja i bolje ubrzava brod nego brodski vijak, što je značajna prednost za brod koji saobraća i mora mnogo da manevrira na rijeci s brzacima.



Sl. 31. Shema kotača s pokretnim lopaticama

Kotač s lopaticama je djelomično uronjeni propulzor koji rotira oko horizontalne osovine postavljene poprečno na brod. Na obodu kotača su fiksne ili pokretne lopatice. Lopatice zahvataju i ubrzavaju vodu, a otpor kojim se voda suprotstavlja gibanju lopatice stvara poriv.

Kut između fiksne lopatice i resultantne brzine pri ulasku odnosno izlasku lopatice iz vode ovisi o promjeru kotača. Što

je promjer kotača veći to je taj kut manji, lopatice ulaze i izlaze iz vode postepenije i s manje udara, pa je i njihov stepen djelovanja bolji. Zato kotač s fiksnim lopaticama mora imati velik promjer i malen broj okretaja, a to povećava njegovu težinu i zahtijeva teške sporohodne pogonske strojeve.

Mali ulazni i izlazni kutovi uz mali promjer kotača postižu se pokretnim lopaticama. Shema kotača s pokretnim lopaticama prikazana je na sl. 31. Svaka lopatica je preko poluge i zglobova vezana za ekscentar koji zakreće lopaticu tako da se ona od ulaza pa do izlaza iz vode stalno nalazi u najpovoljnijem položaju s obzirom na stepen djelovanja. Osim manjeg promjera, kotač s pokretnim lopaticama može imati i veći broj okretaja, dakle brži i lakši pogonski stroj, ali je zato sam kotač teži, ima kompliciraniju konstrukciju i lakše se ošteti.

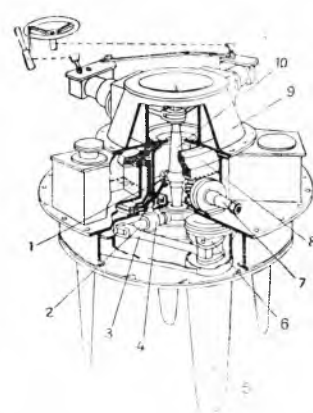
Kotač s lopaticama ima obično promjer od 2 do 3,7 m i 5 do 12 lopatica. Po pravilu broj lopatica treba da bude tolik da se u vodi istovremeno nalaze tri lopatice: jedna da ulazi u vodu, druga da je uronjena u najnižem položaju, a treća da izlazi iz vode. Prevelik broj lopatica, uslijed njihova međusobnog utjecaja kad su nablizu smještene, smanjuje stepen djelovanja kotača.

Projektiranje kotača s lopaticama zasniva se još uvijek dobrim dijelom na iskustvenim pravilima i podacima. Tek u novije vrijeme vršena su sistematska ispitivanja serija modela kotača s lopaticama (Gebers 1952, Volpich 1956), ali dijagrami za projektiranje koji su razrađeni na osnovu tih ispitivanja ne omogućuju da se odredi optimalni promjer kotača, optimalni broj i oblik lopatica itd. Također, zbog vrlo jakog utjecaja mjerila, rezultati ispitivanja modela kotača s lopaticama daleko su manje pouzdani nego rezultati ispitivanja modela brodskog vijka. Lopatice kotača kreću se na granici slobodne površine vode i na nekoj dubini ispod površine i pri tome stvaraju na površini vode valove, povlače za sobom u vodu zrak i u vodi stvaraju virove. U takvim uvjetima inkompatibilnost Froudeova i Reynoldsova kriterija sličnosti ima za posljedicu osjetljivo veću grešku u zaključcima izvedenim na osnovu ispitivanja modela nego je to u slučaju brodskog vijka.

Propeler s vertikalnom osovinom. Postoje dva tipa propelera koji rotiraju oko vertikalne osovine: Voith-Schneiderov propeler i Kirsten-Boeingov propeler. Ova dva propelera izgledaju slično: na horizontalnom rotirajućem disku učvršćene su okomite lopatice koje stvaraju poriv. Kirsten-Boeingov propeler stvara poriv uslijed sile otpora kojom se voda suprotstavlja translatornom gibanju lopatice, a Voith-Schneiderov propeler kao posljedicu cirkulacije tekućine oko lopatice i time proizvedene sile uzgona na lopatici. Na oba tipa propelera može se podešavati položaj lopatica, čime se mijenja smjer poriva, pa propeleri služe ujedno i kao kormila.

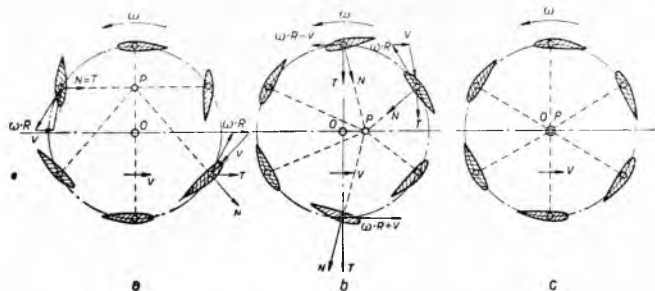
Propeleri s vertikalnom osovinom zahtijevaju ravno dno broda, pa ne odgovaraju za brodove koji plove po uzburkanim vodama. Imaju približno jednak stepen djelovanja kao brodski vijak ili kotač s lopaticama.

Voith-Schneiderov propeler ili **cikloidni propeler** sastoji se od četiri ili šest lopatica nesimetričnog aerodinamičkog profila, postavljenih okomito po obodu horizontalnog rotirajućeg kola, i od kompliciranih sistema za prijenos pogona kola i za zakret lopatica (sl. 32). Za vrijeme rotacije kola strujanje vode oko lopatica stvara na lopaticama uzgon a time i poriv. Veličina i smjer poriva zavise o položaju lopatica, što se regulira posebnim mehanizmom. Karakteristika je Voith-Schneiderova propelera da se okomice na lopatice sijeku u jednoj zajedničkoj tački i da su čepovi lopatica sistemom poluga vezani na jedan disk smješten u toj tački. Promjenom ekscentriciteta diska mijenja se položaj

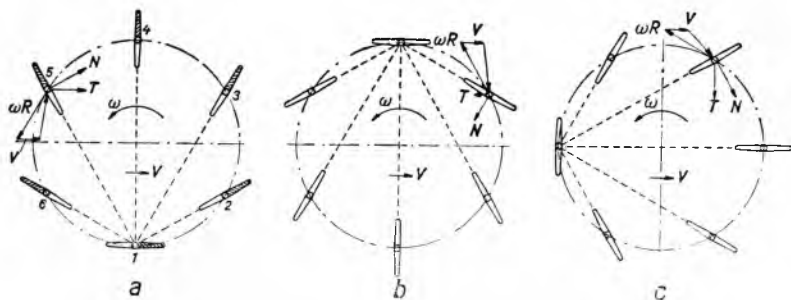


Sl. 32. Konstrukcija Voith-Schneiderova propelera a. 1 nepokretno postolje, 2 glavna zakretna poluga, 3 međupoluga, 4 vodilica poluge, 5 lopatica propelera, 6 ekscentar za zakret lopatice, 7 pogonska osovina, 8 glavni pogonski zupčanik, 9 kućište, 10 poluga za promjenu ekscentriciteta lopatica.

lopatica a time i smjer poriva. Ako je ekscentricitet jednak nuli, prestaje stvaranje poriva (sl. 33). Prednosti su Voith-Schneiderova propelera da on služi ujedno i kao kormilo i da se veličina i smjer poriva mogu mijenjati ne mijenjajući smjer vrtnje i broj okretaja pogonskog stroja. Nedostaci su ovog propelera: komplicirana konstrukcija, visoka nabavna cijena, velika težina i osjetljivost prema oštećenjima. Ipak, za neke tipove brodova i plovniha objekata kojima je izvrsna manevrabilnost od primarne važnosti, Voith-Schneiderov propeler je pogodniji od drugih vrsta propelera. Također na vodi ograničene dubine Voith-Schneiderov propeler može imati bolji stepen djelovanja od brodskog vijka, kojemu je promjer ograničen. Danas se Voith-Schneiderov propeler upotrebljava za pogon nekih tipova trajekata, riječnih i jezerskih putničkih brodova, riječnih i lučkih tegljača, vatrogasnih tendera, plovniha dizalica s vlastitim pogonom i na velikim morskim brodovima kao pramčani propeler za kormilarenje.



Sl. 33. Princip djelovanja Voith-Schneiderovog propelera.
a vožnja pramcem, b zaokretanje broda, c nulti poriv



Sl. 34. Princip djelovanja Kirsten-Boeingovog propelera.
a vožnja pramcem, b zaustavljanje i vožnja krmom, c zaokretanje broda

Kirsten-Boeingov propeler ima simetrične lopatice međusobno povezane sistemom poluga i zupčanika; za jedan puni okret horizontalnog kola na kome su smještene, svaka lopatica napravi pola okreta oko vlastite osi. Pomoću posebnog mehanizma može se mijenjati početni položaj lopatica i tako mijenjati i smjer poriva. Iz sl. 34 vidi se način djelovanja ovog propulzora i kako se promjenom početnog položaja lopatica mijenja smjer poriva. Do sada se Kirsten-Boeingov propeler vrlo malo upotrebljavao.

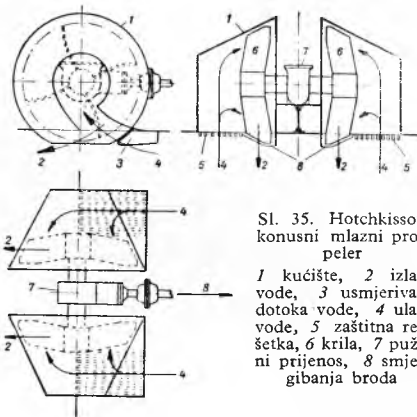
Mlazni propulzori su posebni tipovi impelernih pumpi ugrađenih unutar trupa broda, koje dajući impuls mlazu vode proizvode poriv. Ulazni otvor dovodne cijevi vode je na pramcu ili ispod pumpe, a izlazni otvor vodenog mlaza na krmenom dijelu broda. Otvori cijevi za dovod vode pumpe zaštićeni su rešetkama, a otvori za izlaz vodenog mlaza obično su izvedeni tako da se može mlaz usmjeriti na bilo koju stranu i na taj način upravljati brodom. Poriv nastaje time što pumpa vodu koja pritječe od pramca ubrzava i povećanom brzinom izbacuje van broda. Stepjen djelovanja ovakvog propelera je nizak, jer sama pumpa ima nizak stepen djelovanja, zatim pumpa iskorištava samo mali dio kinetičke energije sadržane u vodi koja pritječe, a gubici trenja u dovodnim i odvodnim cijevima propulzijskog sistema također su dosta veliki.

Hotchkissov konus je poseban tip mlaznog propulzora (sl. 35). Sastoji se od dva šuplja konusa čija os leži poprečno na uzdužnu os broda, a uža krajevi su okrenuti prema bokovima broda. Na drugoj strani užeg kraja konusa nalazi se ulazni otvor vode

a u širem kraju je smješten krilni impeler i izlazni otvor vodenog mlaza. Nakon ulaza u konus voda se uslijed djelovanja impelera, centrifugalne sile i nagiba zidova konusa kreće unutar konusa po spirali izlazeći u mlazu na širem kraju konusa. Pri tome je kutna brzina vode koja rotira konstantna, a obodna brzina raste jer se promjer konusa od ulaza prema izlazu vode povećava. Zato je brzina vode na izlazu veća nego na ulazu, pa kao reakcija izlaznog mlaza vode nastaje poriv. Krilni impeler ne ubrzava vodu već samo održava njeno rotacijsko gibanje, a ubrzanje nastaje uslijed oblika konusa. Hotchkissov konusni propulzor iskorištava svu kinetičku energiju sadržanu u ulaznoj struji vode pa zato ima bolji stepen djelovanja od mlaznog propulzora s centrifugalnom pumpom.

U uspoređenju s brodskim vijkom mlazni propulzor ima znatno lošiji stepen djelovanja, kompliciraniju konstrukciju, znatno veću težinu, zauzima koristan prostor u trupu broda i skuplji je. Prednost mlaznih propulzora je što nemaju nikakvih pokretnih dijelova van trupa broda, pa su potpuno zaštićeni od vanjskih udara i oštećenja. Zato, kad se radi o pogonu čamaca i manjih brodova koji plove po vrlo plitkim vodama, kroz razlomljeni led ili po vodama sa plovećim drvljem, mlazni propulzor usprkos svim svojim nedostacima može biti povoljniji od ostalih tipova propulzora.

U najnovije vrijeme mlazni propulzori su dobili jednu sasvim novu namjenu: da služe ne za pogon već za manevriranje



Sl. 35. Hotchkissov konusni mlazni propeler
1 kućište, 2 izlaz vode, 3 usmjerivač dotoka vode, 4 ulaz vode, 5 zaštitna rešetka, 6 krila, 7 pužni prijenos, 8 smjer gibanja broda

brodom. Na velikim preoceanskim brodovima ugrađuju se mlazni propulzori u pramcu a eventualno i u bokovima na krmenom dijelu broda (mlazna kormila). Takvo dodatno mlazno kormilo vanredno povećava manevarske sposobnosti broda.

S. Šilović A. Sentić

KORMILARENJE

Kormilarenje je upravljanje brodom pomoću kormila. Obuhvaća kontrolu gibanja površinskih brodova u horizontalnoj ravnini a podmornica u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini. Kormilarenje se može promatrati sa stanovišta sposobnosti broda da naglo mijenja svoj kurs kad su takve promjene kursa poželjne, i sa stanovišta sposobnosti broda da drži svoj kurs kada se ne želi



Sl. 1. Prikaz broda s bočnim kormilom (pečat grada Dunwicha, XIII st.)



Sl. 2. Prikaz broda s kormilom iza krme (pečat grada Ipswicha, XIII st.)