

Za vrijeme pokušne vožnje brodom upravlja i za brod odgovara osoblje brodogradilišta.

Po povratku s uspješne pokušne vožnje demontiraju se radi pregleda određeni vitalni dijelovi strojeva. Ako je sve u redu, komisija sastavlja primopredajni zapisnik i predaje brod naručiocu. Primopredaja se ne može provesti dok brodogradilište ne otkloni sve bitne greške koje je utvrdila komisija.

Komisija može ustanoviti da je potreban i niz radova koji su doduše bitni ali koji se mogu dovršiti za vrijeme prvog krcanja broda. Spisak tih tzv. završnih radova sastavlja primopredajna komisija i prilaže ga primopredajnom zapisniku. Ponekad se sitniji nedostaci otklanjaju za vrijeme prve vožnje broda, pa se zato na brod ukrcaju odgovarajući radnici brodogradilišta.

Od momenta predaje komande broda brodovlasniku počinje ugovoren garantni rok. Po pravilu se za prvo putovanje, odnosno za prvih 6 mjeseci eksploracije broda, traži da isporučilac glavnog pogonskog stroja dade tzv. garantnog strojara. Ako na brodu ima drugih specijalnih uredaja, poželjno je da kraće vrijeme na brodu bude i garantni stručnjak za te uredaje. I samo brodogradilište može postaviti garantnog inženjera, u kojem se slučaju može, ali ne mora, isključiti garantni strojar i drugi garantni stručnjaci.

Sve nedostatke uočene za vrijeme garantnog roka, a za koje se utvrdi da nisu nastali pogrešnim radom posade, brodogradilište mora popraviti bez naknade. Ako je brod daleko od matičnog brodogradilišta, otklanjanje nedostataka može uprava broda povjeriti najbližem brodogradilištu, a radovi padaju na trošak brodogradilišta koje je brod izgradilo. Po isteku ugovorenog garantnog perioda gase se sve obaveze brodogradilišta.

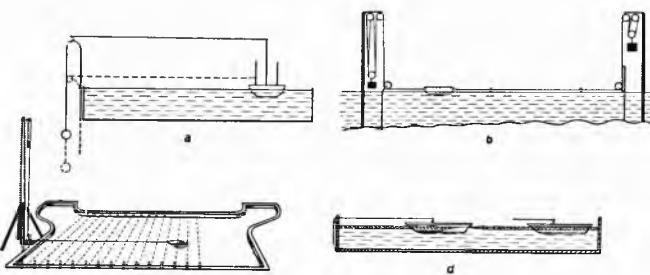
S. Ercegović

EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA U BRODOGRADNJI

Brzi razvoj brodskih konstrukcija i uredaja u posljednjih pedesetak godina velikim je dijelom rezultat eksperimentalnih istraživanja na brodskim modelima i brodovima u prirodoj veličini. Zahvaljujući ispitivanjima modela usavršen je oblik brodskog trupa i oblik brodskih propeler, kormila i privjesaka, a pokusi sa stvarnim brodovima pružili su projektantima i graditeljima brodova i brodskih uredaja vrijedne podatke na temelju kojih se je brod kao cjelina stalno poboljšavao. Konačno, eksperimentalna istraživanja služila su, a i danas služe, kao baza za gotovo sav naučni i teorijski rad na području brodogradnje.

Postoje posebne ustanove namijenjene naučno-istraživačkom radu u vezi s projektiranjem, gradnjom i eksploracijom brodova, kao i s rješavanjem praktičnih problema brodogradevine industrije. Velika većina tih ustanova bavi se brodskom hidrodinamikom, a samo mali broj je ureden za različita specifična tehnološka istraživanja. Sve te ustanove provode gro istraživanja i rješavaju probleme eksperimentalnim putem, proučavajući i istražujući pojedine pojave na modelima brodova, modelima pojedinih dijelova brodske konstrukcije, ili vršeći mjerenja na stvarnim brodovima.

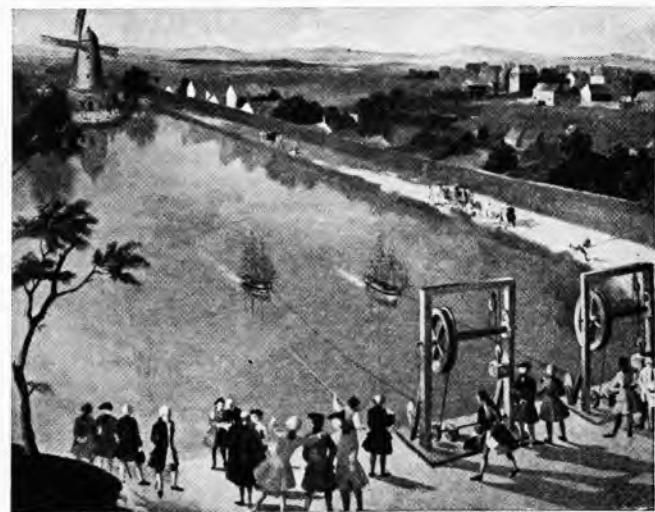
Nemogućnost da se matematičkim putem odredi najpovoljniji oblik brodskog trupa navela je još pred nekoliko stotinu godina brodograditelje, matematičare i fizicare na to da ispitivanjima modela brodova traže oblik broda koji ima najmanji otpor i da odrede zakone zavisnosti otpora broda od oblika njegova trupa.



Sl. 1. Prvi bazeni za ispitivanja brodskih modela. a) Swedenborgov bazen 1721, b) Chapmanov bazen oko 1760, c) bazen u École Militaire u Parizu 1775, d) bazen brodogradilišta Alexander Hall u Aberdeenu 1830

Prvi je ispitivao modele brodova već 1607 Crescenzo u Italiji. U XVII st. Englez Samuel Fortrey (1622—1681) ispitivao je drvene modele brodova, ali je o njegovim metodama ispitivanja i o rezultatima do kojih je došao malo poznato. XVIII stoljeće je naročito obilovalo istraživačima koji su, polazeći uglašnom od Newtonovih postavki, nastojali da nadu idealni oblik brodskog

trupa. 1721 filozof Swedenborg daje opis načina ispitivanja brodskih modela pomoću padajućeg utega koji preko tanke niti tegli model (sl. 1 a). Principi te metode ispitivanja modela primjenjivali su se u različitim varijantama sve do pojave velikih modernih bazena opremljenih kolicima za tegljenje modela, a primjenjuju se još i danas u nekim malim bazenima. 1746 francuski brodograditelji, matematičar i hidrograf Bouquer predlaže ispitivanja brodskih modela u stруju vode i ispitivanje modela dugog do 1 m jednom malom 10-metarskom bazenu. Između 1750 i 1760 švedski brodograditelj Chapman je ispitivanjima modela nastojao potvrditi svoju teoriju o mogućnosti određivanja otpora broda na osnovu linija broda. Chapman je svoja ispitivanja modela vršio pomoću gravitacijskog uredaja sa padajućim utedgom, kakav je bio predložio Swedenborg (sl. 1 b). Englez Bird je 1756 ispitivao modele brodova u 33 m dugom bazenu, ne mijereći direktno otpor, već uspoređujući ispitivane modele s jednim svojim standardnim modelom.



Sl. 2. Ispitivanje brodskih modela u Peerless Pool, London, 1761

1758 britanski Royal Society raspisao je nagradu za ispitivanja modela kojima bi se odredile karakteristike broda povoljnog s obzirom na otpor i ponašanje na moru, pa su 1761 u Peerless Poolu u Londonu provedena takva ispitivanja sa šest različitih modela (sl. 2). 1764 američki političar i filozof Benjamin Franklin je ispitivanjima modela nastojao provjeriti svoja zapažanja iz Holandije da se otpor brodova u kanalima povećava. 1775, po narudžbi francuske Akademije, enciklopedisti D'Alembert, Condorcet i Bossuet su u École Militaire u Parizu izgradili bazen dug 32,6 m, širok 17,2 m i dubok 2,10 m (sl. 1 c) u kojem su ispitivali seriju modela jednostavnih geometrijskih oblika, sistematski mijenjajući oblik pramca. Ta ispitivanja je 1778 nastavio Bossut u bazenu dugom oko 65 m. Mark Beaufoy je između 1793 i 1798 u Greenland Docku u Londonu na vodenoj stazi dugoj 120 m ispitivao modele brodova pomoću složenog uredaja s padajućim utedgom. Uredaj je sadržavao i automatski sat za registriranje brzine modela. Ta su ispitivanja vršena na poticaj novoosnovanog „Društva za unapređenje brodogradnje“, a osim modela pravilnih geometrijskih formi po prvi put su obuhvatala i tegljenje dugih, tankih dasaka da bi se utvrdilo djelovanje otpora treninga. Oko 1850 izradio je William Hall u svome brodogradilištu u Aberdeenu mali stakleni bazen, dug ~ 3 m, širok ~ 30 cm i dubok ~ 40 cm (sl. 1 d). Bazen je bio napunjeno vodom, a na vrhu vode je bio ~ 3 cm debeli sloj prozirnog, crveno obojenog terpentina. Male modelе je teglio padajući utedg. Pri tome se promatralo gibanje obojene tekućine oko modela i tako dobivala slika rasporeda strujanja oko različitih formi trupa broda. To je bio prvi bazen izgrađen u čisto komercijalne svrhe, jer je služio isključivo za ispitivanja modela jedrenjaka-klipera koje je gradilo brodogradilište

Medutim, sva ta rana ispitivanja nisu mogla dati neke korisnije rezultate jer nije postojala naučna osnova za pravilno interpretiranje izmjerenih podataka. Tu osnovu je 1869 dao engleski inženjer William Froude svojim zakonom sličnosti. Taj zakon bio je već 1844 postavio francuski inženjer Rech, ali on nije pokazao mogućnost njegove primjene u praksi. Zahvaljujući svojim postavkama o mogućnosti da se kvalitet oblika brodskog trupa pouzdano odredi ispitivanjima modela, William Froude je uspio od britanskog Admiralitetit ishoditi sredstva za gradnju bazena, pa je 1871 u Torquayu izgrađen bazen 85 m dug, 11 m širok i 3 m dubok. U ovom bazenu prvi put su modelе tegili posebna kolica koja su se kretala po tračnicama postavljennim iznad njega. Današnji moderni bazeni za ispitivanja brodskih modela u principu su jednak Froudeovom bazenu u Torquayu, samo što su znatno veći i opremljeni preciznijim mjernim uredajima. I metode ispitivanja modela brodova još danas se zasnivaju na principima što ih je postavio W. Froude.

Bazen u Torquayu je bio privremenog karaktera, pa je 1886 srušen. Kroz kratki vijek postojanja bazena u Torquayu W. Froude je uspio potvrditi pravilnost svog zakona sličnosti i pokazati kolike mogućnosti pružaju ispitivanja modela brodova u rješavanju niza hidrodinamičkih problema. Direktna posljedica prvih Froudeovih uspjeha s ispitivanjima modela brodova bila je gradnja sličnih bazena u Engleskoj i ostalim zemljama s razvijenom brodogradnjom. Tako su nastale i prve specijalizirane ustanove za naučno-istraživački rad na području brodogradnje.

1873 sagradio je Tideman za potrebe holandske ratne mornarice bazen u Amsterdamu. 1884 brodogradilište Williama Dennyja podiglo je u Dumbartonu vlastiti bazen za ispitivanja brodskih modela; taj je bazen još uvijek u upotrebi. 1886 britanski Admiralitet gradit u Haslaru bazen koji također još i danas postoji. 1889 sagraden je bazen u Speziji, 1891 u Petrogradu, 1892 u Dresdenu, 1899 u Washingtonu, 1903 u Berlinu, 1906 u Parizu, 1908 u Nagasakiju. Nakon tog vremena broj ustanova koje se bave eksperimentalnim istraživanjima u brodskoj hidrodinamici neglo je rastao.

U razdoblju od pojave prvog modernog bazena u Torquayu 1871 pa do konca Drugog svjetskog rata osnovano je 49 institucija koje su se bavile ispitivanjima brodskih modela i u okviru kojih je bilo izgrađeno 74 bazena za ispitivanja brodskih modela. Uslijed razaranja u oba svjetska rata ili zbog zastarlosti u tom periodu prestalo je da se bavi ispitivanjima brodskih modela ili uopće

prestalo postojati 6 institucija, odnosno srušeno je ili napušteno 17 bazena. Za to razdoblje je karakteristično da su institucije za naučno-istraživački rad u brodskoj hidrodinamici podizane samo u pomorskim zemljama sa visokom razvijenom brodogradnjom. Nadalje, građeni su samo bazeni koji su po svojoj opremljenosti i uređajima bili replika prvog Froudeovog bazena, a služili su gotovo isključivo za ispitivanje otpora i propulzije brodskih modela u idealno mirnoj vodi. I konično, u institucijama za ispitivanja brodskih modela radili su samo stručnjaci-brodograditelji, koji su obavljali sve poslove od projektiranja mernih instrumenata, razvijanja mernih metoda, standardnih i rutinskih ispitivanja modela pa do čisto teorijskih i fundamentalnih istraživanja.

Poslije Drugog svjetskog rata osnovane su 22 ustanove za ispitivanje brodskih modela i za naučno-istraživački rad na području hidrodinamike broda, tako da je 1965 postojalo oko 70 takvih ustanova u 26 zemljama. U okviru već ranije postojećih ili novosagrađenih instituta podignuto je u tom razdoblju preko 70 novih bazena za ispitivanja brodskih modela. Skoro polovina novoizgrađenih uređaja za ispitivanja brodskih modela nisu klasičnog tipa, već su specijalni bazeni kakvi ranije nisu postojali, a namijenjeni su ispitivanju modela na valovima, na plitkoj vodi, ispitivanju kormilarenja i sl. Nadalje, instituti za ispitivanja brodskih modela ne podižu se samo u zemljama sa razvijenom brodogradnjom, već i u zemljama bez velike brodogradne industrije i bez jake flote. Pokazalo se da su ustanove za ispitivanja brodskih modela od velike koristi i u zemljama koje teku počinju razvijati svoju brodogradnju, jer je moderna brodogradnja nemoguća bez intenzivnog naučno-istraživačkog rada i bez ispitivanja brodskih modela. Pored toga, ovakve ustanove igraju značajnu ulogu u razvoju naučne misli i odgoju visoko stručnih kadrova. Zato danas i većina brodogradne fakultete raspolaže manjim bazenima za ispitivanja brodskih modela u kojima se, pored rada i vježbi sa studentima, često odvijaju intenzivna i značajna fundamentalna istraživanja.

Priširenje područja rada ustanova za istraživanja problema brodske hidrodinamike na nestacionarne pojave gibanja broda na valovima imalo je za posljedice

Tablica 1
NAJZNAČAJNIJE INSTITUCIJE ZA ISPITIVANJA BRODSKIH MODELA

Zemlja	Naziv i mjesto institucije	Godina gradnje	Dimenzije bazena			Namjena*
			dužina m	širina m	dubina m	
Engleska	Admiralty Experiment Works, Haslar	1932	271,0	12,2	5,5	KV
		1960	122,0	61,0	5,48	
	National Physical Laboratory — Ship Division, Teddington	1911	167,5	9,15	3,74	
Danska		1932	206,7	6,1	2,7	
	National Physical Laboratory — Ship Division, Feltham	1959	397,0	14,63	7,63	
	Laboratoriet for teknisk hydro- og aerodinamik, Lyngby	1959	240,0	12,0	6,1	
Francuska	Bassin d'essais des carènes, Paris	1945	promjer 65,0	5,0	K	P
		1950	155,0	8,0	2,0	
		1960	220,0	13,0	4,0	
Italija	Vasca Nazionale per le esperienze di Architettura Navale, Roma	1930	275,0	12,5	6,5	
Japan	Ratna mornarica, Tokio	1958	255,0	12,5	7,25	B
		1958	346,0	6,0	3,0	
	Transportation Technical Research Institute, Tokio	1927	200,0	10,0	6,0	
Jugoslavija		1941	207,0	8,0	4,0	
	Institut za brodsku hidrodinamiku, Zagreb	1959	276,3	12,5	6,5	B
		1959	303,8	5,0	3,45	
Nizozemska		1959	promjer 32,02	2,65	K	
	Nederlandsche Scheepsbouwkundig Proefstation, Wageningen	1932	252,0	10,5	5,5	V
		1956	100,0	24,5	2,5	
Njemačka		1958	200,0	16,5	1,0	
	Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt, Hamburg	1955	200,0	18,0	6,0	P
	Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin	1903	250,0	8,2	4,85	
Španija	Volkseigene Schiffbau-Versuchsanstalt, Berlin	1953	280,0	9,0	4,5	
	Canal de experiencias hidrodinámicas, Madrid	1934	320,0	12,5	6,5	V
SSSR	Sudostroitel'nyj institut im. Krylova, Leningrad	1950	672,0	15,0	7,0	P
		1950	218,0	16,0	2,0	
Švedska	Statens Skeppsprovninganstalt, Göteborg	1940	170,0	70,0	5,5	V
U. S. A.	David Taylor Model Basin, Cardroc	1940	845,8	15,5	6,7	B
		1941	905,0	6,5	3,5	
		1961	promjer 79,4	6,1	K	
		1961	110,0	73,2	6,1	

* B — bazen za ispitivanje brzih modela, K — bazen za ispitivanje kormilarenja, P — bazen za ispitivanje na plitkoj vodi, V — bazen za ispitivanje ponašanja na valovima. Ostali su normalni bazeni.

dicu da su u radu tih ustanova postali neophodni matematičari, fizičari i oceanografi. Primjena elektronike u mjerenoj tehnici i upotreba električnih računskih strojeva zahtijevali su da se u rad tih institucija uključi i elektrometri. Tako danas u tim ustanovama ne rade više isključivo brodograditelji, već i niz stručnjaka i naučnih radnika sa drugim područjima. Pregled najvažnijih postojećih institucija za ispitivanje brodskih modela prikazan je u tablici 1.

1959 otvoren je u Zagrebu Institut za brodsku hidrodinamiku (sl. 3). To je moderno opremljen institut koji ima četiri bazena za ispitivanje modela brodova i dva kavitacijska tunela za ispitivanje modela propelera.

Pored naučnih ustanova koje se bave hidrodinamikom broda, nakon Drugog svjetskog rata podignuto je i nekoliko laboratorijskih i instituta za rješavanje tehničkih problema brodogradnje. Radi se o ustanovama koje istražuju i ispituju materijale za gradnju brodova, metode zavarivanja, nova konstruktivna rešenja pojedinih elemenata broda, zaštite boje i premaze za brodogradnju, nove tipove brodskih pogonskih uređaja itd. Te ustanove po svojim metodama rada i po svojoj opremljenosti odgovaraju sličnim institucijama za tehnička istraživanja u drugim granama tehnike.

Djelatnost ustanova za istraživanja na području brodske hidrodinamike zasniva se prvenstveno na ispitivanjima modela brodova, a tek manjim dijelom na čisto matematičkim analizama. Za ispitivanja modela brodova služe različiti tipovi bazena, strujnih kanala, kavitacijskih tunela i sličnih uređaja. Vrše se i mjerjenja na stvarnim brodovima radi dobivanja podataka o ponašanju broda u uvjetima pokusne vožnje ili uvjetima službe.

Bazeni i uređaji za tegljenje modela. *Normalni bazeni* za ispitivanje brodskih modela dugački su betonski kanali, većinom pravokutnog poprečnog presjeka, napunjeni slatkom vodom. O dimenzijama bazena ovisi veličina modela koji se u njemu mogu ispitivati. Kad se u bazenu tegli model broda, on ima nešto veći otpor nego što bi ga imao da se tegli u vodi neograničene dubine i širine. Bočni zidovi i dno bazena ne dopuštaju strujanje oko trupa modela da se razvije kao u potpuno neograničenoj vodi, što ima za posljedicu povećanje srednje brzine strujanja oko modela, a time i povećanje otpora. Nadalje, dno bazena djeluje na formiranje sistema valova koje stvara model ako visina vode između kobilice modela i dna bazena nije dovoljno velika. Ako postoji takav utjecaj dna bazena, otpor valova modela se povećava. Povećanje brzine strujanja vode oko modela uslijed utjecaja zidova bazena može se odrediti pomoću formule Hugesa:

$$\frac{\Delta v}{v} = 0,48 \frac{V}{A^{2/3}} + \frac{m \text{Fr}^2}{1 - \text{Fr}^2},$$

gdje je Δv srednje povećanje brzine strujanja s obzirom na model uslijed utjecaja zidova bazena, v brzina modela, A površina poprečnog presjeka bazena, V volumen istisnine modela, m faktor začepljenja ($= V/L A$, pri čemu je L dužina modela), Fr Froudeov broj za dubinu bazena ($= v/\sqrt{g h}$, pri čemu je g ubrzanje teže a h dubina bazena). Hughesova formula služi pri izboru dubine i širine bazena za neku određenu veličinu modela, ili obratno, za korigiranje rezultata ispitivanja modela. Da ne bi došlo do utjecaja dna bazena, dubina vode u bazenu (u metrima) mora biti $h \geq 0,204 v^2$, gdje je v brzina modela u m/sek.

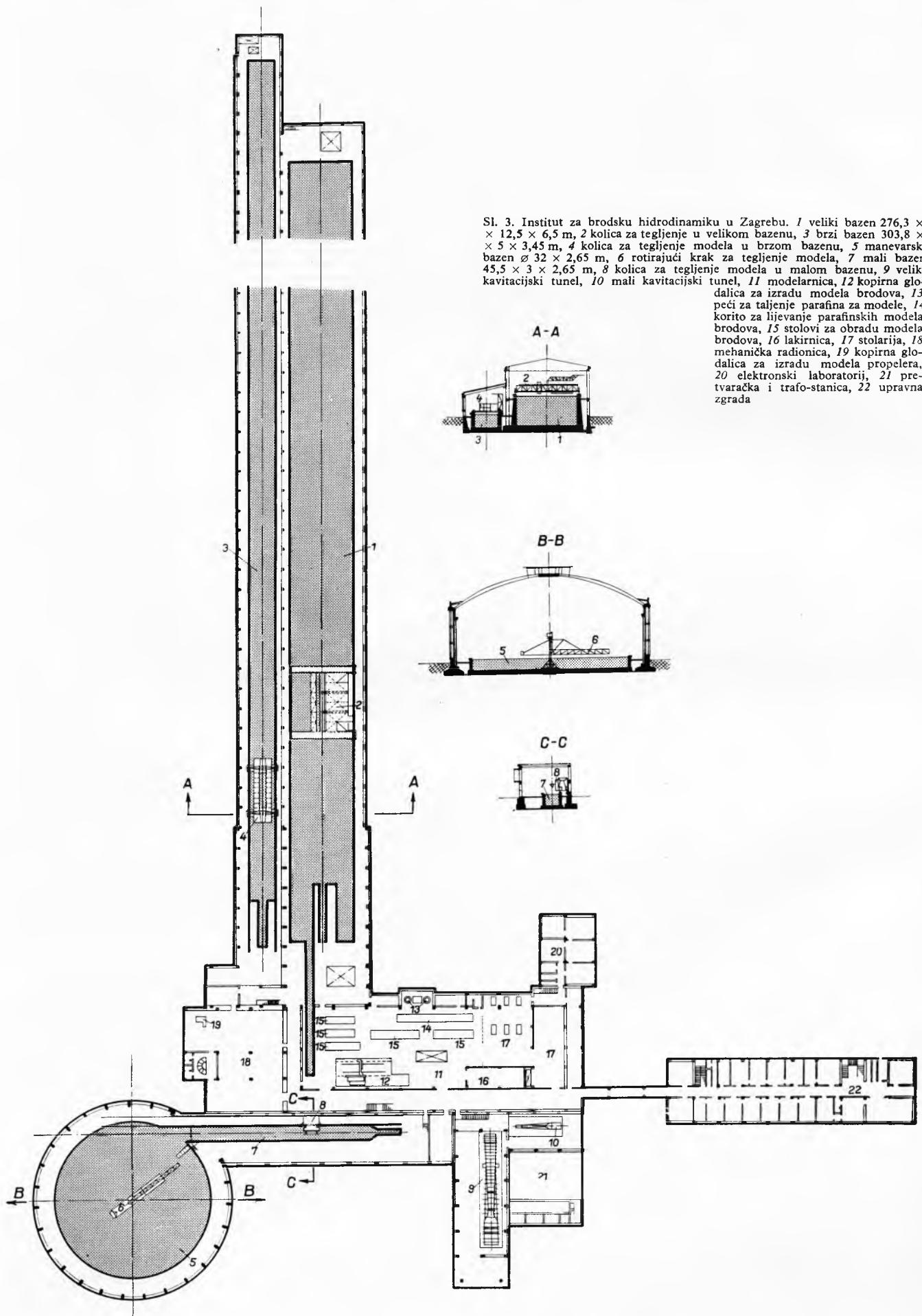
Postoje i empirijska približna pravila kojima se određuje odnos između širine i dubine bazena i dimenzija modela da bi se izbjegao utjecaj zidova bazena. Jedno od tih pravila jest da širina bazena mora biti 15 puta veća od širine modela, a dubina bazena 20 puta veća od gaza modela. Drugo je pravilo da površina poprečnog presjeka bazena mora biti 250 puta veća od površine glavnog rebra modela.

Dužina bazena ovisi o maksimalnim brzinama tegljenja modela i o raspoloživim mernim instrumentima. Dužina bazena mora biti dovoljna za ubrzanje modela, obavljanje mjerjenja i zaustavljanje modela. Put potreban za ubrzanje i zaustavljanje ovisi o uređaju za tegljenje modela. Vrijeme potrebno za obavljanje mjerjenja ovisi o mernim instrumentima. Samoregistrirajući elektronski instrumenti trebaju svega nekoliko sekundi da zabilježe izmjerenu vrijednost, pa je time i dužina puta mjerena manja. Dužina bazena može se odrediti iz izraza:

$$L_B = v_m \left(\frac{v_m}{2a} + \frac{v_m}{2r} + t \right) + 4,5 L,$$

gdje je L_B dužina bazena, v_m maksimalna brzina modela, a maksimalno dozvoljeno ubrzanje modela (ovisi o uređaju za tegljenje modela), r maksimalno dozvoljeno usporjenje modela (ovisi o uređaju za tegljenje modela), t vrijeme potrebno za mjerjenje, L dužina modela.

Ovisno o namjeni, normalni bazeni za ispitivanje brodskih modela dugi su od 20 do preko 1000 m. Bazeni ispod 40 m dužine



namijenjeni su prvenstveno nastavnim svrhama i naučno-istraživačkom radu, a rijedko služe i za komercijalna ispitivanja brodskih modela. U tim bazenima se ispituju mali modeli dužine reda veličine 1 m, pa je zbog utjecaja mjerila otežana pouzdana ekstrapolacija rezultata na prilike stvarnog broda. S malim modelima brodova redovito je nemoguće vršiti pokuse vlastitog pogona, jer u modelu nema dovoljno prostora za smještaj pogonskog uredaja i potrebnog instrumentarija. Zbog toga se rad takvih bazena većinom ograničava na kvalitativna ispitivanja otpora različnih brodskih formi i studijska istraživanja pojedinih komponenti otpora. Takvi mali bazeni obično se nalaze u okviru laboratorija brodograđevnih fakulteta.

Bazeni za komercijalna ispitivanja brodskih modela i za rješavanje praktičnih problema oblika i propulsije novih projekata brodova dugi su od 100 do 300 m. Bazeni dužine preko 300 m služe za ispitivanja modela naročito brzih brodova i za različna fundamentalna istraživanja koja zahtijevaju tegljenja modela, profila i strujnih tijela velikim brzinama.

Normalni bazeni za ispitivanje brodskih modela opremljeni su posebnim uredajima za tegljenje ili praćenje modela. Najjednostavnije je tegliti model pomoću gravitacijskog uredaja, koji se zasniva na principima postavljenim još početkom XVIII st. Gravitacijski uredaj sastoji se od tanke žice i sistema kolotura i utega. Žica je razapeta duž središnjice bazena i na nju je vezan model. Na krajevima bazena žica prelazi preko sistema kolotura; na jednom kraju učvršćen je na nju uteg koji slobodno pada i vuče žicu, a time i model, a na drugom kraju protuteg koji drži žicu napetom. Otpor modela je jednak razlici težina utega i protutega. Brzina gibanja modela se obično određuje iz broja okretaja jednog od kolotura preko kojih prelazi žica.

Početkom XX st. njemački inženjer Wellenkamp je usavršio gravitacijski uredaj za tegljenje modela zamjenivši padajući uteg električkim vitlom na koje se namata žica (sl. 4). Prije nego se namota na vitlo žica prelazi preko sistema koloturnika vezanih na dinamometar koji pokazuje silu u žici, a ta je jednaka sili otpora modela.

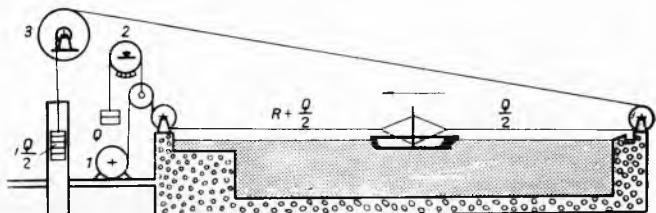
Tegljenje modela pomoću žice dolazi u obzir samo za male modele u bazenima od ~ 35 m dužine, jer u dužim bazenima progib i težina žice utječu na rezultate mjerjenja. Ovakvi uredaji omogućavaju brzine tegljenja modela do 4 m/sec. Prednost uredaja za tegljenje modela žicom je jednostavnost izvedbe i rukovanja, niska cijena i relativno visok stepen tačnosti mjerjenja.

Većina bazena dužine od 50 do 100 m opremljena je za tegljenje modela laganim kolicima koja se kreću po jednoj tračnici učvršćenoj iznad sredine bazena (sl. 5). Takva kolica su redovito bez posade, a na sebi nose mjerne instrumente i uredaje za registriranje mjernih podataka. Kolica imaju ili vlastiti pogonski

motor sa daljinskim upravljanjem ili pogon na beskonačno uže pokretano vitlom na kraju bazena. Zbog male težine kolica put ubrzanja i zaustavljanja je kratak, a brzine tegljenja su velike, i preko 30 m/sec.

Bazeni preko 100 m dužine redovito imaju za tegljenje modela velika kolica koja se kreću po tračnicama učvršćenim na bočnim zidovima bazena (sl. 6). Za pogon kolica služe elektromotori sa Ward-Leonardovom ili elektroničkom regulacijom napona, čime se osigurava jednolika brzina kretanja kolica. Kolica su čelične konstrukcije, sastavljene od različnih tipova rešetkastih nosača ili cijevi. Osnovni je zahtev da konstrukcija bude kruta i bez vibracija koje bi utjecale na rad mjernih uredaja. Kolica imaju od 4 do 20 kotača i posebne kotač-vodilice koji sprečavaju da kolica skoče sa tračnica. Tračnice moraju biti izvedene vrlo precizno i vodoravne unutar 0,1 mm, jer svaka neravnost tračnica izaziva promjene brzine kolica, a može biti uzrok i vibracijama.

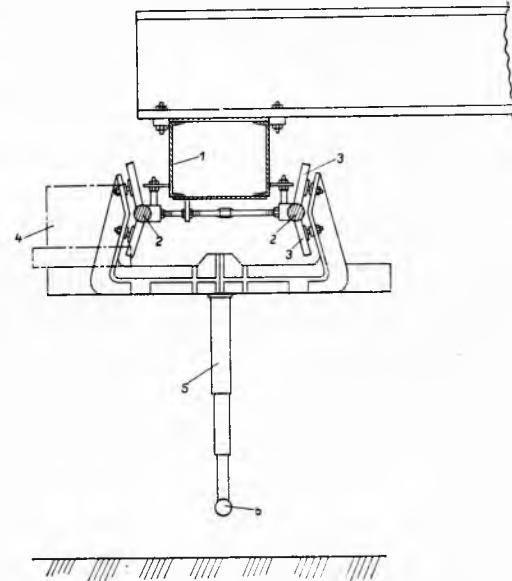
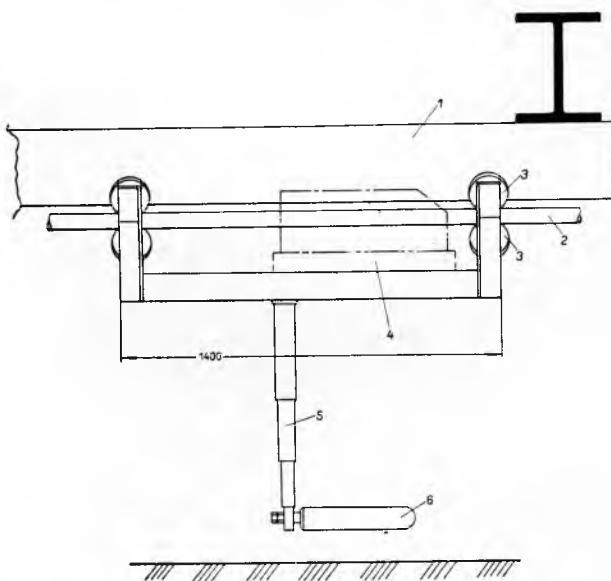
Na kolicima su, osim pogonskih motora, smješteni mjerni i kontrolni uredaji i platforma za osoblje koje obavlja ispitivanja. Ovisno o širini bazena i jačini pogonskih motora, težina ovakvih kolica iznosi od 10 do 30 tona, a prosječna maksimalna brzina 8-14 m/sec.



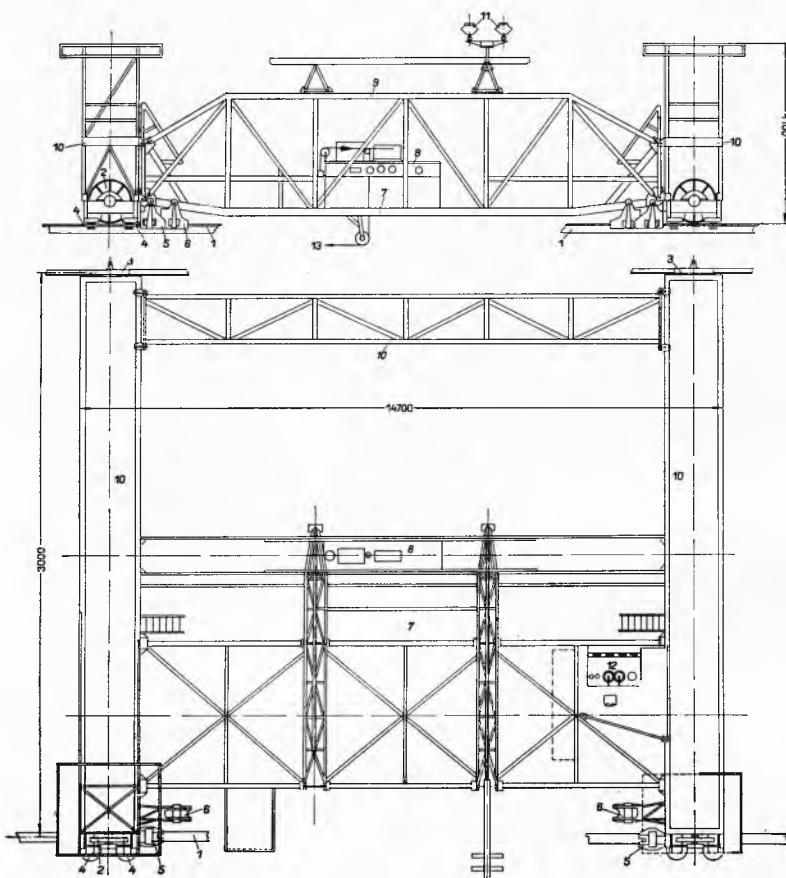
Sl. 4. Wellenkampov uredaj za tegljenje modela. 1 vitlo, 2 dinamometar, 3 kolo na vretenu. R otpor modela, Q težina utega koji drži žicu napetom, i odnos promjera kola i vretena

Kolica za ispitivanje vrlo brzih modela imaju naročito snažne pogonske motore, a često su im kotači obloženi tvrdom gumom da se poveća trenje i spriječi klizanje kotača na tračnici prilikom naglog ubrzanja ili usporenja kolica. Da bi se put ubrzanja što više skratio, ponekad se upotrebljavaju i katapulti koji u kratko vrijeme daju kolicima veliko ubrzanje. Za zaustavljanje kolica služi nekoliko tipova automatskih kočnica koje se na kraju bazena same aktiviraju. Ovakva kolica imaju brzinu od 20 do 35 m/sec.

Velika kolica za tegljenje modela ne moraju uvek imati vlastite pogonske motore, nego ih preko beskonačnog užeta može vući električko vitlo smješteno na jednom kraju bazena. Takva kolica su vrlo lagana jer nose samo mjerne instrumente i osoblje



Sl. 5. Lagana ovješena kolica za tegljenje modela u bazenu Convair u San Diegu. 1 nosač tračnice kolica, 2 tračnica kolica, 3 kotači kolica, 4 prostor za mjerne instrumente, 5 teleskopski krak za učvršćenje modela, 6 dinamometar



Sl. 6. Kolica za tegljenje modela u velikom bazenu Instituta za brodsku hidrodinamiku u Zagrebu. 1 tračnice, 2 pogonski kotači kolica, 3 slobodni kotači kolica, 4 kotači vodilice, 5 pneumatska kočnica kolica, 6 automatska mehanička kočnica kolica, 7 mjerna platforma, 8 stol za mjerne instrumente, 9 rešetkasta konstrukcija, 10 platforma odn. pomični most za promatranje, 11 oduzimač struje, 12 upravljačko mjesto kolica, 13 nit preko koje se tegli model

od krajeva bazena, pa se model broda može ispitivati samo s valovima u pramac ili u krmu.

Ako se na glavna kolica za tegljenje modela postave posebna mala kolica koja se kreću poprečno na uzdužnu os bazena, moguće je u normalnom bazenu vršiti i neka ispitivanja kormilarenja. Model pričvršćen na mala kolica može se uzduž bazena kretati ne samo pravolinijski već i po cikcak-linijski ili po krivudavoj putanji.

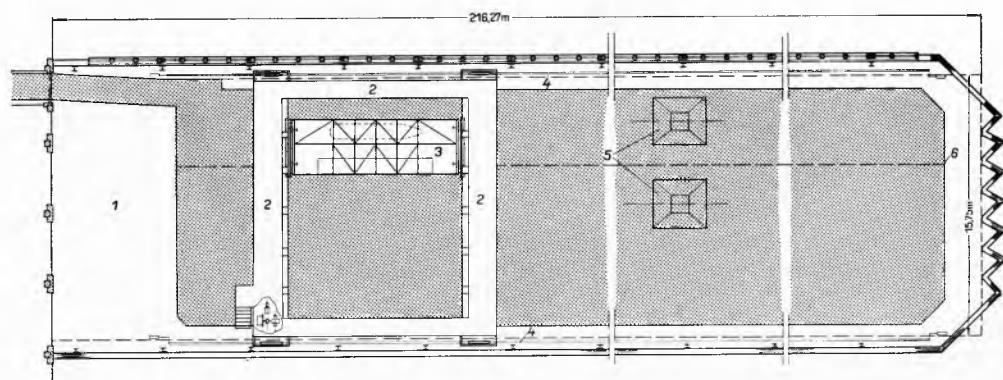
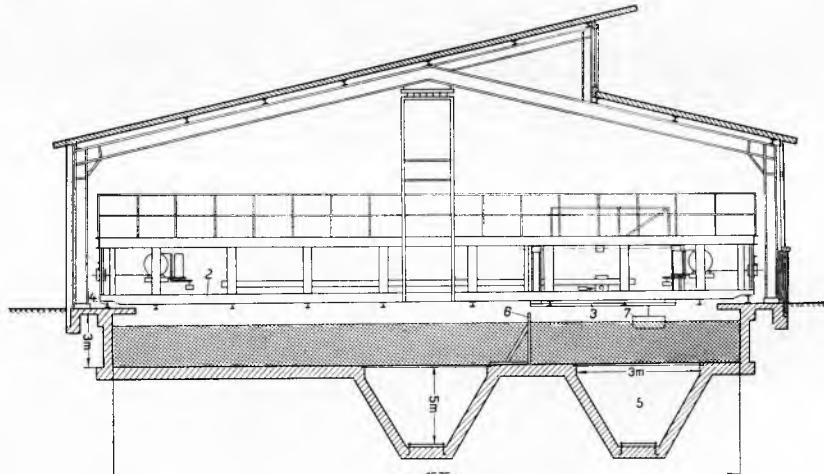
Zbog nemogućnosti da se u normalnom bazenu uspješno vrše neka važna specijalna ispitivanja modela brodova, kao što su ispitivanja na valovima, na plitkoj vodi, pokusi kormilarenja i sl., razvili su se u novije vrijeme specijalni tipovi bazena.

Bazen za ispitivanja na plitkoj vodi u principu je jednak normalnom bazenu, samo je znatno pliči. Dubina vode se kreće od 0,2 do 2 m i u tim granicama se može regulirati sruštanjem ili dizanjem nivoa vode u bazenu. Smanjenjem dubine vode povećava se utjecaj bočnih zidova, pa su zato plitki bazeni široki i do 20 m, da bi se utjecaj bočnih zidova izbjegao i postigao efekt plitke, ali u širinu neograničene vode. Plitki bazeni nisu duži od 200 m jer su brzine tegljenja modela niske, pa je potreban kratak put za ubrzanje i zaustavljanje kolica. Veća dužina bazena potrebna je jedino za ispitivanje sastava teglenica, jer jedan model takvog sastava može biti dug i do 40 m. Mjerna platforma na ko-

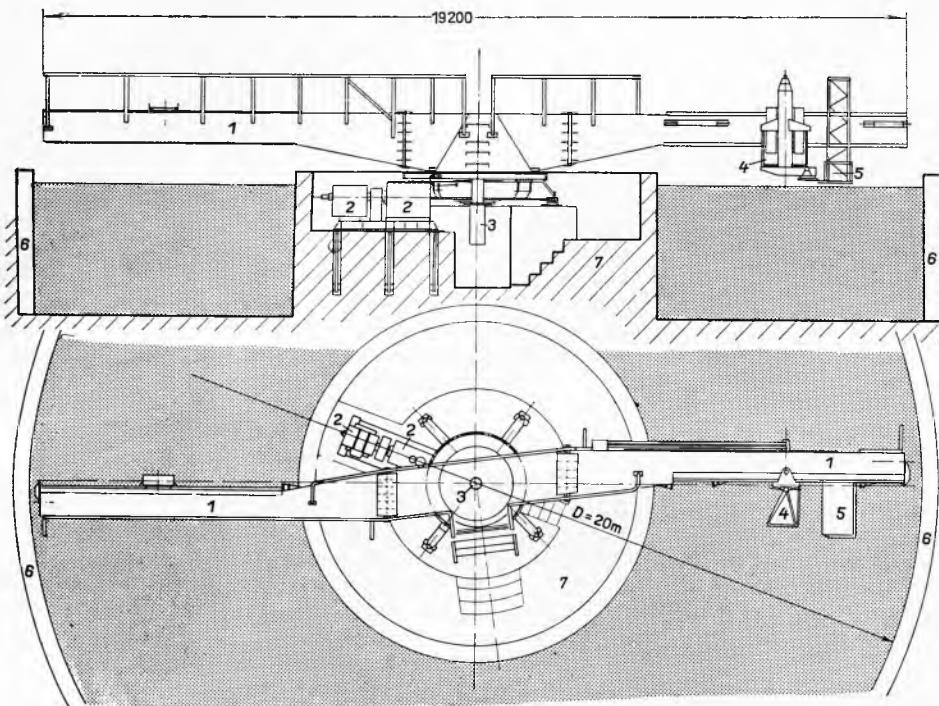
koje obavlja mjerena. Ubrzanje i zaustavljanje kolica traje kratko vrijeme jer ne ovisi o trenju između kotača i tračnica, već samo o snazi vitla za vuču; stoga je ovaj tip kolica prikladan za velike brzine. Prva kolica za tegljenje modela koja je W. Froude izgradio u bazenu u Torquayu bila su ovog tipa, a teglilo ih je parno vito.

Normalni bazeni su ponekad opremljeni i specijalnim uredajima koji služe za pojedinu specifična ispitivanja brodskih modela. Za ispitivanje modela rječnih brodova bazen može imati, pored čvrstog dna, još jedno pomično dno, obješeno na bočne zidove bazena. To se dno može podizati i time po potrebi smanjiti dubina vode, da bi se postigla sličnost s ograničenom dubinom vode u rijeci. Ovakvo pomično dno je relativno skupo, dizanje i podešavanje dna je dugotrajno, a zbog elastičnosti obješenog dna i nesavršenog brtvljenja između rubova dna i bočnih zidova bazena, rezultati ispitivanja modela u takvim uvjetima nisu potpuno pouzdani.

Za ispitivanje modela na valovima može se upotrijebiti i normalni bazen opremljen generatorom valova. Generator valova je smješten na jednom



Sl. 7. Bazen za ispitivanja brodskih modela na plitkoj vodi (Nederlandsche Scheepsbouwkundig Proefstation u Wageningenu, Nizozemska). 1 radna platforma, 2 kolica za tegljenje modela, 3 pomični mjeri most, 4 tračnice kolica, 5 zdenac za fotografiranje i promatranje podvodnog dijela modela, 6 pomična pregrada, 7 model broda



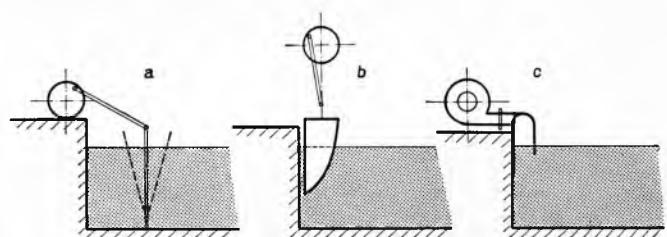
Sl. 8. Rotirajući krak za tegljenje modela, Brodograđevni fakultet, Rostock. 1 glavni nosač rotirajućeg kraka, 2 pogonski elektromotori, 3 osovina rotirajućeg kraka, 4 višekomponentna vaga, 5 promatračka platforma, 6 bočni zid bazena, 7 temeljni otok rotirajućeg kraka

licima obično je podesiva po visini, kako bi se mogla prilagoditi visini nivoa vode u bazenu. Moderni plitki bazeni imaju dno izvedeno tako da se mogu ugraditi posebne montažne uzdužne pregrade, čime se smanjuje širina bazena i dobivaju uvjeti kanala ili uskih rijeka. Postoji i mogućnost fotografskog snimanja strujanja oko modela kroz prozore ugradene u dnu bazena (sl. 7).

Bazeni za ispitivanje kormilarenja na modelima brodova mora biti dovoljno prostran da bi model mogao napraviti puni krug okretanja. Zbog toga su ti bazeni kružnog ili kvadratnog tlocrta.

Kormilarska svojstva modela ispituju se na dva osnovna načina: model je ili vezan za rotirajući krak ili potpuno sloboden. Rotirajući krak zamjenjuje kolica za tegljenje modela i nosi sav mjeri uredaj (sl. 8). Krak se okreće oko stupa učvršćenog u sredini bazena, a slobodni kraj kraka može imati kotače koji se kreću po kružnoj tračnici na bočnom zidu bazena. Model broda je vezan za krak preko višekomponentne vase koja mjeri vrijednosti karakteristične za određivanje kormilarskih svojstava ispitivane forme trupa broda ili kormila. Pri drugom načinu ispitivanja model je potpuno slobodan, upravljan daljinski ili sa rotirajućeg

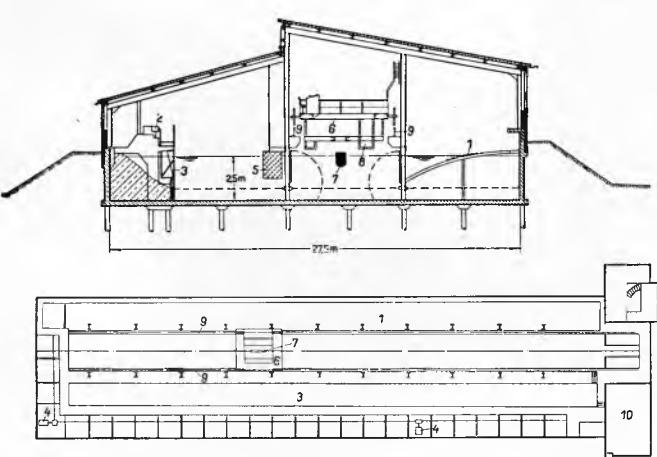
Postoje tri osnovna tipa generatora valova: generator s oscilirajućom pločom, generator s uronjenim tijelom i pneumatski generator (sl. 10). Prvi tip stvara valove pomoću ploče koja oscilira oko zgoba kojom je njen donji rub vezan za dno bazena.



Sl. 10. Tipovi generatora valova. a generator valova s oscilirajućom pločom, b generator valova s uronjenim tijelom, c pneumatski generator valova

Generator valova s uronjenim tijelom stvara valove time što se jedno tijelo trokutastog presjeka, djelomično uronjeno u vodu, giba gore-dolje. Pneumatski generator valova stvara valove pomoći snažnih ventilatora koji imaju ispušnu cijev smještenu ispod površine vode. Bazen za ispitivanje modela na valovima mora imati niz generatora valova čiji je rad unaprijed programiran, kako bi se dobio određeni sistem valova. Reflektiranje valova od slobodnih zidova bazena sprečavaju plaže i apsorberi valova postavljeni duž tih zidova. Kolica za tegljenje modela u principu su jednaka kao u normalnom bazenu. Zbog velike širine bazena, kolica ne presvoduču čitav bazen, već se kreću po tračnicama učvršćenim na stupovima unutar samog bazena, ili su objesena o tračnicu iznad bazena. Kolica nose više mjernih instrumenata nego kolica normalnog bazena jer se pri ispitivanju modela na valovima istovremeno mjeri veći broj veličina. Zbog složenosti i opsežnosti, programiranje ispitivanja na valovima i analize dobivenih podataka zahtijevaju upotrebu elektroničkog računala.

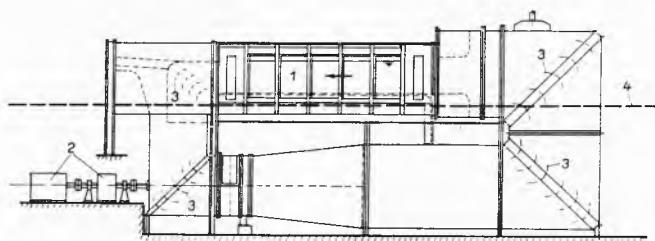
Strujni kanal ima snažne pumpe koje izazivaju strujanje vode, a ispitivani model stoji učvršćen na mjestu. Mjerna sekcija, u kojoj je smješten model, duga je od 5 do 18 m, široka od 1 do 6,5 m a duboka od 0,5 do 2,5 m. Strujni kanal može biti izveden na dva različita načina: horizontalno ili vertikalno. Horizontalni tip ima tlocrtni oblik izduženog slova O. U jednom izduženom kraku smještena je impelerna pumpa koja izaziva cirkulaciju vode.



Sl. 9. Bazen za ispitivanja modela brodova na valovima (Nederlandsche Scheepsbouwkundig Proefstation u Wageningenu). 1 prigušivači valova, 2 reduktorska kutija generatora valova, 3 pokretna ploča generatora valova, 4 pogonski elektromotor generatora valova, 5 filter za valove, 6 kolica za tegljenje modela, 7 model broda, 8 mjerna platforma kolica, 9 tračnice kolica, 10 radionica

kraka koji prati model. Model nosi pogonski elektromotor i sve mjerne uređaje koji registriraju izmjerene podatke ili ih daljinski dostavljaju na komandno mjesto.

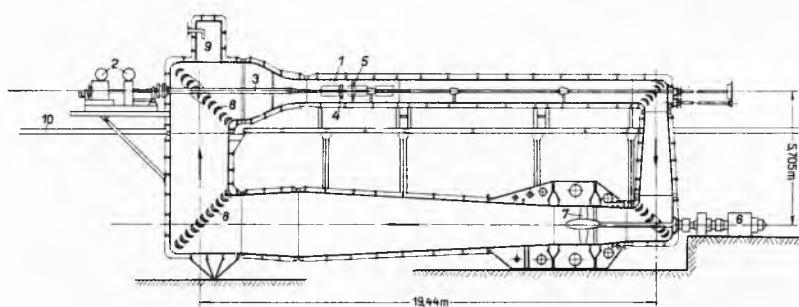
Bazeni za ispitivanje poнашавања бродова на воловима izgrađeni su tek poslije 1956. Taj tip bazena je relativno vrlo širok zbog prostora potrebnog za smještaj generatora valova i dužine potrebne da se valovi razviju. Da bi se u bazenu mogli stvarati različiti pravilni i nepravilni sistemi valova, generatori valova su smješteni uz jedan uzdužni i uz jedan poprečni zid bazena (sl. 9). Uzima se da specijalni bazen za ispitivanja brodskih modela na valovima mora biti ~ 5 puta širi od normalnog bazena za iste dimenzije modela. Dubina bazena mora biti tolika da dno bazena ne deformira stvorene valove. Ta dubina može se odrediti iz izraza: $h \geq \lambda/0,5 \pi$, gdje je λ maksimalna dužina valova koji se stvaraju u bazenu.



Sl. 11. Strujni kanal (Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau u Berlinu). 1 mjerne sekcija, 2 pogonski elektromotor impelerne pumpe, 3 skretne lopatice, 4 radna platforma

Taj je dio bazena izведен kao zatvorena cijev. U drugom izduženom kraku se nalazi mjerne sekcija koja je s gornje strane otvorena.

Drugi tip strujnog kanala ima oblik okomito postavljenog paralelograma (sl. 11). Otvorena mjerne sekcija se nalazi na gornjem dijelu, a okomiti krakovi i donji dio, u kojem je impelerna pumpa, potpuno su zatvorene cijevi. Osnovni zahtjev je pravilno i homogeno strujanje u mjernej sekciji strujnog bazena. Brzina strujanja mora biti jednolična unutar 1–2%. Radi toga u svim koljenima kanala, gdje je strujanje vode zakriviljeno, moraju postojati skretne lo-



Sl. 12. Veliki kavitacijski tunel Instituta za brodsku hidrodinamiku u Zagrebu. 1 mjerne sekcija poprečnog presjeka 1×1 m, 2 propeler-dinamometar, 3 osovinica modela propelera, 4 model propelera, 5 mjerac brzine strujanja vode, 6 pogonski elektromotor impelera, 7 impelerna pumpa, 8 skretne lopatice, 9 kompenzacijski dom s priključkom na zračnu pumpu, 10 radna platforma

paticice koje prigušuju vrtloženje i usmjeruju strujanje, a ispred mjerne sekcije su mreže, filtri i vodilice koji ujednačuju strujanje. Maksimalna brzina strujanja vode u strujnom bazenu je ~ 5 m/sek. (Uporedi Aerotunel).

Strujni bazen se upotrebljava većinom za ispitivanja profila, nosivih krilaca, kormila i sl., a rijede modela brodova.

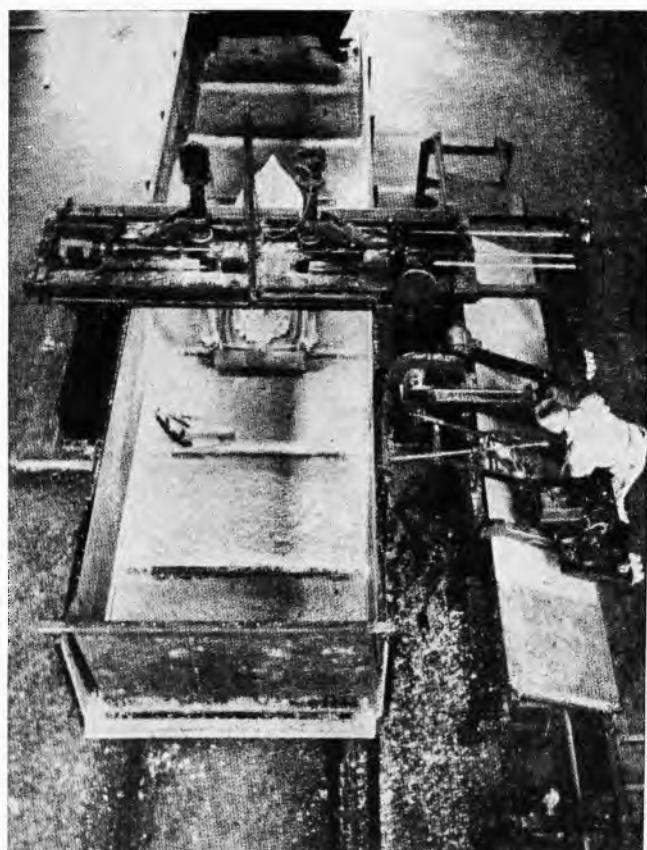
Kavitacijski tunel je po svojoj konstrukciji sličan okomitom strujnom kanalu. Ima oblik okomito postavljene kružne cijevi i potpuno je zatvoren jer se u njemu mora podešavati pritisak od potpritiska do nekoliko atmosfera natpritiska, kako bi se mogao postići kavitacijski broj pri kome treba izvesti ispitivanja. Kavitacijski tunel je namijenjen prvenstveno ispitivanju pojave kavitacije na modelima brodskih vijaka, ali se u njemu mogu ispitivati također različiti profili i strujna tijela i proučavati pojave koje zahtijevaju strujanje u uvjetima pritiska različitim od atmosferskih.

Kavitacijski tunel izrađen je od čelika (sl. 12). U donjem dijelu konstrukcije smještena je impelerna pumpa koja izaziva strujanje vode. U gornjem dijelu tunela, gdje je mjerne sekcija, nalaze se uz pogonski elektromotor koji tjera model propelera i dinamometar za mjerjenje poriva i momenta propelera, vakuum pumpa za podešavanje pritiska u tunelu i manometri za mjerjenje pritiska i brzine strujanja u mjernej sekciji. Mjerna sekcija ima prozore za promatranje i snimanje ispitivanog modela. U koljenima tunela nalaze se skretne lopatice za usmjerenje strujanja vode, a ispred mjerne sekcije je rešetkasta konstrukcija u obliku sača koja ujednačuje strujanje vode i prigušuje rotacijska strujanja. Na modernim izvedbama kavitacijskog tunela ispred mjerne sekcije je smješten uredaj za podešavanje rasporeda brzinâ strujnog polja, kako bi se u mjernej sekciji dobila željena lokalna raspodjela brzina, odnosno strujanje vode jednako strujanju po krimi broda. Taj se uredaj sastoji od sistema ventilâ čiji se otvor regulira po volji, ili od sistema okvirâ sa čeličnim mrežama razli-

čite gustoće, koji se okviri umeću u posebnu kasetu ispred mjerne sekcije. Najveći kavitacijski tuneli su dugi ~ 30 m, visoki ~ 12 m, a promjer mjerne sekcije je do 1,5 m. U tim tunelima se mogu ispitivati modeli brodskih vijaka do 0,5 m promjera. Snaga pogonskog motora impelerne pumpe najvećih kavitacijskih tunela iznosi do 2000 KS.

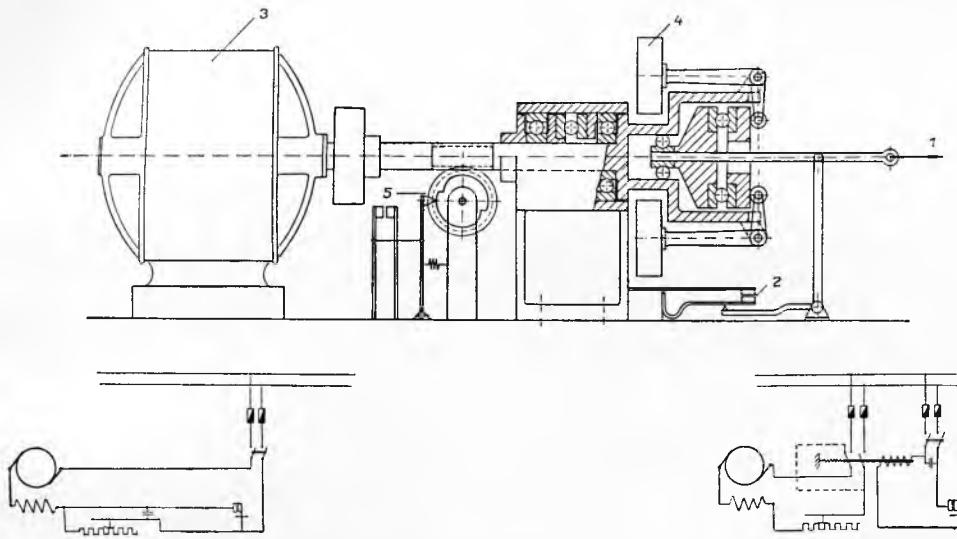
Modeli. Za hidrodinamička istraživanja služe modeli brodskog trupa, brodskih vijaka, kormila, profila i strujnih tijela, redovito izrađeni u smanjenom mjerilu. Modeli brodskog trupa namijenjeni ispitivanjima otpora i propulzije dugi su 1–12 m. Manji modeli se prave od drveta a modeli preko 2,5 m dužine obično su od parafinskog voska specijalnog sastava. Parafinski modeli imaju mnoge prednosti. Relativno su jeftini jer se jednostavno lijevaju i lako obraduju; isti materijal može se upotrijebiti za neograničen broj modela jer se nakon ispitivanja model pretopi; oblik modela može se mijenjati dodavanjem ili skidanjem parafina; parafinski vosak ne upija vodu niti je osjetljiv na vlagu, lako se izglađi i ispolira pa se površina modela može izraditi da bude glatka kao ogledalo. Nedostatak je što su parafinski modeli teški, imaju malu čvrstoću, podvrgnuti nagloj promjeni temperature pucaju, a na temperaturama iznad 25°C parafinski vosak omekša pa se model deformira. Stoga, ako model mora imati veću uzdužnu čvrstoću i malu težinu, izrađuje se od drva. Izrada drvenog modela

traje znatno duže, jer ne samo da se drvo teže obrađuje od parafina nego ga treba i višekratnim ličenjem zaštiti od vlage, a premaze treba brusiti i polirati da se dobije potpuno glatka površina. Drvo je i skuplje od parafina jer se može upotrijebiti samo jedanput. Najbolji materijal za brodskе modele jesu sintetske poliesterske ili epoksidne smole pojačane staklenim vlaknima, jer je od njih napravljen model vrlo čvrst i lagan, neosjetljiv prema vlazi i promjenama temperature. Međutim, zbog visoke cijene materijala i složenog postupka izrade taj se materijal upotrebljava samo kad model mora biti naročito čvrst i lagan, npr. pri ispitivanju ponašanja na valovima.



Sl. 13. Kopirna glodalica za izradu parafinskih i drvenih brodskih modela

Modeli brodskih vijaka za ispitivanja autopropulzije modela broda i za ispitivanje u slobodnoj vožnji obično imaju promjer 100–220 mm, a lijevaju se od bijelog metala, aluminijuma ili bronce. U novije vrijeme se izrađuju i od poliamidnih smola i sličnih sintetskih masa. Za ispitivanja u kvitacijskom tunelu redovito se upotrebljavaju modeli brodskih vijaka od bronce. Modeli kormila, sapnica, nogavica, skrokova i drugih privjesaka izrađuju se od drva, aluminijuma, mesinga ili sintetskih masa.



Sl. 14. Centrifugalni dinamometar. 1 vanjska sila koja se mjeri, 2 električki kontakt kojim se uključuje napajanje elektromotora, 3 elektromotor, 4 centrifugalni regulator, 5 brojač okretaja

Svi modeli brodova, brodskih vijaka i privjesaka moraju biti izrađeni vrlo precizno, jer već i male netačnosti utječu na rezim strujanja vode oko modela, što može imati za posljedicu osjetljive greške u rezultatima ispitivanja ekstrapoliranim na vrijednosti za brod u prirodnoj veličini. Stoga za izradu ovih modela služe specijalne vrlo precizne kopirne glodalice (sl. 13), a dovršeni model se kontrolira pomoću posebnih instrumenata, šablonu i uredaja za premjeravanje. Posebna pažnja se posvećuje obradi površine modela, koja mora biti potpuno glatka, da bi trenje u vodi uvijek bilo jednako trenju tehnički glatke ploče.

Za ispitivanje čvrstoće i napona brodske konstrukcije upotrebljavaju se modeli pojedinih građevnih dijelova ili sklopova izrađeni u smanjenom mjerilu ili u prirodnoj veličini. Kao materijal za modele upotrebljava se brodograđevni čelik i metali koji inače služe za građevne dijelove broda, a za fotoelastična ispitivanja modeli su od sintetskih masa.

Mjerenje otpora modela broda. Osnovni mjerni instrumenti koji se upotrebljavaju pri ispitivanju modela brodova jesu različiti tipovi dinamometara. Dinamometrima se mijere sile i momenti na modelu broda ili propeleru, kao na primjer: otpor modela, uzgon i bočne sile na modelu za vrijeme gibanja, sile na kormilu, poriv i moment modela propelera itd. Postoje tipovi višekomponentnih dinamometara koji mijere istovremeno sile u više smjerova, npr. u smjeru triju osnovnih osi koordinatnog sistema, kao i momente s obzirom na te osi. Takvi dinamometri su prijevo potrebni kad se na modelu istodobno mjeri više sile da bi se utvrdila njihova međusobna ovisnost.

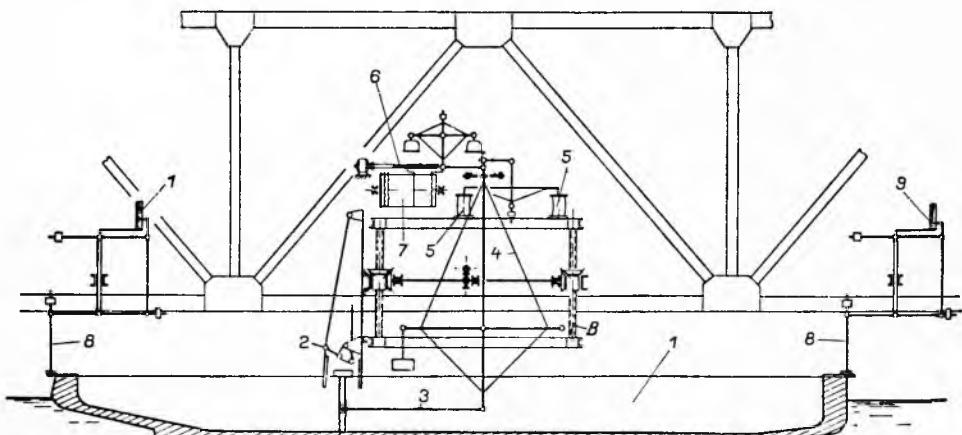
Postoji nekoliko tipova dinamometara za mjerenje otpora modela. Mehanički dinamometri djeluju na principu vase. Sila otpora

modela djeluje na jedan krak vase a na drugom kraku vase su utezi i kalibrirana opruga. Utezi drže protutežu većem dijelu sile otpora, a opruga preuzima samo manji dio te sile. Rastezanje opruge je proporcionalno preuzetoj sili i registrira se pisalicom na pomicnoj papirnatoj traci ili se očita na posebnoj skali.

Umjesto opruge može se upotrijebiti električki centrifugalni dinamometar (sl. 14) koji se sastoji od malog elektromotora i centrifugalnog regulatora. Vanjska sila 1 koja se mjeri uspostavlja električki kontakt 2 i uključi elektromotor 3, pa se utezi centrifugalnog regulatora 4 zavrte i uslijed djelovanja centrifugalne sile razmaknu. Time nastaje sila koja djeluje u smjeru protivnom smjeru vanjske sile. Ako broj okretaja elektromotora toliko poraste da centrifugalna sila postane veća od vanjske sile, kontakt 2 se isključi i broj okretaja elektromotora se smanjuje sve dok se ne uspostavi ravnoteža između vanjske i centrifugalne sile. U tom ravnotežnom stanju je broj okretaja elektromotora direktno proporcionalan vanjskoj sili, pa se na pogodno baždarenom električkom brojaču 5 može odrediti veličina vanjske sile. Centrifugalni dinamometar se inače često upotrebljava za mjerenje otpora kormila, sapnica i slično.

Elektronički dinamometri za mjerenje otpora modela djeluju na principu promjene neke električke veličine (npr. električkog otpora ili induktivnosti) uslijed deformacije ili zakreta jednog mjernog elementa na koji djeluje sila otpora modela. Mjerni podaci se mogu ili registrirati pomoću elektroničke pisalice ili se očitavaju na skali elektroničkog pojačala.

Prilikom ispitivanja otpora, model broda je pričvršćen na dinamometar za mjerenje otpora na kolicima bazena. Osim sa dinamometrom, model je na pramcu i krmi vezan i sa vodilicama koje dozvoljavaju uzdužni pomak modela, ali sprečavaju da model



Sl. 15. Shema pričvršćenja modela na dinamometar za ispitivanje otpora. 1 model broda, 2 kočnica za fiksiranje modela, 3 poluga kojom je model vezan za dinamometar, 4 vaga dinamometra, 5 prigušivač nihanja vase, 6 kalibrirana opruga, 7 bubanj s papirnom trakom za registriranje istezanja opruge, 8 vodilica modela, 9 skala za mjerenje otpora

skrene s ravnog kursa (sl. 15). Vodilice modela na pramcu i krmi često su konstruirane tako da za vrijeme vožnje pokazuju promjenu trima modela.

Osim dinamometra, pri ispitivanju modela potrebni su i različni tipovi manometara za mjerenje veličine i raspodjele prisilnika i brzina strujanja duž modela, precizni električki kronometri za mjerenje vremena, automatske pisalice za registriranje izmjerjenih veličina itd.

Brzina modela određuje se na osnovu podataka o prevaljenom putu i proteklom vremenu, koje registrica pisalica. U pravilnim razmacima, npr. od 1 m, duž čitavog bazena postavljeni su električki kontakti koji daju pisalicici signale o prevaljenom putu, a električki sat daje pisalicici signale svake sekunde. Tokom ubrzanja i zaustavljanja kolica model se fiksira posebnim zapornim uređajem (kočnicom) koji preuzima silu otpora modela tako da su mjerni uredaji potpuno rasterećeni. Tek kad kolica postignu određenu konstantnu brzinu, model se osloboodi, pa se sila otpora prenosi na dinamometar i uključuju se uređaji za registriranje mjernih podataka.

Primjena elektronike u mjernoj tehnici proširila je mogućnosti ispitivanja brodskih modela i na području u kojima mehanički mjerni instrumenti nisu mogli zadovoljiti, povećana je pouzdanost i tačnost mjerjenja, bitno su smanjene dimenzije i težina instrumenata i u velikoj mjeri je automatiziran čitav proces mjerjenja.

Ispitivanje otpora modela provodi se za područje brzina koje obično obuhvata brzinu nešto manju od brzine broda u službi i brzinu nešto veću od brzine broda na pokušnoj vožnji. Unutar tih granica model se tegli sa toliko različitih brzina koliko je potrebno da se za čitavo područje bez poteškoća konstruira krvulja otpora modela. Metoda proračuna otpora stvarnog broda, na osnovu izmjerene otpora njegovog modela, objašnjena je u poglavljiju Otpor broda ovog članka.

Ispitivanje vlastitog pogona (autopropulzije) modela broda vrši se s modelom koji je opremljen propelerom i pogonskim elektromotorm. Pogonski elektromotor može biti samostalan i preko dinamometra za mjerjenje poriva i momenta propelera priključen na propellersku osovinu, ili je motor ugrađen u samom dinamometru, tj. predstavlja njegov sastavni dio. Model broda samo na pramcu i krmi dodiruje vodilice vezane za kolica, tj. u uzdužnom smjeru se može gibati potpuno slobodno. Za vrijeme mjerjenja model se kreće pomoću vlastitog pogona, a kolica ga samo prate vozeći jednakom brzinom.

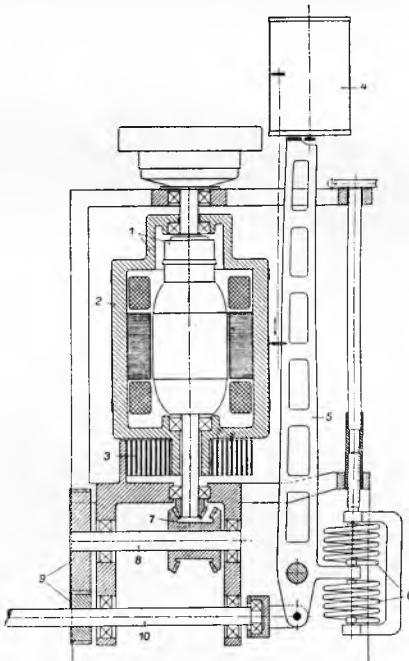
Ukoliko se model ispituje prema kontinentalnoj metodi (v. str. 205) treba smanjiti otpor modela da bi specifični otpori trenja modela i stvarnog broda bili jednaki. U tu se svrhu preko sistema kolotura model poveže s jednim utegom čija je težina jednaka spomenutoj razlici specifičnih otpora trenja, a djeluje u smjeru gibanja modela. Budući da ta korektura otpora trenja ovisi o brzini modela, treba prije svake vožnje tačno predvidjeti brzinu modela i postaviti odgovarajući uteg.

Ispitivanje se redovito provodi za isto područje brzina za koje je bio ispitani i otpor modela. Brzina modela se registrira na kolicima na isti način kao i pri ispitivanju otpora, a pored toga se registrira i broj okretaja propellerske osovine. Poriv i moment propelera se također automatski registriraju ili se očitavaju na skalamama dinamometra ili na elektroničkom pojačalu, već prema tipu dinamometra.

Jedan od najstarijih tipova propeler-dinamometra je *Gebersov dinamometar* (sl. 16). Ovaj dinamometar mjeri moment propelera na principu određivanja pritiska između zuba jednog para stožastih zupčanika 2, kojim se prenosi vrtnja na propellersku osovinu 11.

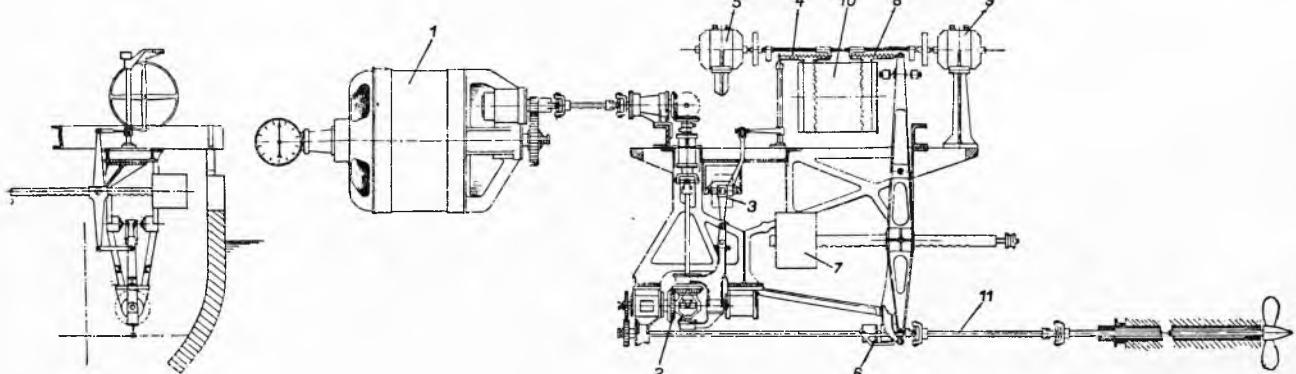
Jedan od zupčanika je učvršćen za krak vase, tako da pritisak na zubima preuzima protuteg 3 i kalibrirana opruga 4 na drugom kraku vase. Poriv se mjeri pomoću druge vase koja je jednim krakom vezana za odrivni ležaj 6 propellerske osovine, a protutuči porivu drže uteg 7 i opruga 8 na drugom kraku vase. Obje vase dinamometra imaju posebne male električke servomotore (5, 9) koji podešavaju napon u kalibriranim oprugama tako da vase osciliraju oko položaja ravnoteže. Dio poriva odnosno momenta koji preuzimaju kalibrirane opruge automatski se registrira na bubnju dinamometra 10. Pogonski elektromotor 1 ima tahometar za mjerjenje broja okretaja osovine, a sa dinamometrom je vezan preko sistema zupčanika. Nedostatak je ovog dinamometra da može mjeriti samo unutar relativno uskog područja i da je relativno vrlo težak.

Gutscheov dinamometar (sl. 17) je lakši i ima veći kapacitet mjerjenja nego Gebersov. Pogonski elektromotor modela 1 je



Sl. 17. Gutscheov propeler-dinamometar. 1 pogonski balansni elektromotor, 2 stator elektromotora, 3 opruga za mjerjenje momenta, 4 bubanj za registriranje mjernih podataka, 5 vaga za mjerjenje poriva, 6 opruge vase za mjerjenje poriva, 7 stožasti zupčanici za prijenos vrtnje na meduosovinu, 8 meduosovina, 9 čelni zupčanici za prijenos vrtnje na propellersku osovinu, 10 propellerska osovina

sastavni dio samog dinamometra, a izveden je kao balansni motor pa služi za mjerjenje momenta na propellerskoj osovinu. Stator 2 motora nije fiksani nego se može zakretati, a vezan je za kalibriranu



Sl. 16. Gebersov propeler-dinamometar. 1 pogonski elektromotor, 2 stožasti zupčanici, 3 uteg vase za mjerjenje momenta, 4 opruga za mjerjenje momenta, 5 električni servomotor vezan s oprugom za mjerjenje momenta, 6 odrivni ležaj propellerske osovine, 7 uteg vase za mjerjenje poriva, 8 opruga za mjerjenje poriva, 9 električni servomotor vezan s oprugom za mjerjenje poriva, 10 bubanj za registriranje mjernih podataka, 11 propellerska osovina

oprugu 3. Napon u opruzi djeluje nasuprot elektromagnetskom momentu koji zakreće stator i koji je proporcionalan momentu na propellerskoj osovini. Na bubnju 4 dinamometra registrira se rastezanje opruge, što u nekom određenom mjerilu daje vrijednost momenta na propellerskoj osovini. Poriv se mjeri pomoću vage 5 opterećenog kalibriranim oprugama 6 a otklon vase se također automatski registrira.

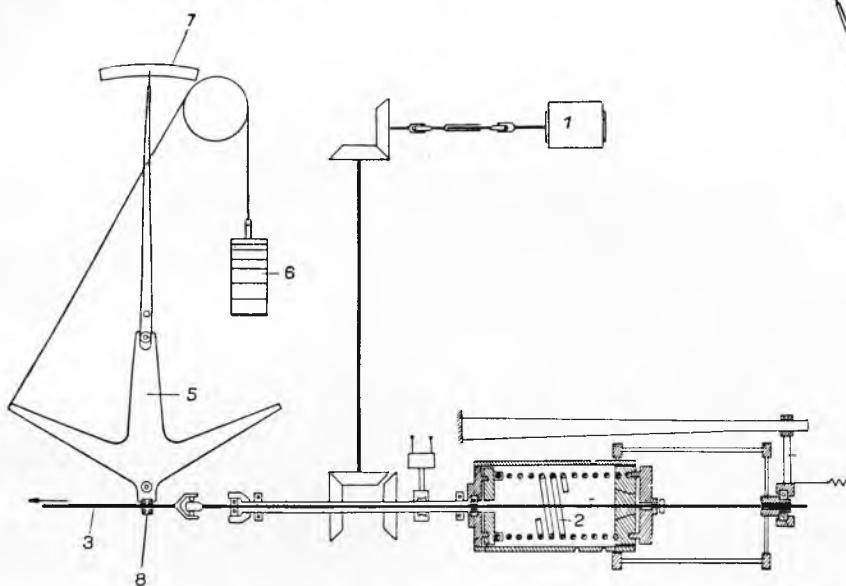
Kempsov propeler-dinamometar (sl. 18.) je vrlo lagan, ima velik kapacitet mjerjenja, ali nema ugrađen pogonski motor niti automatski registrira mjerne podatke. Pogonski elektromotor 1 preko sis-

ča na homogeno pritjecanje vode modelu. Mjerni instrumenti i način registriranja mjernih podataka (poriva, momenta, broja okretaja i translacijske brzine modela propelera) jednaki su kao pri ispitivanju vlastitog pogona modela broda. Ispitivanje se može provoditi ili uz konstantan broj okretaja modela propelera i različite brzine vožnje (tj. različite brzine pritjecanja vode propelera) ili uz konstantnu brzinu vožnje a različite brojeve okretaja modela. Prvi je način ispitivanja zgodniji utoliko što se može odabrat tako velik konstantan broj okretaja modela propelera da, s obzirom na utjecaj mjerila, Reynoldsov broj za model bude veći od kritičnog. Metoda proračuna i načina prikazivanja rezultata ispitivanja modela propelera u slobodnoj vožnji opisana je na str. 204.

Ispitivanje modela brodskog vijka u kavitacijskom tunelu služi prvenstveno za istraživanje karakteristika vijka s obzirom na pojavu kavitacije, a tek sekundarno za kvantitativno mjerjenje poriva i momenta vijka. Model vijka je smješten na kraju propellerske osovine u mjerne sekciji na gornjem dijelu tunela. Drugi kraj propellerske osovine izlazi van tunela i vezan je s pogonskim elektromotorom i dinamometrima za mjerjenje poriva i momenta. Da se zadovolje uvjeti sličnosti, broj okretaja modela vijka i brzina strujanja vode u tunelu odaberu se tako da sklizovi modela i stvarnog vijka budu jednak, a pomoću vakuum-pumpe se podeši pritisak u tunelu tako da se dobije kavitacijski broj koji odgovara uvjetima stvarnog broda (v. str. 206).

Ispitivanje se uglavnom sastoji od promatravanja rada modela vijka i razvoja kavitacije oko krila modela. Modeli vijaka namijenjeni ispitivanju u kavitacijskom tunelu imaju promjer 250...500 mm, dakle relativno su veliki i skupi, pa radi uštete vremena i materijala takav model obično ima svako krilo drugačijeg oblika. Tako je umjesto četiri različita modela dovoljan samo jedan da se odabere oblik konture i tip profila krila koji su najpovoljniji i najmanje podložni kavitaciji. Budući da su krila takvog modela različita, nema smisla mjeriti poriv i moment. Ako se želi odrediti utjecaj kavitacije na promjenu poriva i momenta vijka, model mora biti normalan, tj. s jednakim krilima. Pri ispitivanju kavitacije modela brodskog vijka primjenjuje se jako stroboskopsko osvjetljenje koje je sinhronizirano s okretajima propellerske osovine. Time se postiže efekt kao da model vijka miruje, pa se bez poteškoće može promatrati i fotografirati raspored kavitacijskih mješura na svakom pojedinom krilu modela (sl. 19.). Sam početak pojave kavitacije ne može se sa sigurnošću vizuelno odrediti, nego za tu svrhu služe posebni akustički detektori.

Iako nejednoliki raspored brzine strujanja vode iza krme broda ima utjecaja na kavitaciju vijka, ipak se radi jednostavnosti model



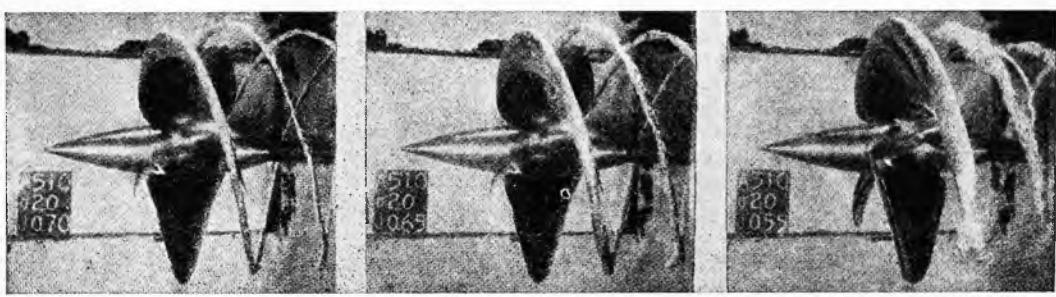
Sl. 18. Kempsov propeler-dinamometar. 1 pogonski elektromotor, 2 opruga za mjerjenje momenta, 3 propellerska osovina, 4 skala za očitavanje momenta, 5 vaga za mjerjenje poriva, 6 utezi vase za mjerjenje poriva, 7 skala za očitavanje poriva, 8 odrivni ležaj propellerske osovine

tema zupčanika, međuosovina i jedne kalibrirane opruge 2 napregnute na torziju pogoni propellersku osovinu 3. Moment na propellerskoj osovini je proporcionalan uvijanju torzijske opruge, a očita se na posebnoj skali 4. Poriv se mjeri vagom 5 opterećenom utezima 6, a vezanom za odrivni ležaj 8 propellerske osovine.

Elektronički propeler-dinamometri postoje u različitim izvedbama. Obično djeluju na principu promjene električkog otpora ili induktivnosti uslijed torzije mernog elementa (mjerjenje momenta), odnosno uslijed deformacije tenzometarske kapsule ili spiralne opruge (mjerjenje poriva). Mjerni podaci se očitaju na skali elektroničkog pojačala ili se registriraju elektroničkom pisalicom. Elektronički dinamometri su znatno lakši, kompaktniji i precizniji od drugih tipova dinamometara, ali im smeta trešnja a osjetljivi su i na promjene temperature, pa se obavezno moraju baždariti prije i poslije ispitivanja.

Rezultati mjerjenja poriva, momenta i broja okretaja propelera kao i brzina modela preračunavaju se na vrijednosti za stvarni brod načinom koji je objašnjen na str. 205.

Ispitivanja modela brodskog vijka. Pri ispitivanju modela brodskog vijka u slobodnoj vožnji propeler-dinamometar i pogonski motor smješteni su u jednoj vrtkoj ladici (ili strujnom tijelu) koja je pričvršćena na kolica za tegljenje modela. Na pravcu ladice (ili prednjem dijelu strujnog tijela) izlazi dugačka propellerska osovina koja na kraju nosi model propelera, tako da se model nalazi dovoljno daleko pred pravcem da potencijalno strujanje oko ladice (strujnog tijela) ne utje-



$\sigma = 2,23 \quad J = 0,68 \quad K_T = 0,183$

$\sigma = 2,25 \quad J = 0,65 \quad K_T = 0,213$

$\sigma = 2,33 \quad J = 0,52 \quad K_T = 0,253$

Sl. 19. Snimka modela vijka u kavitacijskom tunelu

vijka obično ispituje u homogenom strujnom polju. Ako se želi u području modela dobiti sličan raspored strujanja vode kao iza krme broda, ispred modela se postave mreže ili ugradi tijelo prikladnog oblika, što je dugotrajni i mukotrapan posao. Podesavanje rasporeda brzine strujanja vode jednostavno je jedino u kavitacijskom tunelu koji ima ispred mjerne sekcije poseban regulacijski uređaj sastavljen od velikog broja ventila. Količina zraka otopljenog u vodi također utječe na pojavu kavitacije, pa se obično prije i poslije pokusa ta količina odredi pomoću neke od jednostavnih metoda (Winklerove, van Slykeove).

A. Sentić

Ispitivanje modela broda na valovima ima ove osnovne svrhe: a) odrediti ponašanje nekog određenog projektiranog broda na valovima; b) istražiti u kolikoj mjeri utječu promjene oblika broda i raspodjele masa broda na njegovo ponašanje na valovima; c) provjeriti teorije gibanja broda na valovima; d) pronaći sredstva za smanjenje gibanja broda na valovima. Ispitivanje modela broda na valovima daje rezultate koji idu među osnovne informacije potrebne pri projektiranju novog broda.

Kako proizlazi iz prikaza teorije gibanja broda na valovima iznijetog naprijed (str. 226 i dalje), predskazivanje ponašanja broda na moru određenog stanja osniva se danas na ovim temeljnim pretpostavkama: 1. Nepravilni valovi na moru predstavljaju beskonačnu sumu pravilnih valova koji obuhvaćaju određeno područje frekvencija, amplituda i slučajnih (statistički raspodijeljenih) faza. 2. Brod koji se giba pod djelovanjem valova predstavlja linearni hidrodinamički sistem, tj. odziv broda na uzbudne sile i momente kojima na njega djeluju valovi nepravilnog mora može se dobiti superpozicijom odziva broda na sile i momente pojedinačnih pravilnih komponentnih valova koji tvore sistem nepravilnih valova. Sa matematičkog stanovišta gledano, valna gibanja su zadane ili nezavisne funkcije, a odzivi su tražene ili zavisne funkcije. Nezavisna funkcija naziva se još i ulaznom, transformacija valnih gibanja u odzive broda prijenosnom funkcijom (funkcijom odziva, v. str. 230), a zavisna funkcija izlaznom funkcijom. Valna gibanja (ulazna funkcija) i gibanja broda (izlazna funkcija) podliježu statističkim zakonitostima; prijenosna funkcija ovisi o hidrodinamičkim svojstvima cijelog sistema i o geometrijskim i dinamičkim karakteristikama broda. Osnovni je cilj ispitivanja modela broda na valovima odrediti prijenosne funkcije.

Postoje tri načina pomoću kojih se mogu odrediti prijenosne funkcije ispitivanjem modela brodova. Prema prvoj metodi model se ispituje na pravilnim valovima. Dužine valova se kreću od $0,5 L$ do $2,0 L$ (L je dužina modela), a visine valova od $\frac{1}{30} L$ do $\frac{1}{60} L$. Potrebno je načiniti ~ 12 vožnji s modelom da bi se prekrilo čitavo područje frekvencija spektra energije valova. Svi 12 vožnji se odvija pri istoj brzini modela, a mijenjaju se karakteristike pravilnih valova. Kad oscilacije modela postanu stacionarne, počinju se mjeriti odzvi posrtanja i poniranja (amplituda gibanja) i karakteristike valova. Dovoljno je imati ~ 6 stacionarnih ciklusa da bi se odredile amplitude gibanja. Omjeri izmjerenih amplituda gibanja i amplituda valova i fazni kutovi gibanja naneseni u ovisnosti o frekvenciji daju prijenosnu funkciju. Ova je metoda vrlo raširena jer pomoću nje mogu i bazeni koji ne posjeduju generator za stvaranje nepravilnih valova (a njih je velik broj) dobiti spektar gibanja na nepravilnim valovima služeći se pri tome npr. Neumannovim spektrima energije valova (v. str. 229).

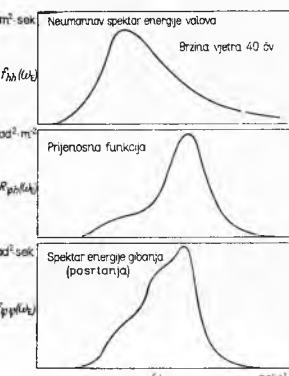
Druga metoda se zasniva na pretpostavci da se npr. poniranje i posrtanje mogu dovoljno tačno opisati sistemom simultanih linearnih nehomogenih diferencijalnih jednadžbi drugog reda. Koeficijenti sistema diferencijalnih jednadžbi određuju se eksperimentalnim putem. Vršeći pomoću posebnog oscilatora prisilne oscilacije modela u mirnoj vodi, dobivaju se koeficijenti diferencijalnih jednadžbi, a sile i momenti uzbude mogu se odrediti pomoću pokusa na pravilnim valovima, pri čemu je model spriječen da oscilira. Nakon što su određeni koeficijenti i sile i momenti uzbude, može se rješiti sistem simultanih jednadžbi i dobiti prijenosna funkcija.

Treća metoda se koristi ispitivanjem modela na nepravilnim valovima. Budući da se na temelju principa linearne superpozicije gibanja na pravilnim valovima može odrediti odziv modela na nepravilnim valovima, prijenosna se funkcija može naći analizom rezultata ispitivanja na nepravilnim valovima. Autokorelacijskom

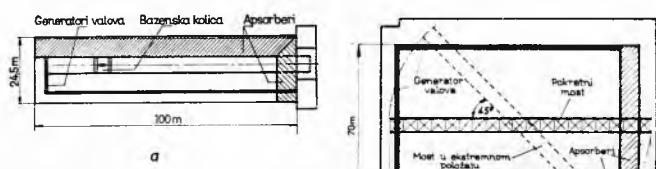
analizom snimke gibanja broda i valova dobiju se spektri energije gibanja (odziva) i valova (uzbude); njihov omjer daje kvadrate amplituda prijenosne funkcije (sl. 20). Ako se primjeni križna spektralna analiza na simultano snimljeno gibanje modela i valova, dobiva se osim amplitude prijenosne funkcije i njena faza.

Prema tome je teorijski moguće dobiti prijenosnu funkciju jednom jedinom vožnjom modela na nepravilnim valovima određenog spektra energije. Ali kako treba registrirati ~ 200 ciklusa da bi se utvrdile statističke zakonitosti, ipak treba izvesti veći broj vožnji da bi se dobio dovoljno dug snimak. Kolik će taj broj biti, to ovisi o dimenzijama bazena i modela. Nakon što je dobivena dovoljno duga snimka, potrebno je izvršiti križnu spektralnu analizu, što zahtijeva da se kontinuirani podaci (analogni, prikazani krivuljama) pretvore u diskretne (digitalne) izražene brojkama, da bi se mogli obraditi digitalnim računalom. To se pretvaranje vrši pomoću analogno-digitalnog konvertera. Danas postoje i strojevi koji vrše digitalno snimanje na magnetskoj ili bušenoj traci, tako da se rezultati ispitivanja mogu odmah obradivati na digitalnim računalima.

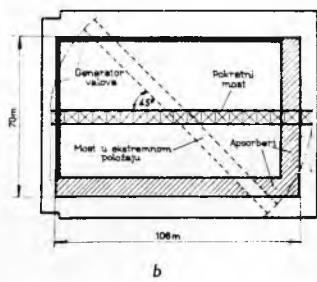
Mjerenja u modelnim ispitivanjima. Pri ispitivanju modela broda na valovima mjere se pomaci, brzine, ubrzanja, sile, momenti i pritisci. Gibanje modela se rastavlja na tri linearne pomake u smjeru koordinatnih osi: zalijetanje, zanošenje i poniranje, i tri kutne pomake oko tih osi: ljudjanje, posrtanje i zaošijanje. Daljnji važan pomak koji treba izmjeriti tokom ispitivanja jest promjena razine vode u bazenu, tj. karakteristike valova. Od brzina mjere se: brzina modela, kutna brzina osovine vijke (ako je model broda opremljen vlastitim pogonom), kutna brzina zaošijanja i kutna brzina kormila, ako je model opremljen uređajem za automatsko kormilarenje. Također se često mjere ubrzaji



Sl. 20. Određivanje prijenosne funkcije

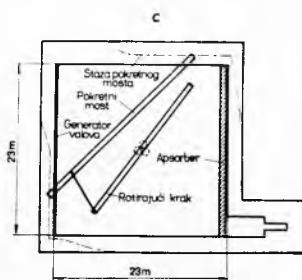


Kolica za tegljenje modela na fiksnoj stazi; generatori valova na principu niza oscilirajućih ploča postavljeni su uz dva zida bazena (N. S. P., Wageningen)

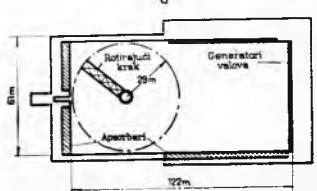


Kolica za tegljenje modela na zakretnom mostu; pneumatski generatori valova uz dva zida bazena (D. T. M., Carderoc)

Kolica na laganom pomičnom mostu; generator valova na principu uronjenog tijela postavljen je uz jedan zid bazena (Davidson Laboratory, Hoboken)

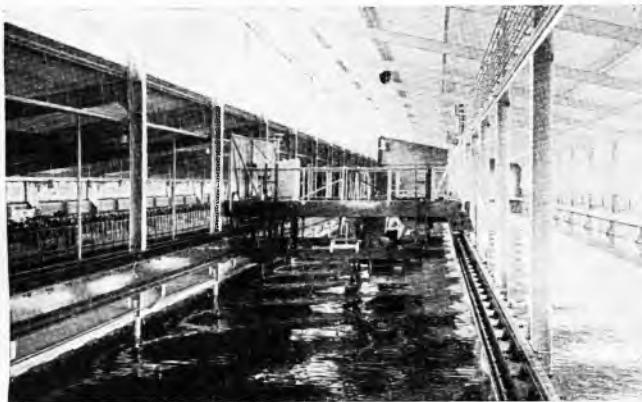


Model potpuno slobadan i daljinski upravljan; generatori valova na principu uronjenog tijela postavljeni su uz dva zida bazena (A. E. W., Haslar)



Sl. 21. Bazeni za ispitivanje modela broda na valovima

za različitim mjestima duž modela. Provede li se dvostruka integracija signala tih ubrzanja, mogu se dobiti veličine



Sl. 22. Bazén za ispitivanje na valovima u Wageningenu

pomaka na dotičnim mjestima. Mjerjenjem ubrzanja i pritisaka u području pramca modela može se otkriti da li dolazi do lutanja. Mjerjenjem momenata savijanja u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini, momenata torzije i sile smicanja dobivaju se podaci koji služe pri proračunu čvrstoće broda i dimenzioniranju njegovih konstrukcijskih dijelova. Mogu se mjeriti i momenti savijanja u nekoliko poprečnih presjeka modela i na taj način se dobiva tok momenata savijanja duž modela. Mjerjenje zalijevanja palube (engl. wetness) daje indikaciju o tome da li i u kojoj mjeri se vodene mase srušuju na palubu. Mjerjenjem sile otpora modela, sile poriva vijka i momenta na osovini vijka dobivaju se propulzijske karakteristike pri gibanju modela na valovima.

Mogućnosti mjerjenja pojedinih veličina ograničene su tipom bazena u kojem se vrše ispitivanja.

Većina postojećih bazena je dugog i uskog oblika, te su prvenstveno namijenjeni ispitivanjima u mirnoj vodi, kod kojih kurs modela nema nikakvu ulogu. U takvim bazenima mogu se stvarati pravilni i nepravilni valovi dugih valnih bregova koji se proteže po cijeloj širini bazena: stoga se u njima mogu provoditi samo ispitivanja na valovima koji dolaze u pramac ili krmu modela. Bazeni namijenjeni isključivo ispitivanjima na valovima imaju oblik kvadrata ili pravokutnika kojemu dužina nije mnogo puta veća od širine (sl. 21). U njima se pravilni i nepravilni valovi dugih valnih bregova koji nadolaze modelu broda pod raznim kutovima mogu ostvariti na nekoliko načina: 1. Generator valova smješten je duž jednog zida bazena, uslijed čega je smjer napredovanja valova stalan; kut između smjera napredovanja valova i smjera kretanja modela može se mijenjati jer se kolica koja prate model gibaju po mostu koji se može zakretati u odnosu na valove (sl. 21c). Isto se može postići i daljinskim upravljanjem modelom. — 2. Smjer kretanja modela je stalan a generator valova je izведен tako da može emitirati valove pod različitim kutovima. Pri tom su generatori valova smješteni duž dvaju susjednih zidova bazena (sl. 21 i 22) — 3. generatori valova smješteni su duž dvaju susjednih zidova bazena a kolica koja prate model gibaju se po mostu koji se može zakretati, ili se modelom daljinski upravlja (sl. 22 b i d).

Mada mnogi klasični bazeni imaju uređaje kojima mogu stvarati pravilne valove u pramac ili krmu modela, ipak su sve do nedavna rezultati rada na tom području bili vrlo skromni. Osnovni razlog je bio u pomanjkanju teorije koja bi bila kadra predskazati ponašanje modela (a i broda) na nepravilnim valovima na temelju ispitivanja modela na pravilnim valovima. Tokom posljednjeg decenija došlo je do vrlo naglog razvoja teorije o ponašanju broda na valovima, pa su u okviru novih teorija i eksperimenti dobili nov i velik značaj. U tom je razdoblju izgrađen i niz specijalnih bazena za ispitivanja modela na valovima, koji su probleme još više približili realnosti. Usprkos mogućnosti stvaranja nepravilnih valova s kratkim valnim bregovima (kakvi su na stvarnom ukrižanom moru), u većini specijalnih bazena, dakle ambijentu koji je najblizi stvarnom stanju mora, ispitivanja se redovito provode na nepravilnim valovima dugih valnih bregova. Na ovaj dvodimenzionalni studij problema prisiljavaju komplikacije koje se javljaju pri snimanju, računanju i interpretaciji trodimenzionalnog sistema kakav je brod koji se giba na nepravilnim valovima kratkih valnih bregova.

Ako se ispituje model nekog određenog projektiranog broda, potrebno je rezultate ispitivanja modela ekstrapolirati na dimenzije stvarnog broda. Tačnost ekstrapoliranih rezultata ovisi o metodi ekstrapolacije i o utjecaju mjerila. Veličina utjecaja mjerila može se odrediti na temelju usporebine ispitivanja modela u bazenu i pokusnih vožnji broda pri sličnim stanjima mora, a i tako da se izvrše pokusi sa nekoliko projektiranom brodu geometrijski i dinamički sličnih modela s različitim mjerilima smanjenja. Pokusi gibanja provedenih s nekoliko takvih modela pod uslovima zadovoljenja Froudeovog zakona sličnosti pokazali su da je utjecaj mjerila zbog neispunjenoj Reynoldsovog zakona sličnosti neznatan.

Priprema modela za ispitivanje. Za ispitivanje na valovima izrađuju se posebni modeli dugi obično od 1,5 do 4 m od drveta ili poliesterske smole armirane staklenim nitima. Ti su modeli izvrgnuti većim naprezanjima i opremljeni su daleko većim brojem instrumenata nego modeli koji se ispituju u mirnoj vodi, pa je potrebno da budu što čvršći i što lakši. Oba ova zahtjeva odlično ispunjava armirana poliesterska smola. Od modela koji se ispituju na mirnoj vodi izrađuje se dokraj samo onaj dio koji je u dodiru s vodom (podvodni dio modela i dio do kojeg dopiru valovi stvorenim gibanjem u mirnoj vodi); od modela koji se ispituju na valovima, pak, izrađuje se sav nadvodni dio, a ponekad se imitiraju i svi uredaji koji se nalaze na palubi. Za neka ispitivanja model može biti načinjen od dviju ili više odvojenih sekcija. Tako, npr., ako se želi mjeriti moment savijanja u sredini modela, model koji je bio načinjen kao jedna cjelina razreže se na dva dijela vezana samo dinamometrom za mjerjenje momenata savijanja. U sredini se ostavi mali raspored koji se zatvori tankom gumenom trakom. Modeli su obično opremljeni svim privjescima. Na pramacu modela stavlja se žica za podsticanje turbulencije, a ponekad i žica za mjerjenje uronjaja pramca, koja radi na principu promjene električkog otpora s uronjajem.

Težina, položaj težišta i momenti tromosti masa modela koji se ispituju na valovima treba da su u skladu s izabranim mjerilom. Ako je odnos linearnih dimenzija broda i modela λ , odnos je njihovih težina λ^3 , a momenata tromosti masa λ^5 .

Uskladivanje položaja težišta po dužini i visini kao i momenata tromosti mase s obzirom na poprečnu os kroz težište vrši se na uredaju poznatom pod imenom *stol inercije* (sl. 23). To je u principu fizičko njihalo sastavljeno od pomičnog dijela koji oscilira i na koji se smjesti model i od nepomičnog okvira na koji se oslanja pomični dio. Pomični dio stola može se kontinuirano dizati i spuštati, te treba da bude što lakši i što manjeg momenta tromosti; obično je rešetkaste konstrukcije. Model broda koji se stavlja na stol inercije potpuno je opremljen, tj. snabdjeven svim potrebnim uredajima i instrumentima. U modelu se nalazi i stanovita količina utega koja omogućuje podešavanje položaja težišta i momenta tromosti mase. Cjelokupna težina modela tačno odgovara težini koju model treba da ima pri ispitivanju na valovima. Model se stavlja na stol inercije tako da mu se zahtijevani položaj težišta nalazi u osi njihanja (osciliranja). Onda se utezi premještaju tako da se stvarni položaj težišta poklapa sa zahtijevanim. Položaj težišta po dužini provjerava se libelom, a po visini nagibom stola (naime, ako se težište stola s modelom



Sl. 23. Stol inercije

nalazi u osi njihanja, stol će se pod djelovanjem nekog odredenog utega nagnuti za isti kut kao kad modela nema). Moment tromosti mase s obzirom na os kroz težište provjerava se mjeranjem perioda njihanja, prema jednadžbi:

$$T_{sm} = \frac{2\pi}{\sqrt{G_s S}} \sqrt{\frac{I_s + I_m}{l_s}} = k \sqrt{\frac{I_s + I_m}{l_s}},$$

u kojoj je T_{sm} perioda njihanja sistema stol + model, I_s moment tromosti mase stola s obzirom na os njihanja (kroz težište modela), I_m moment tromosti mase modela s obzirom na os njihanja, G_s težina pomicnog dijela stola; l_s udaljenost težišta pomicnog dijela stola od osi njihanja.

Vrijednosti I_s i l_s određuju se baždarenjem samog stola (bez modela) za različite položaje pomicnog dijela stola. I_m (ili radijus tromosti) obično je zadan pa se potrebna perioda T_{sm} može izračunati. Ako je izmjerena perioda veća od potrebne (izračunate), utezi se pomicu prema težištu i obratno. Pri tome se dakako opet mora kontrolirati položaj težišta.

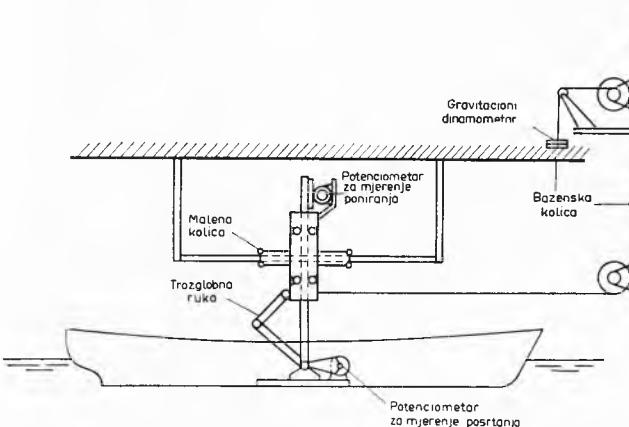


Sl. 24. Model s tri stepena slobode gibanja na valovima u klasičnom bazenu

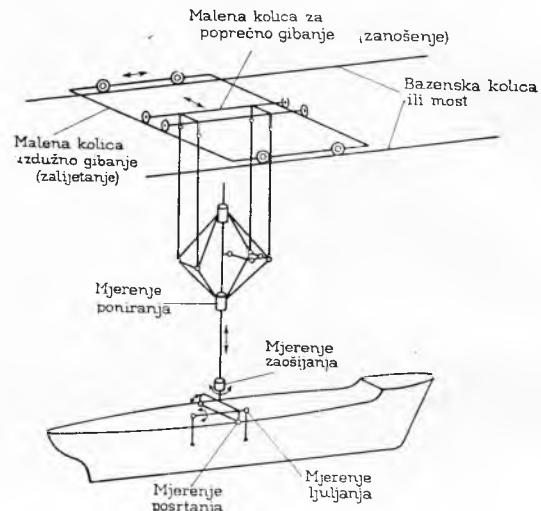
Uskladivanje momenta tromosti mase modela s obzirom na uzdužnu os kroz težište obično se vrši u vodi nakon što je uskladen položaj težišta i moment tromosti mase s obzirom na poprečnu os. Model se zaljuža rukom i ljužanje se registrira tako da mu se može tačno odrediti perioda. Potrebna perioda ljužanja je obično unaprijed zadana. Na kraju se kontrolira metacentarska visina pomoću pokusa nagiba.

Provodenje ispitivanja, oprema i instrumentarij. Budući da o tipu bazena ovisi koji se pokusi mogu provoditi, o bazenu će ovisiti također oprema i instrumentarij.

Postoje dva načina provodenja ispitivanja modela na valovima. Kod prvog je model potpuno slobodan i jedina veza s njime je putem radija. U ovom se slučaju nalaze u modelu: pogonski uređaj,



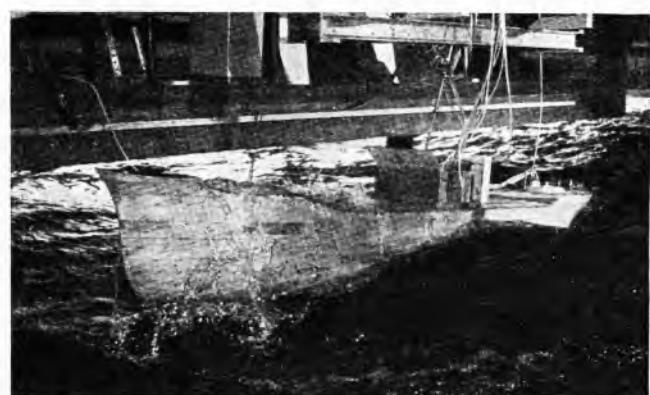
Sl. 25. Uredaj za praćenje modela s tri stepena slobode gibanja



Sl. 26. Uredaj za praćenje modela sa šest stepena slobode

mjerni instrumenti, instrumenti za registriranje izmjerjenih podataka, uređaji za daljinsko upravljanje modelom i instrumentima i potrebnii izvor električke energije (akumulatori). Putem radio-signala pogonski se elektromotor upućuje, prekreće ili zaustavlja, a na isti način se također zakreće kormilo i uključuje ili isključuje oprema za registriranje. Brojnu i tešku opremu često nije lako smjestiti na modelu, osobito ako je on relativno malen. Osim toga signali buke (refleksi) često ometaju signale upravljanja; stoga se ovaj način ispitivanja rijedno upotrebljava.

Kod drugog načina, koji je mnogo češći, veza s modelom uspostavljena je putem bazenskih kolica. I ovdje se razlikuju dvije izvedbe: pravac kretanja kolica može biti fiksni u odnosu na bazen ili se kolica gibaju po mostu koji se može zakretati. Prva izvedba je karakteristična za klasične bazene a rjeđa u specijalnim bazenima, druga se isključivo primjenjuje u specijalnim bazenima. U klasičnim bazenima mogu se ispitivati modeli samo na valovima u pramac ili krmu, stoga je dovoljno da veza između modela



Sl. 27. Ispitivanje modela s vlastitim pogonom; model je s kolicima vezan fiksibilnim kabelima

i kolica bude takva da se model može slobodno gibati u smjeru uzdužne osi, u smjeru vertikalne osi i oko poprečne osi. Za vezu između modela i kolica služi poseban uređaj sastavljen od trozglobne ruke i vertikalne motke koje su s jedne strane vezane za težište modela a s druge za lagana malena kolica (sl. 24 i 25). Ta kolica mogu se kretati po posebnim brušenim stazama na velikim bazenskim kolicima pa se i model može gibati u pravcu vožnje bazenskih kolica, tj. u pravcu svoje uzdužne osi. Trozglobna ruka omogućuje gibanje modela oko poprečne osi i u smjeru vertikalne osi, a sprečava gibanje u smjeru poprečne osi i oko uzdužne i vertikalne osi. U ovom slučaju gibanja se mijere pomoću posebnih potenciometara s vrlo malenim trenjem između klizaca i navoja. Otpor modela mjeri se gravitacijskim dinamometrom koji preko malih kolica tegli model konstantnom silom.

U bazonima namijenjenim isključivo ispitivanjima na valovima veza između modela i kolica mora biti takva da model posjeduje svih šest stepena slobode gibanja. U tom slučaju uredaj je znatno komplikiraniji i sastoji se od dvaju malenih kolica, od kojih se jedna gibaju uzdužno a druga poprečno u odnosu na bazenska kolica. Ostali dio uredaja se sastoji od štapova povezanih zglobovima (sl. 26). Budući da se u ovim bazonima modeli ispituju na pravilnim i nepravilnim valovima dugih valnih bregova, koji nailaze na model pod nekim kutom, ili na nepravilnim valovima kratkih valnih bregova, model se mora opremiti uredajem za automatsko kormilarenje. Gibanja se mogu mjeriti pomoću potenciometara.

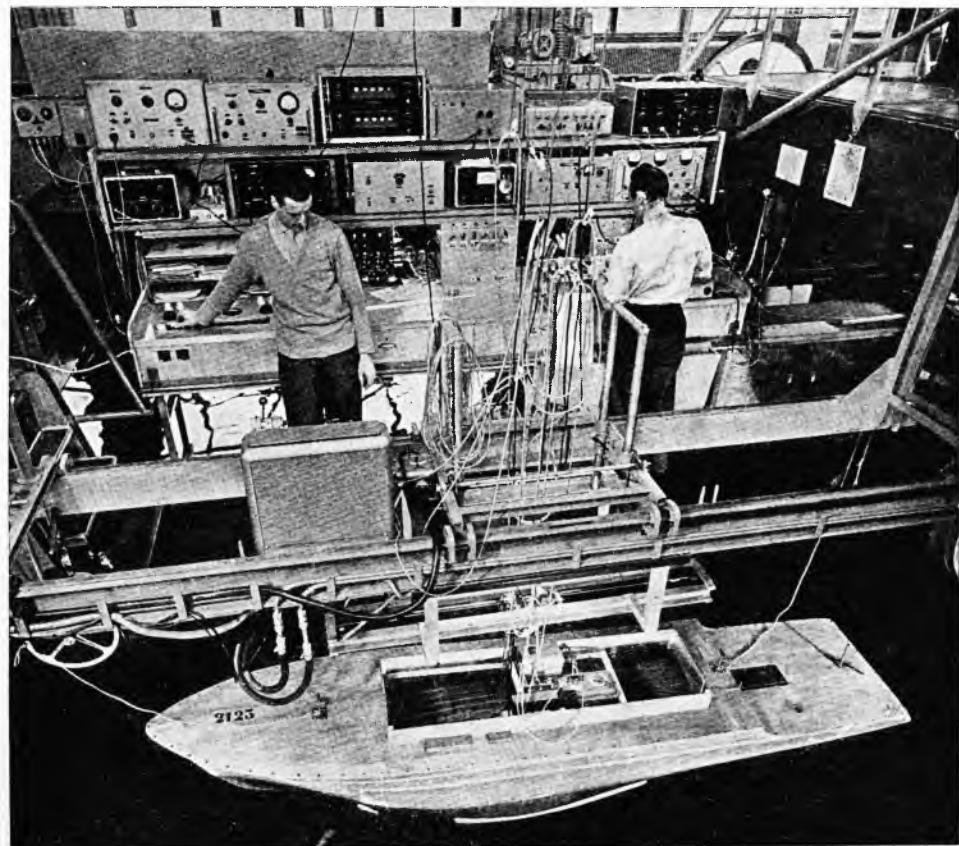
Ispitivanja na valovima se većinom provode s modelima koji su snabdjeveni vlastitim pogonom, bez dodavanja vanjske sile radi korekture razlike između specifičnih otpora trenja modela i broda (korekture trenja, v. str. 205). Elektromotori kao i ostali uredaji i instrumenti napajaju se strujom putem fleksibilnih kabela koji su vođeni tako da ne utječu na gibanja. Na isti način se prenose rezultati mjerjenja s instrumenata na modelu do pokazivača i registratora na kolicima (sl. 27 i 28).

Pri ispitivanju na valovima brzina modela nije konstantna jer model vrši male relativne pomake spram bazenskih kolica. Srednja vrijednost brzine modela dobiva se mjerjenjem brzine bazenskih kolica, kojoj se dodaje ili od koje se odbija relativna brzina modela u odnosu na bazenska kolica.

Instrumentarij koji se upotrebljava pri ispitivanjima na valovima vrlo je brojan i raznolik. Gibanja se mjeru pomoću potenciometara, sinhrodavača i giroskopa, brzina i broj okretaja pomoću fototranzistora, poriv i moment propelera, momenti savijanja i torzije pomoću elektroničkih dinamometara koji rade s mernim otpornim trakama ili su induktivnog tipa. Ubrzanja se mjeru akcelerometrima. Veličine izmjerene mernim elementima dinamometara privode se elektroničkim pojačalima gdje se moguочitati, ili se vode na pisalicu. Na modele se često ugraduju i različni servomehanizmi za pokretanje kormila ili aktivnih stabilizatora. Karakteristike valova mjeru se pomoću valomjera (sl. 39) koji je pričvršćen za bazenska kolica ispred modela. Valomjer se sastoji od okvira čiji je presjek stруjnog oblika i na kojem su razapete dvije žice. Okvir i žice su djelomično uronjeni. Kad se mijenja visina razine vode, mijenja se i uronjaj žica a time i otpor vode između tih žica. Promjene otpora variraju približno linearno s uronjajem. Neposredno prije početka ispitivanja svi se instrumenti baždare. Baždarenje se ponavlja i nakon ispitivanja da bi se provjerila pravilnost rada instrumentarija.

Ispitivanje kormilarenja s modelima obuhvaća ova mjerena i pokuse: mjerjenje hidrodinamičkih derivacija, određivanje početnih svojstava kormilarenja, pokus kruga okretanja, cikcak-pokus i pokus spirale.

Mjerjenje hidrodinamičkih derivacija. Pod hidrodinamičkim derivacijama razumijevaju se parcijalne derivacije sila i momenata po linearnoj ili kutnoj brzini, odnosno, po linearnom ili kutnom ubrzaju broda ili njegovog modela. Hidrodinamičke derivacije se javljaju u jednadžbama gibanja i u kriterijima za stabilnost gibanja broda. Danas još nije moguće odrediti teorijskim putem numeričke vrijednosti ovih derivacija ovisnih o geometrijskim



Sl. 28. Instrumentarij na kolicima za ispitivanje na valovima (N. S. P., Wageningen)

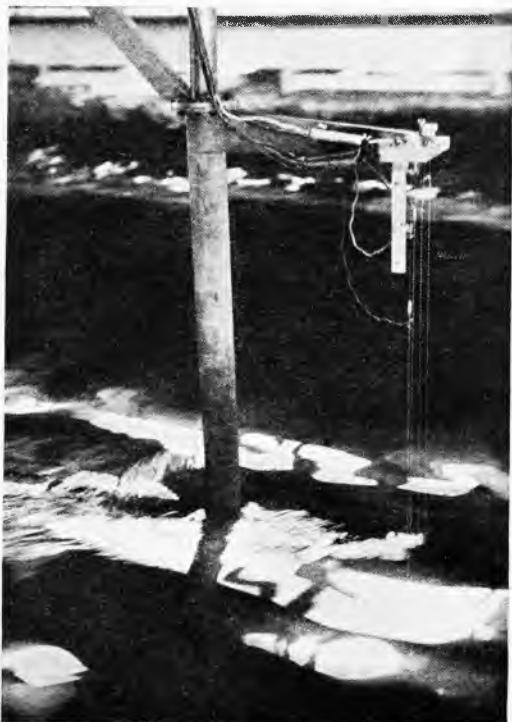
karakteristikama broda, nego se one dobivaju s pomoću eksperimenta.

Neke od hidrodinamičkih derivacija mogu se dobiti pokusima u klasičnim bazonima. Model broda, opremljen kormilom i vlastitim pogonom, u svome težištu čvrsto je vezan za bazenska kolica preko dinamometra koji može mjeriti silu u smjeru poprečne osi modela i moment oko vertikalne osi. Model se tegli nekom pogodnom konstantnom brzinom (odnosno uz odgovarajući Froudeov broj), pri čemu se mijenjaju kutovi koje zatvara uzdužna os modela sa smjerom tegljenja.

Za određivanje drugih hidrodinamičkih derivacija potreban je poseban uredaj, tzv. rotirajući krak (v. str. 399), koji je smješten u bazenu okruglog ili kvadratnog tlocrta (sl. 30, v. i sl. 8). Model s vlastitim pogonskim uredajem i kormilom čvrsto je vezan za rotirajući krak preko dinamometra koji, kao i u prijašnjem slučaju, može mjeriti silu u smjeru poprečne osi modela i moment oko njegove vertikalne osi. Pokus se provodi pri konstantnoj linearnoj brzini modela (odnosno pri konstantnom Froudeovom broju), što znači da je za promjenu kutne brzine potrebno mijenjati radijus na kojem model rotira. Kod pokusa na rotirajućem kraku treba tokom jednog okretaja kraka da model postigne konstantnu linearnu brzinu i da se obavi mjerjenje, jer u protivnom slučaju model naizlazi na vodu koja je već u stanovitom gibanju, što znači da linearna brzina više nije jednaka onoj koju je imao u prvom krugu. Budući da su od posebnog interesa one tačke pokusa kod kojih je malena vrijednost kutne brzine, potrebno je da omjer radijusa kraka i dužine modela bude dovoljno velik. Zbog utjecaja mjerila dimenzije modela ne smiju biti premalene, pa stoga rotirajući krak mora biti što većih dimenzija.

Osim na ova dva načina, hidrodinamičke derivacije mogu se odrediti u klasičnom bazenu i pomoću posebnog oscilatora koji vrši prisilne oscilacije modela u horizontalnoj ravnini. Na bazenskim kolicima smjesti se oscilator za koji je preko dinamometra pričvršćen model. Ovakvo je rješenje vrlo ekonomično, pa se u posljednje vrijeme hidrodinamičke derivacije mijere sve više na taj način.

Kod svih ovih metoda ispitivanja potrebno je da model bude opremljen vlastitim pogonom i da vijci modela rade u uvjetima koji odgovaraju režimu vlastitog pogona broda, a kormilo modela da je fiksirano u neotklonjenom položaju. Osim toga težina modela i položaj težišta treba da odgovaraju težini i težištu broda. Kod spomenutih pokusa potrebno je zadovoljiti Froudeov zakon slič-



Sl. 29. Valomjer

nosti. Naravno da istodobno nije moguće zadovoljiti i Reynoldsov zakon sličnosti, pa se u izvjesnoj mjeri javlja utjecaj mjerila. Stoga je poželjno da ispitivani modeli budu što veći, no kako je to povezano s dimenzijama uređaja i bazena, to se dužine modela obično kreću od 2,5 do 4 m.

Određivanje početnih svojstava kormilarenja ima za cilj odrediti silu i moment na osovini kormila, odnosno moment koji djeluje na model broda uslijed sile kormila. Ova mjerena se odnose na stanje koje nastupa u trenutku neposredno nakon zakretanja kormila, tj. dok se još model nije počeo zakretati uslijed djelovanja kormila. Svi potrebnii podaci mogu se dobiti pomoću relativno jednostavnih pokusa u klasičnim bazenima, pa se ispitivanja ove vrste često provode.

Model broda opremljen vlastitim pogonom prisilno se drži na ravnom kursu koji se podudara sa simetralom bazena. Mjerenje se vrši kod neke odgovarajuće brzine i stanovitog kuta kormila, pri čemu se mjere ili sile uzgona i otpora kormila i moment na osovini kormila, ili dvije poprečne sile potrebne da održe model u ravnom kursu i moment na osovini kormila. U ovom posljednjem slučaju model je vezan s uređajem za vođenje preko dinamometra koji mjeri te poprečne sile. Kormilo i njegova osovina vezani su s modelom preko trokomponentnog dinamometra koji mjeri sile otpora i uzgona i moment kormila. Mjerjenje početnih svojstava kormilarenja provodi se kod stanja koje odgovara tački vlastitog pogona broda.

Pokus kruga okretanja služi za to da se odrede geometrijske veličine karakteristične za putanje težišta modela pri okretanju, zatim promjena brzine tokom okretanja i nagib modela oko udužne osi (v. poglavlje Okretanje broda, str. 220-222). Kod ovog je pokusa potrebno da model bude što je više moguće slobodan. To se može postići ako je model daljinski upravljan, ali u tom slučaju nastaju slični problemi kao i kod ispitivanja modela na valovima, tj. velika težina mnogobrojne opreme u modelu, utjecaj buke (reflektiranih signala) na daljinsko upravljanje itd. Zbog toga su češći pokusi kruga okretanja s modelom opremljenim vla-

stim pogonom, uređajem za zakretanje kormila, instrumentima za mjerjenje poriva, momenata i broja okretaja vijka i inklinometrom (instrumentom za mjerjenje nagiba), a izvor energije, elektronička regulacija pogona modela, mjerna pojačala i pisalice nalaze se izvan modela na rotirajućem kraku. Model je s rotirajućim krakom vezan samo preko fleksibilnih kabela, a jedini je zadatak rotirajućeg kraka da prati model, i to na takav način da kabeli ne utječu na gibanje modela. Putanja modela, kut zanošenja i promjena brzine tokom okretanja mogu se odrediti na temelju fotografске snimke. Na modelu se nalaze dvije žarulje, jedna na pravcu a druga na krmi; u određenim vremenskim razmacima električki sat prekida svjetlost ovih žarulja. Fotografski aparat je smješten visoko iznad bazena i objektiv mu se nalazi tačno u osi rotirajućeg kraka. Isprekidana svjetlost žarulja ostavlja na fotografskoj ploči dva isprekidana traga pomoću kojih se može odrediti tačan položaj modela u određenim vremenskim razmacima. Na rotirajućem kraku nalazi se u razmacima od 1 m niz žarulja koje su poredane u smjeru radijusa i koje neprekidno svijetle; one na fotografskoj snimci daju koordinatni sistem (v. prilog u bakrotisku). Pomoću niza uzastopnih položaja modela mogu se odrediti geometrijske karakteristike kruga okretanja, tj. taktički promjer, napredovanje i prijelaz (v. str. 220, sl. 25), zatim tok brzine pri okretanju i kut zanošenja. Model se ubrza u ravnom kursu, a kad je postignuta odgovarajuća brzina, kormilo se zakrene za određeni kut.

Prije pokusa treba na modelu uskladiti položaj težišta po dužini i visini, te moment tromosti masa s obzirom na vertikalnu os kroz težište. Za egzaktno određivanje momenata tromosti masa s obzirom na vertikalnu os kroz težište služi uređaj na principu bifilarnog njihala. Budući da su razlike između momenata tromosti masa s obzirom na vertikalnu os i s obzirom na poprečnu os kroz težište razmjerno malene, može poslužiti za određivanje momenata tromosti masa s obzirom na vertikalnu os i stol inercije, čiji su rad i konstrukcija opisani naprijed.

Cikcak-pokus se najprije počeo izvoditi na pokusnim vožnjama broda, a tek se kasnije uveo u modelska ispitivanja. Značaj i detaljna procedura cikcak-pokusa opisani su u odsjeku Pokusne vožnje broda, pa će se na ovom mjestu spomenuti samo najnužnije osnove i tehniku izvođenja tog pokusa u bazenima.

Pri cikcak-pokusu se model najprije kreće određenom brzinom u ravnom kursu, zatim se prebaci kormilo za stanovit broj stupnjeva udesno i drži u tom položaju dok se i kurs ne promjeni za isti broj stupnjeva udesno; zatim se kormilo prebacuje za isti broj stupnjeva ulijevo i opet se drži u tom položaju dok se kurs ne promjeni za isti broj stupnjeva ulijevo. Taj se manevr ponavlja nekoliko puta, te se iz snimaka koje pokazuju krivulje vremenske promjene kuta kormila i kursa modela mogu odrediti premašaj (omjer amplituda kursa i kuta kormila) i fazni kut između tih dviju krivulja. Veličina premašaja i fazni kut su mjerilo dinamičke stabilnosti i manevarskih svojstava broda. Stabilniji model ima manji premašaj.



Sl. 30. Priprema modela za ispitivanje kormilarenja (okrugli bazen i rotirajući krak Institut za brodsku hidrodinamiku u Zagrebu)

Ovaj pokus se može provoditi i u klasičnim bazenima ako se na bazenskim kolicima nalaze još jedna manja kolica koja se mogu gibati u smjeru poprečnom na os bazena (tzv. *xy*-sistem). Model je snabdjeven vlastitim pogonom, uredajem za zakretanje kormila i instrumentima za mjerjenje promjene kursa (giroskopom) i kuta kormila (potenciometrom). Model je vezan s kolicima samo preko fleksibilnog kabla koji se, kao i kod pokusa kruga okretanja, drži tačno iznad težišta modela. Putanja modela može se dobiti viziranjem i fotografskim putem. I za cikcak-pokus mora položaj težišta i momenta tromosti masa biti uskladen s obzirom na vertikalnu os modela.

Pokus spirale služi za određivanje dinamičke stabilnosti broda. Provodenje ovog pokusa na brodovima je vrlo jednostavno jer je potrebno samo izmjeriti konstantnu vrijednost kutne brzine broda kod niza otklona kormila (od $\sim 25^\circ$ udesno do 25° uljevo i obratno), tj. mjeriti promjenu kursa broda u ovisnosti o proteklom vremenu i kutu kormila (v. dalje Pokusne vožnje broda). Pokus spirale zahtijeva mnogo prostora, pa se ne može izvoditi s modelima u bazenima. Postoji mogućnost da se izradi veći model (dužine ~ 8 m) i da se s njime izvrši pokus spirale na kakvom jezeru ili morskom zaljevu, ali takvi su pokusi vrlo skupi i vanjski vremenski uvjeti utječu na tačnost mjerjenja, pa se ta ispitivanja vrlo rijetko provode.

M. Molnar

Pokusne vožnje broda. Raznovrsna ispitivanja u periodu primopredaje broda treba da pokažu da li uredaji na brodu rade ispravno i da li njihova performansa odgovara zahtjevima određenih standarda. Neka od ovih ispitivanja vrše se u luci, neka su već ranije izvršena od strane isporučioča opreme i strojeva, npr. ispitivanje motora na probnom stolu, ali za opću ocjenu izgradenog broda kao kompletne samostalne i ekonomske jedinice pomorskog, jezerskog ili riječnog saobraćaja mogu dati najviše podataka pokusne vožnje potpuno opremljenog broda. Za vrijeme pokusnih vožnji provjerava se rad i performansa glavnog stroja i pomoćnih strojeva, kormilarskog uredaja, navigacijskih uredaja na mostu i druge opreme na brodu. U program pokusnih vožnji redovito su uključena ova ispitivanja: pokusna vožnja na mjernoj miliji, vožnja izdržljivosti, ispitivanje manevarskih svojstava broda i specijalna ispitivanja.

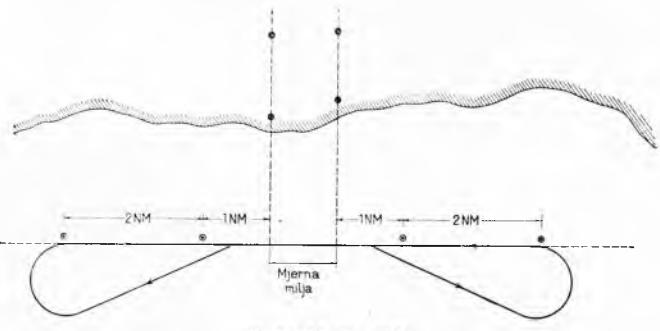
Pokusna vožnja na mjernoj miliji ima svrhu da ustanovi u jednom širem području odnos brzine broda, snage stroja potrebne za postizanje te brzine i brzine okretanja kod koje stroj tu snagu razvija. Vrijednost ovih rezultata je višestruka: a) brodogradilište njima dokazuje brodovlasniku da je ispunilo ugovorene obaveze u pogledu postizanja odredene brzine broda na specificiranom gazu uz razvijanje odredene snage strojeva; b) odnos broja okretaja i snage strojeva bitan je za pravilan termički i mehanički rad stroja, a budući da na brodu brodski propeler diktira ovaj odnos, rezultati daju elemente za ocjenu projekta propelera, koji treba da pokreće brod za vrijeme čitava njegova vijeka; c) rezultati pokusnih vožnja pružaju projektantu pomoć i sigurnost pri projektiranju novih brodova; d) brodovlasnik dobiva tehnički osnov za daljnje praćenje eksploracije broda; e) korelacija rezultata postignutih na brodu s predskazivanjima na temelju modelskih ispitivanja u bazenima služi za provjeravanje i daljnje razvijanje metode i tehnike ovih predskazivanja, te daje realni smisao rezultatima istraživanja na modelima u povoljnim i kontroliranim laboratorijskim uvjetima. To su dovoljni razlozi da se za pokusne vožnje broda savjesno izvrši pripreme, da se osiguraju mjerjenja standardne tačnosti i da se provode metodama koje će osigurati pouzdano rezultata.

Budući da na propulzivno ponašanje broda utječu mnogi vanjski faktori, treba kod pokusnih vožnji osigurati uvjete koji eliminiraju istovremeno djelovanje više faktora čije je utjecaje na dobivene rezultate nemoguće razlučiti. Ovi uvjeti uključuju: a) čist trup, do 2 tjedna nakon dokovanja; b) vremenske prilike takve da je stanje mora manje od 2-3 jedinice Beaufortove skale, u ovisnosti o veličini broda; c) dubinu vode $> 3\sqrt{BT}$ ili $> 4v^2/g$ već prema tome koja je vrijednost veća; d) raspored tereta takav da je propeler dovoljno upronjen i trup minimalno prognut. Na taj se način osigurava referentna vrijednost rezultata pokusne vožnje za usporedbu s podacima iz drugih izvora.

Budući da se iz praktičnih razloga brzinomjeri na principu Pitotove cijevi ili hidrometrijskih krilaca ne mogu udaljiti toliko

od broda da na njih ne bi utjecao poremećaj uslijed strujanja oko broda, jedini pouzdani način određivanja brzine broda je vožnja brodom pokraj oznaka na kopnu i mjerjenje vremena koje je brodu potrebno da prevali tačno izmjerenu udaljenost (mjernu milju) koja je na kopnu označena pomoću dva para stupova (sl. 31). Ulaz u mjernu milju i izlaz iz nje određen je poklapanjem prednjih i stražnjih stupova na kopnu, a kurs broda mora biti okomit na smjer poklapanja ovih stupova i obično je označen plutačama.

Prisustvo morskih struja je neizbjegljivo, pa se pokusna vožnja provodi tako da se, uz neki ustaljeni režim brzine stroja, učini više vožnji naizmjenično u suprotnim smjerovima, što omogućava eliminiranje utjecaja morske struje uključenog u brzini broda iz-



Sl. 31. Mjerna milja

mjerenoj prema kopnu. Grupe vožnji sastoje se od dvije, tri, četiri pa i više vožnji, a brzina broda kroz vodu računa se metodom srednjeg prosjeka: $V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2)$, $V = \frac{1}{4}(V_1 + 2V_2 + V_3)$, $V = \frac{1}{6}(V_1 + 3V_2 + 3V_3 + V_4)$, i slično za veći broj vožnji, gdje indeksi uz brzine prema kopnu označavaju, prema vremenskom slijedu, redni broj vožnje u grupi. Istom metodom se računaju i srednji prosjeci za grupe ostalih veličina izmjerениh za vrijeme prolaza mjerom miljom: brzine okretanja i razvijene snage stroja, poriva i potroška goriva. Da bi dobiveni podaci pokrili šire područje brzine, potrebno je u program pokusne vožnje uključiti bar četiri grupe vožnji.

Da bi se dobili pouzdani podaci, treba kod vožnji na mjerenoj milji paziti na to: a) da je osiguran dovoljan zalet broda, 2-5 NM već prema veličini i snazi broda, prije ulaza u mjerenu milju zbog pada brzine broda prilikom okretanja; b) da se ne mijenja postavljeno opterećenje stroja unutar grupe vožnji; c) da se drži tačan kurs broda uz što manju upotrebu kormila i da se vozi uvijek na istoj udaljenosti od obale; d) da se pri okretanju broda kormilo ne zakrene za više od 15° , kako brzina ne bi previše opala.

Da bi se snaga na osovini pouzdano odredila, bitno je utvrditi nul-tačku torziometra neposredno prije i neposredno poslije pokusne vožnje na mjerenoj milji.

Analizi rezultata pokusnih vožnji i razvijanju metoda analize posvetili su mnogo pažnje poznati naučni radnici s područja brodske hidrodinamike (Taylor, Telfer, Baker i dr.). Njih nije zadovoljavala metoda srednjeg prosjeka, već su utjecaj struje mora i vjetra na rezultate eliminirali posebnim metodama. Analiza se bazira na teoriji sličnosti (dimenzijskoj analizi). Mnogim ispitivanjima potvrđeno je da u normalnom području brzinâ između

konstante poriva $K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$ (odn. konstante momenta $K_Q =$

$$= \frac{Q}{\rho n^2 D^5})$$
 i konstante brzine $J = \frac{V_A}{nD}$ (v. str. 203, jedn. 21 i str.

204, jedn. 22, 23) postoji linearna ovisnost; budući da su ρ i D konstantni, u praktičnom se računu traže konstante a_1 i b_1 jednadžbe $Q/n^2 = a_1 V/n + b_1$ (odn. a_1 i b_2 jednadžbe $T/n^2 = a_2 V/n + b_2$). Iz izmjerjenih rezultata dolazi se do ovih konstanta izračunavanjem dovoljnog broja parova vrijednosti:

$$Q/n^2 = (Q_1/n + 2Q_2/n_2 + Q_3/n_3)/(n_1 + 2n_2 + n_3)$$

$$\text{i } V/n = (V_1 + 2V_2 + V_3)/(n_1 + 2n_2 + n_3)$$

formiranih iz rezultata vožnji u vremenskom slijedu (prepostavlja se i jednak vremenski interval između pojedinih vožnji). Slično se traži i odnos između T/n^2 i V/n (sl. 32). Ulazeći u te jednadžbe

s izmjerenim vrijednostima Q , T i n dolazi se do brzine broda kroz vodu za svaku pojedinu vožnju, tako da svaka vožnja ulazi u analizu pojedinačno, a ne grupno po tri, četiri ili više vožnji. Kod eliminiranja utjecaja vjetra na rezultate pokušne vožnje polazi se od izraza za otpor zraka broda $R_z = k A V_v^2$, gdje je V_v relativna brzina vjetra izmjerena anemometrom ili anemografom,

A projekcija površine broda izložene udaru vjetra, k koeficijent ovisan o smjeru relativnog vjetra.

Izvještaj s pokušne vožnje mora uza sve mjerene podatke sadržavati i podatke o brodu, vijcima, pogonskom stroju, mernoj milji (dužina, dubina i stanje morske mijene), temperaturi vode i zraka, barometarskom stanju i o modelskom ispitivanju. Rezultati se prikazuju u tablicama i grafikonima u obliku krivulja snage, poriva i broja okretaja u ovisnosti o brzini (sl. 33) i potrošaka goriva u ovisnosti o snazi stroja (sl. 34).

Sl. 32. Ovisnost Q/n^2 odnosno T/n^2 o omjeru V/n dobivena na osnovu rezultata mjeranja na pokušnoj vožnji

Metode mjeranja i instrumentarij pri vožnji na mernoj milji. Brzina broda se dobiva iz poznate dužine L mjerne milje, koja može biti i veća od 1 NM, i izmjereno vremena t potrebnog da se pređe ova udaljenost, $V = L/t$. Najmanje tri mjerioca treba da štopericama nezavisno mjeri vrijeme prolaza mernom miljom, tako da se srednje vrijeme od ova tri uzima za proračun brzine. Očitanje vremena do 1/10 sekunde omogućava mjerjenje brzine brodova prema kopnu s tačnošću $\pm 0,2\%$. Brodska brzinomjer (log) se za vrijeme vožnje na mernoj milji regulira i baždari.

Snaga na osovini P_s je umnožak zakretnog momenta Q_s na osovini i broja okretaja osovine n : $P_s = Q_s n$. Zakretni moment mjeri se brodskim torziometrom (v. str. 324).

Radi tačnog mjerjenja zakretnog momenta poželjno je, prije nego se ugradi osovina na brod, baždariti sistem torziometar-osovina prialjanjem poznatog momenta na krajeve osovine. Time se istovremeno određuje konstanta torziometra i modul smika osovine G koji normalno navodi proizvodac osovine. Ako baždarenje nije tako izvršeno, vrijednost

mjerjenje okretaja na torziometru. Budući da se od svih podataka broj okretaja može izmjeriti najtačnije ($\pm 0,1\%$), to u analizi broj okretaja redovito služi kao polazni podatak.

Snaga na osovini, kao produkt momenta i broja okretaja, mjeri se s tačnošću $\pm 2\%$ ako torziometar i osovina nisu zajedno baždareni, a s tačnošću većom od $\pm 1\%$ kad su ta baždarenja izvršena.

Poriv vijka rijetko se mjeri na pokušnim vožnjama. Razlog tome je, s jedne strane, da za takva mjerjenja ne postoje prikladni tvornički izradeni instrumenti, a s druge strane, veličina poriva nikad se ne zahtijeva obavezama u ugovoru. Za potpunu naučnu obradu rezultata pokušne vožnje, međutim, taj je podatak prijeko potreban. Poriv se redovito mjeri pomoću posebne tenzometarske kapsule ugrađene u odrivnom ležaju.

Potrošak goriva može se vrlo tačno mjeriti pomoću baždarene mjerne posude, iz koje gorivo istječe u motor, i štopericu. Upotrebljavaju se i precizni tvornički mjeraci protoka goriva, koji se ugrade u cijevni vod za dovod goriva pogonskom stroju. Ka-

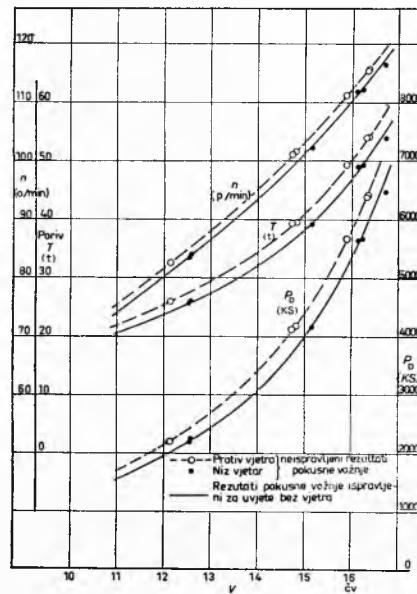
ko se količina goriva redovito mjeri po volumenu, prijeko je potrebno istovremeno mjeriti i temperaturu goriva, jer o njoj znatno ovisi njegova specifična težina. Za vrijeme mjerjenja uzima se uzorak goriva pa se kasnije u laboratoriju ispita kalorička vrijednost, jer se potrošak goriva korigira na određenu standardnu vrijednost, za koju se u našoj zemlji uzima 10 000 kcal/kg.

Vožnja izdržljivosti treba da pokaže ispravnost rada brodskog strojnog postrojenja pri nominalnom i maksimalnom opterećenju kroz određeni vremenski period, koji se, već prema zahtjevu brodovlasnika, kreće od 8 do 24 sata. Unutar tog vremena maksimalno opterećenje (obično se radi o preopterećenju za 10% iznad 100% tog nominalnog opterećenja) traje 1 sat. Za vrijeme ove vožnje određuje se specifični potrošak goriva glavnog pogonskog stroja i pomoćnih strojeva, a kod parnog postrojenja specifični potrošak goriva i pare, jer dužina trajanja vožnje, za razliku od vožnje na mernoj milji, omogućava duži ustaljeni rad postrojenja. Osim mjerjenja snage na osovini, broja okretaja i potrošaka goriva, registriraju se pritisci i temperature na brojnim mjestima postrojenja u sistemu pare, plinova izgaranja u kotlovima, ispušnih plinova motora, rashladne vode i ulja za podmazivanje. Sve ove veličine daju elemente za ocjenu ispravnosti rada i stupnja iskoristivosti postrojenja.

Vožnja izdržljivosti može se provoditi i pri lošijim vremenskim prilikama. Za vrijeme trajanja vožnje rad strojeva se ne prekida, a ako strojevi treba zaustaviti zbog kvara ili nekog drugog razloga, vožnja se ponavlja u punom trajanju. Instrumenti se očitavaju u intervalima od pola sata, a snaga na osovini i broj okretaja treba da se mjeri kontinuirano, kako bi se kontrolirao ustaljeni rad postrojenja na nominalnom opterećenju.

Pokusi kormilarenja imaju svrhu da pokažu ispravan rad kormilarskog uređaja i da pruže elemente za ocjenu manevarskih svojstava broda.

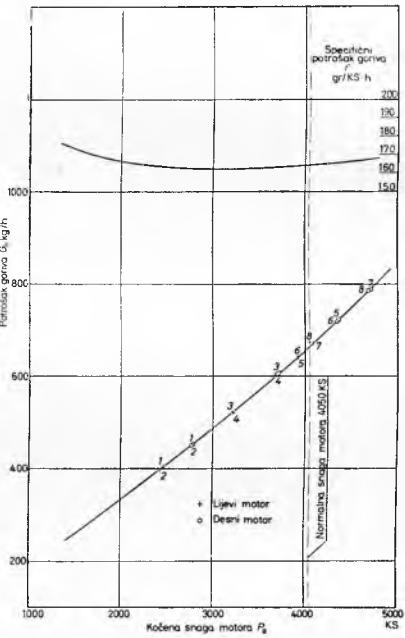
Kormilarski uređaj se ispituje u vožnji brodom, uz nominalni broj okretaja glavnog stroja, tako da se kormilo iz srednjeg položaja prebaci sasvim udesno, zatim iz ovog položaja u položaj



Sl. 33. Rezultati pokušne vožnje

modula smicanja se pretpostavlja; za obične brodske osovine kreće se oko $8,3 \cdot 10^5 \text{ kp/cm}^2 \pm 1,5\%$.

Broj okretaja osovine mjeri se obično pomoću brojila okretaja ugrađenog na motoru i baždarene štopericu, ili uređajem za



Sl. 34. Potrošak goriva izmjerjen na pokušnoj vožnji dvovijčanog putničkog broda (vijci nejednako opterećuju motore)

sasvim lijevo i ponovo u srednji položaj. Od kormilarskog uredaja se obično zahtijeva maksimalni otklon kormila od 35° na svaku stranu i vrijeme ne duže od 30 sekundi za prebacivanje kormila iz jednog u drugi krajnji pločaj, u vožnji naprijed i krmom.

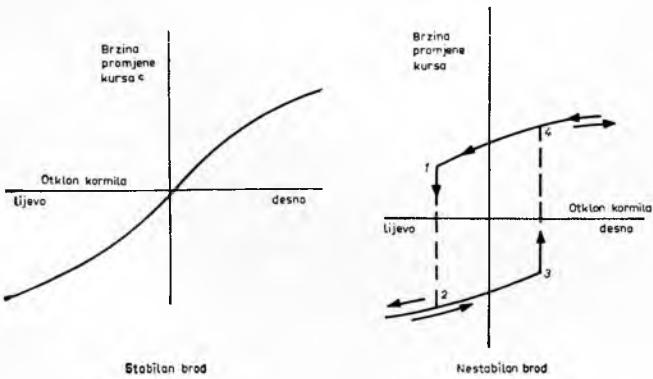
Izvođenje pokusa kruga okretanja brodom je manevar koji pruža kvantitativno mjerilo efektivnosti kormila pri gibanju broda po kružnoj putanji. Karakteristike ponašanja broda pri okretanju vrlo su značajne za ratne brodove, ali je taj pokus obično uključen i u program pokusnih vožnji trgovackog broda. Širi program pokusa kruga okretanja obuhvata više brzina broda i otklona kormila. Standardni postupak pri provođenju ovog pokusa jest ovaj: Brzina okretanja propeleru prilagodi se brzini broda kod koje se želi ispitati krug okretanja, ustali se gibanje broda po pravocrtnoj putanji i registrira se kurs broda. Kormilu se, zatim, maksimalnom brzinom daje određeni otklon i taj se otklon drži dok brod ne prevazi nešto više od čitavog kruga, ili kod ispitivanja u naučne svrhe više od kruga i pol.

Najjednostavniji način mjerjenja kruga okretanja jest brojanjem dašćica koje se bacaju s pramca broda u intervalima određenim prolazom krme broda kraj prethodno bačene dašćice. Mnожenjem broja bačenih dašćica s dužinom broda, dobiva se — samo približno — vrijednost opsega (a time i promjera) kruga okretanja. Ovaj postupak vrlo je popularan, ali tačnost mu ne zadovoljava.

Pouzdana metoda mjerjenja kruga okretanja sastoji se u ovom: Pokus se vrši oko slobodno plivajuće plutače koja se s pramci i krme broda vizira, registrirajući istovremeno u kraćim vremenskim intervalima kurs broda i kutove od simetrale broda pod kojima se vidi plutača. Budući da je poznata udaljenost među tačkama na pramcu i krmom broda iz kojih se vizira plutača, moguće je u svakoj tački mjerena odrediti položaj broda u odnosu na plutaču i odatle numerički dobiti karakteristične veličine kruga okretanja: taktički promjer, promjer ustaljenog okretanja, napredovanje, prijelaz, kut zanošenja i gubitak brzine kod okretanja (v. str. 220, sl. 25).

Za vrijerne provođenja pokusa kruga okretanja moraju biti povoljne vremenske prilike i mirno more. Pokus kruga okretanja izvodi se s otklonom kormila na lijevu i na desnu stranu jer su rezultati, naročito kod jednovječnih brodova, ovisni o strani na koju je kormilo zakrenuto.

Spiralni test (pokus spirale) s brodom pruža kvantitativno mjerilo stabilnosti kursa broda, a provodi se na ovaj način: Nakon što se brzina broda ustalila, kormilo se otkloni za 15° desno i drži u tom položaju dok se kompasom i štopericom ne ustanovi da je brzina promjene kursa broda konstantna pa se ta brzina i izmjeri. Otklon kormila se tada smanji za 5° i kormilo se u novom položaju drži dok se opet ne ustali brzina promjene kursa pa se ta brzina izmjeri. Postupak se ponavlja od otklona kormila 15° uljevo i ponovo natrag do 20° udesno, ali tako da se u području 5° desno i lijevo od nultog položaja kormila otklon kormila mijenja samo po 1° a ne po 5° kao kod većih otklona.

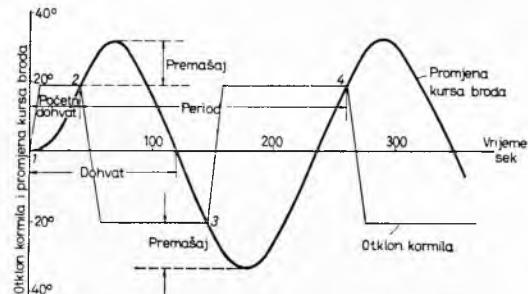


Sl. 35. Stabilnost broda na kursu

Radi analize rezultata spiralnog testa nanosi se brzina promjene kursa u ovisnosti od otklona kormila i iz toka dobivene krivulje ili krivuljā zaključuje se o stabilnosti kursa broda. Ako bez obzira na smjer otklona kormila izmjerene tačke slijede jednu kontinuiranu krivulju (sl. 35 lijevo), smatra se da je brod stabilan na kursu.

Ako mjerena daju petlju histereze (sl. 35 desno), tj. ako izmjene tačke ne leže na jednoj kontinuiranoj krivulji nego u području manjih otklona kormila na dvije različite krivulje, ovisno o smjeru promjene otklona kormila, brod je nestabilan s obzirom na držanje kursa. Tako, npr., u tački 1 sl. 35 otklon kormila je uljevo, došavši u taj položaj iz desnog otklona, a brod se još uvijek kreće u istom smjeru kao kod većih desnih otklona; ako je, pak, do istog lijevog otklona kormila došlo sa strane većih lijevih otklona, tačka 2, brod se okreće na suprotnu stranu, tj. na istu stranu kao i kod većih lijevih otklona. Stupanj nestabilnosti kvantitativno određuju dimenzije petlje, njezina visina i širina.

Cikcak-manevar (Z-test) izvodi se sa svrhom da se dobiju mjerila za ocjenu ponašanja broda kad mu se zakrene krmilo,



Sl. 36. Standardni cikcak-manevar

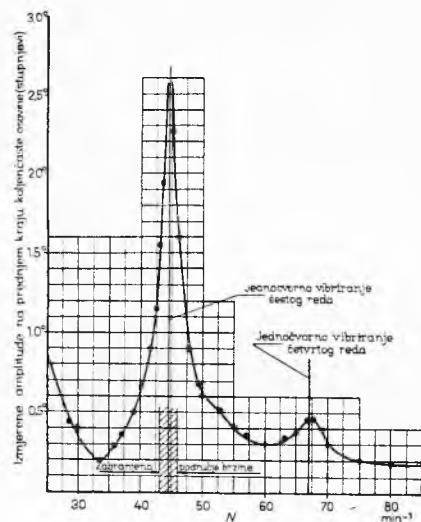
tj. za brzinu mijenjanja kursa i širinu putanje broda. Kad je brod u ustaljenom gibanju pravocrtnom putanjom, kormilo se otkloni za 20° desno i u tom se položaju drži dok se kurs broda ne promijeni za 20° udesno prema prvobitnom kursu. U tom trenutku se kormilo prebaci na 20° lijevo i drži se tako dok se i kurs broda, prolazeći kroz prvobitni kurs, ne promijeni za 20° uljevo od prvobitnog; tada se kormilo ponovo prebacuje na 20° desno pa se čeka dok brod dođe u kurs 20° udesno od prvobitnog itd. Pri tom manevaru se registriraju vremena otklona kormila i kursa broda, pa se rezultati nanesu u dijagram (sl. 36). Karakteristične veličine kojima se ocjenjuje odziv broda na otklone kormila, a koje se dobivaju cikcak-manevrom, jesu: vrijeme potrebno da se kurs promijeni za iznos jednak otklonu kormila (služi kao mjerilo sposobnosti broda da brzo promijeni kurs), premašaj kursa broda preko otklona kormila, dohvati i period.

Pri pokusu zaustavljanja broda, u vožnji punom snagom naprijed daje se zapovijed »punom snagom natrag«, pa se mjeri: vrijeme potrebno da se zaustavi osovina, vrijeme do početka okretanja osovine u suprotnom smjeru, vrijeme do postizanja nominalne brzine okretanja osovine u suprotnom smjeru, vrijeme do zaustavljanja broda i put koji je brod prevalio nakon izdavanja zapovijedi. Prevaljeni put se mjeri viziranjem plutače i snimanjem kursa broda, slično kao u pokusu kruga okretanja, ili bacanjem dašćica uz brod. Isti pokus se vrši i pri vožnji broda krmom.

Mjerenje vibracija na brodu. U program pokusnih vožnji redovito su uključena i mjerena torzijske vibracije osovinskog voda, vibracija trupa, a eventualno i lokalnih vibracija na brodu.

Mjerjenjem torzijskih vibracija provjeravaju se rezultati proračuna dodatnih naprezanja u osovinu uslijed torzijskih vibracija. Područje kritičnih brojeva okretaja osovine u kojem ova naprezanja premašuju dozvoljenu granicu zabranjeno je za rad stroja (sl. 37). Mjerjenjem se obuhvaća čitavo područje rada stroja u ustaljenom režimu, a područja rezonancije se posebno vrlo detaljno ispituju. Za mjerjenje torzijskih vibracija najčešće se upotrebljava mehanički torziograf seizmičkog tipa. Kod motornog pogona torziograf se najčešće preko remenice poveže sa čelom koljenaste osovine motora, pa se registrira relativni pomak između jednolikog rotirajućeg seizmičke mase torziografa i remenice koja se okreće nejednolikom kao i motor. Snimak ovog pomaka, torziogram, pokazuje oscilacije kuta torzije u ovisnosti o vremenu, a analizom se utvrđuje amplituda oscilacija i njihov broj u jednom okretaju motora (harmonički red). Proračunom, u koji ulaze rotirajuće mase motora, zamašnjaka, osovine i propelera, određuje se forma vibriranja (broj čvorova) i odatle dodatna naprezanja u osovinu.

Red oscilacija je povezan s brojem cilindara motora i brojem krila propelera. Kod turbinskog postrojenja torziograf se obično direktno spaja s osovinom.

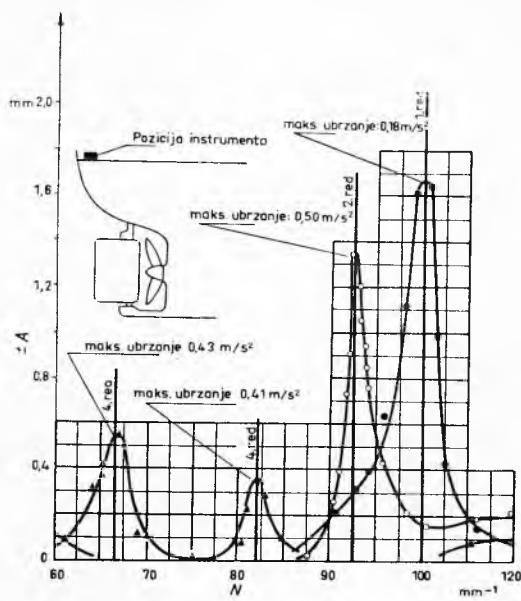


Sl. 37. Rezultati mjeranja torzijskih vibracija

Mjerenje *vertikalnih i horizontalnih vibracija* brodskog trupa ima svrhu da odredi vlastite frekvencije i forme vibriranja trupa kao grede. Najprije se u čitavom području brzina okretanja propelera izmjere vertikalne vibracije krajnje tačke na krmi broda da bi se odredile rezonancije brodskog trupa (sl. 38). Odrede se i akceleracije koje se pri tom javljaju, jer su one osnov za ocjenu dinamičkog opterećenja brodske konstrukcije i podnošljivosti vibracija za čovjeka. Zatim se u ustaljenoj vožnji broda s brojem okretaja propelera koji daje rezonanciju mjere vibracije po čitavoj dužini broda, da bi se odredila forma vibriranja trupa. Mjerna mjesta moraju biti na čvrstim spojevima trupa, npr. na palubi nad pregradom ili neposredno uz bok broda, da u mjerjenju ne bi bile uključene i lokalne vibracije limova palube ili nadgrada. Instrumenti za mjerjenje vibracija trupa su razni tipovi mehaničkih ili električkih vibrografova.

Lokalne vibracije se rijetko mijere. Obično se samo direktnim zapažanjima odredi mjesto lokalnih vibracija, a ukoliko se žele odrediti i njihove amplitude, upotrebljavaju se ručni mehanički ili električki vibrometri.

Mjerenja za vrijeme službe broda daju najvjerodstojnije podatke za ocjenu propulzivnih i maritimnih svojstava broda u



Sl. 38. Rezultati mjerjenja vibracija krme

uvjetima službe. Radi mjerjenja performansa broda u službi izabire se iz serije brodova jedan brod ili dva, već prema veličini serije; oni se oprema potrebnim instrumentima i na njih se privremeno ukrcava specijalna ekipa koja obavlja mjerjenja. Veličine koje se mijere jesu: brzina broda, snaga i brzina okretanja stroja, potrošak goriva, poriv, brzina i smjer vjetra, amplitude i frekvencije nadolazećih valova, gibanja broda na valovima, naprezanja brodskog trupa i opći uvjeti opterećenja broda.

Brod treba opremiti instrumentarijem, kao da primopredajnu pokusnu vožnju, a osim toga brzinomjerom baždarenim na mjerenoj milji, anemograffom, valomjerom (npr. Tuckerkovim valografom koji se ugraduje u podvodni dio brodskog trupa), akcelerometrima za mjerjenje linearnih gibanja broda na valovima i giroskopima za mjerjenje kutnih gibanja, te otpornim trakama za mjerjenje napona u trupu. Prilikom dokovanja broda posebnim se instrumentima izmjeri hraptavost podvodnog dijela trupa i propelera, obraslih dugim boravkom u moru i očišćenih u doku.

Najinteresantniji podatci koji ovakva mjerjenja pružaju jest gubitak brzine broda zbog obrašlosti brodske oplate i zbog vremenskih prilika kojima je brod izložen u uvjetima službe. Podaci mogu poslužiti pri izboru optimalnog intervala dokovanja i pri izboru i ocjeni brzine broda u službi. Na osnovu rezultata mjerjenja u uvjetima službe na teretnom brodu od 10 000 t prikazano je na sl. 39 kako se povećava snaga potrebna da se održi ista brzina u različnim vremenskim prilikama.

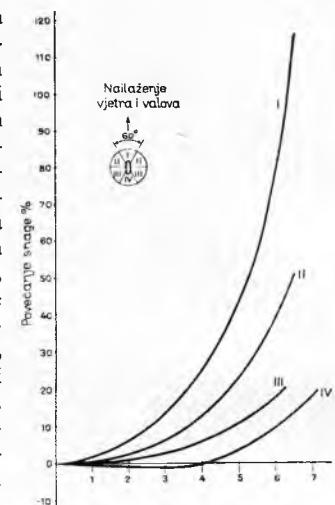
Ako se performanse broda prate kroz duži vremenski period, rezultati otkrivaju kako mu sa starenjem opada brzina u službi. Posebno su dragocjeni takvi rezultati ustanovama za ispitivanje brodskih modela, jer omogućavaju pouzdanije preračunavanje rezultata ispitivanja u bazenu na uvjete stvarnog broda u službi.

Theorija gibanja broda i naprezanja trupa na valovima daljnje je područje koje mjerena u službi obogaćuju novim spoznajama. Kad bi brodarsko poduzeće mjerjenjima performansi broda u službi sistematski obuhvatilo cijelu svoju flotu, moglo bi procijeniti koje su jedinice u pogledu ponašanja u uvjetima službe najuspjeli, moglo bi kod narudžbe novih brodova od projektanta tražiti da projektom ostvari poznate optimalne zahtjeve, a ujedno bi moglo projektantu pružiti i niz dragocjenih tehničkih podataka koji bi mu olakšali posao.

M. Fancev

LIT.: Priručnici. G. C. Maning, Manual of naval architecture, New York 1930. — Johow-Förster, Priručnik za brodogradnju (prijevod s njemačkog), Zagreb 1951. — F. Caffier, Manuale del tecnico navale, La Spezia 1952. — E. Baker, Introduction to steel shipbuilding, New York-London 1953. — C. Makrow, Naval architect's and shipbuilder's pocket book, London 1954. — Autorenkollektiv, Fachkunde für Stahlschiffbauer, Berlin 1955. — E. Giboin, J. Legris, A. Rialland, Aide-mémoire Martinenq des constructions navales, Paris 1958. — W. Henschke, Schiffbautechnisches Handbuch, Berlin 1964.

Theorija broda. F. Horn, Theorie des Schiffs, Leipzig 1928. — D. Taylor, Speed and power of ships, Washington 1943. — H. A. Nikolaev, Bokovočni spisak i ero pacuet, Moskva 1946. — K. Davidson, L. Schiff, Turning and course-keeping qualities, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 54, New York 1946. — M. J. Afrepreš, Судовые двигатели, Moskva 1947. — T. Theodorsen, Theory of propellers, New York 1948. — A. A. Lukashevich, A. D. Perzik, G. A. Firsov, Теория корабля, Leningrad 1950. — G. Weinblum, M. St. Denis, On the motion of ships at sea, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 58, New York 1950. — C. H. Blagoveshchenskiy, Справочник по теории корабля, Leningrad 1950. — M. Strscheletzky, Hydrodynamische Grundlagen zur Berechnung der Schiffsschrauben, Karlsruhe 1951. — G. Baker, Ship design, resistance and screw propulsion, Liverpool 1951. — F. Gebers, Das Schaufelrad im Modellversuch, Wien 1952. — W. P. A. van Lammeren, L. Troost, J. G. Koning, Otpor i propulzija brodova (prijevod s engleskog), Zagreb 1952. — A. M. Robb, Theory of naval architecture, London 1952. — H. Herzer, K. Rusch, Die Theorie des Schiffs, Leipzig 1952. — M. St. Denis, W. Pierson, On the motion of ships in confused sea, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 61, New York 1953. — E. L. Atwood, Theoretical naval architecture, London 1953. — J. Fatur, Teorija broda, Zagreb 1954. — M. Strscheletzky, Berechnungskurven für dreiflügelige Schiffsschrauben, Karlsruhe 1955. — W. Ulrich, E. Danckwardt, Konstruktionsgrundlagen für Schiffsschrauben, Leipzig 1956. — Г. Е. Павленко, Сопротивление воды движению судов, Moskva 1956. — Proceedings, Symposium on the behaviour of ships in a seaway, Wageningen 1957. — H.



Sl. 39. Procenato povećanje snage kod različnih vremenskih prilika

Saunders, Hydrodynamics in ship design, New York 1957. — A. Lap, J. D. van Manen, Fundamentals of ship resistance and propulsion, Haarlem 1958. — H. Rossel, L. Chapman, Principles of naval architecture, New York 1958. — Я. И. Войткусский, Теория волны и волнового сопротивления, Ленинград 1959. — Я. И. Войткусский, Р. Я. Першич, И. А. Титов, Справочник по теории корабля, Ленинград 1960. — К. Т. Braun, Herstellung von Schiffs-schrauben, Leipzig 1960. — G. Vossers, Fundamentals of the behaviour of ships in waves, Rotterdam 1961. — B. V. Korvin-Kroukovsky, Theory of sea-keeping, New York 1961. — К. К. Федорев, Г. Б. Соболев, Управляемость корабля, Ленинград 1963. — А. М. Басин, И. Я. Минищев, Теория и расчет гребных винтов, Ленинград 1963. — Я. И. Войткусский, Сопротивление воды движению судов, Ленинград 1964. — The Shipbuilding Research Association of Japan, Design charts for the propulsive performances of high speed cargo liners, Tokyo 1964.

Cvrstoča broda. W. Dahlmann, Festigkeit der Schiffe, Berlin 1925. — П. Ф. Панкович, Теория упругости, Ленинград-Москва 1939 — Ч. Ф. Панкович, Строительная механика корабля, Москва, 1945/57. — F. Sinzig, Cvrstoča broda, Zagreb 1951. — F. Bart, Festigkeitsberechnung im Stahlenschiffbau, Leipzig 1957. — В. В. Давыдов, Н. В. Маммеч, И. Н. Сверчев, Учебный справочник по прочности судов внутреннего плавания, Москва 1958. — F. H. Todd, Ship hull vibration, London 1961. — А. А. Курдиюсов, Вibration корабля, Ленинград 1963.

Konstrukcija, gradnja i oprema broda. H. F. Garyantes, Handbook for shipwrights, New York-London 1944. — А. И. Балакшин, Технология кораблестроения, Ленинград-Москва 1946. — А. Mengoli, Scafi metallici, Genova 1952. — А. Mengoli, Scafi in legno, Genova 1953. — А. Mengoli, Complementi di costruzione navali, Genova 1954. — F. L. Bullen, Ventilacija i grijanje brodova (prijevod s engleskog), Zagreb 1955. — V. K. Dormontov, Tehnologija brodogradnje (prijevod ruskog), Zagreb 1957. — H. Meussling, Der Schiffsbau, Leipziger 1957. — E. Chicot, Construction du navire de commerce, Paris 1960. — J. P. de Haan, Rigging, equipment and outfit of seagoing ships, Haarlem 1951. — G. de Rooy, Steel ship construction, Haarlem 1961. — G. Blake, Lloyd's Register of Shipping 1760—1960, Crawley 1961. — А. В. Александров, Судовые системы, Ленинград 1962.

Brodski pogonski i pomoćni strojevi. G. Bauer, Der Schiffs-maschinbau, München 1941. — W. Ulrich, Schiffsdieselmashinen, Leipzig 1942. — J. M. Labberton, Marine engineering, New York-London 1943. — П. И. Титов, Судовые силовые установки, Ленинград 1951. — Б. А. Горбунов, Ф. Л. Юдичкий, Конструкция судовых паровых машин, Москва 1953. — П. А. Акимов, Судовые силовые установки, Москва 1956. — W. Leder, Schiffsmaschinenkunde, Leipzig 1957. — А. Г. Курzon, Судовые паровые и газовые турбины, Ленинград 1958. — M. Mikulićić, Brodski pomoćni strojevi i uredaji, Zagreb 1958. — E. Ludwig, K. Seljes, Handbuch für Schiffssingenieure und Seemaschinisten, Braunschweig 1958. — G. Broersma, Marine reduction gears, Haarlem 1961. — А. И. Голубченко, Т. Е. Эпельман, Судовые силовые установки, Ленинград 1962. — А. Г. Курzon, О. Г. Литвинин, Е. В. Петров, В. А. Помаев, А. Г. Хорозян, А. Л. Чернов, Р. М. Юшкевич, Судовые паровые и газовые турбины, Ленинград 1962. — В. А. Ваншицт, Судовые двигатели внутреннего сгорания, Ленинград 1962. — А. П. Арыков, В. Ф. Воронов, Судовые вспомогательные механизмы, Ленинград 1963.

Projektiranje broda. B. Lazarev, Osnove projektiranja trgovackih brodova (prijevod s ruskog), Zagreb 1951. — H. Herner, R. Verhousek, Entwurf und Einrichtung von Handels-schiffen, Leipzig 1945. — H. Zemke, Das Schiff und seine wirtschaftliche Gestaltung, Leipzig 1954. — А. Kari, Projektiranje i troškovi gradnje trgovackih brodova (prijevod s engleskog), Zagreb 1954. — J. Molenaar, Osnivanje i oprema broda (prijevod s holandskog), Zagreb 1955. — D. Arnott, Design and construction of steel merchant ships, New York 1955. — G. C. Manning, The theory and technique of ship design, New York-London 1956. — J. C. Arkenbout-Schokker, E. M. Neuerburg, E. J. Vossnack, B. Burghgraef, The design of merchant ships, Haarlem 1957. — Б. М. Смирнов, Экономический анализ при проектировании морских судов, Ленинград 1961. — Л. М. Ноуэл, Проектирование морских судов, Ленинград 1964.

Eksperimentalna istraživanja u brodogradnji. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Standardization trials code, New York 1949. — The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Code on instruments and apparatus for ship trials, New York 1952. — North East Coast Institution of Engineers & Shipbuilders, Ship trials and service performance analysis, Newcastle upon Tyne 1960.

S. Šilović S. Ercegović V. Podlesnik
J. Uršić A. Leibenfrost M. Molnar
A. Vučetić J. Šretner A. Sentić
M. Mikulićić M. Fancev

BRODOGRADILIŠTE, poduzeće za gradnju i popravke brodova. Postoje uglavnom tri vrste brodogradilišta: autonomna brodogradilišta, montažna brodogradilišta i brodogradilišta za popravke brodova.

Autonomna brodogradilišta mogu u svojim pogonima, osim trupa broda, proizvesti i glavne pogonske strojeve, pomoćne strojeve i osnovne dijelove opreme broda. Drugim riječima, autonomna brodogradilišta nabavljaju poluproizvode i fabrikate pa izraduju i trup i opremu broda. Potpuno autonomnog brodogradilišta nema, jer sva brodogradilišta moraju kupovati specijalnu opremu, navigacijske i ostale instrumente itd. Brodogradilišta mogu imati u svom sastavu čak i valjaonice limova i profila, tj. izradivati i polufabrikate, ali to je rjeđi slučaj.

Montažno brodogradilište je brodogradilište u užem, običajnom smislu. U takvom brodogradilištu obraduju se limovi i profili i izrađuje samo trup broda, a sve ostalo se nabavlja i montira. Osnovni princip organizacije brodogradilišta je jeftina izgradnja trupa broda, povoljna nabava opreme i minimalni troškovi ugradnje opreme u trup. Medutim, da li će se neko brodogradilište osnivati samo ili pretežno za izradu trupa, to ne ovisi jedino o onome tko osniva brodogradilište nego i o tome gdje je brodogradilište locirano. Brodogradilišta sjeverne Evrope, dakle u zemljama koje

imaju razvijenu metalnu i ostalu industriju, mogu se organizirati i samo za gradnju trupa broda. Brodogradilišta u manje razvijenim industrijskim zemljama, koja opremu kupuju u inozemstvu, nužno moraju imati izvjesne pogone za izradu opreme, jer dugi rokovi isporuke i visoki transportni troškovi iziskuju da se neki dijelovi opreme izrađuju u brodogradilištu. Zato brodogradilišta osnovana u Njemačkoj, Engleskoj, Francuskoj, Nizozemskoj itd. imaju jako razvijene brodogradevne odjeljenja (brodogradevne radionice i navoze), a ostale radionice, kao strojogradevne, cjevodavne, bravarske, električarske itd. tek su toliko velike da mogu poslužiti kao priručne radionice potrebne za montažu opreme.

Brodogradilišta za popravke brodova, ako se bave isključivo popravcima, razlikuju se od ostalih brodogradilišta po tome što su im svi pogoni podjednako razvijeni. Brodogradilišta često grade nove i popravljaju stare brodove. Iako se tehnološki postupci gradnje brodova prilično razlikuju od radova na popravcima, brodogradilišta se bave jednim i drugim poslovima da bi mogla ravnopravno zaposliti svoje kapacitete. Kad prestane konjunktura narudžbi novih brodova, uravnotežuje se opterećenje kapacitete popravcima. Da bi za vrijeme krize uposila svoje kapacitete, brodogradilišta se bave poslovima koji nemaju veze s brodovima: izrađuju čelične konstrukcije, rezervoare i slično. U zemljama s razvijenom brodogradevnom industrijom postoje i brodogradilišta specijalizirana za gradnju određenog manjeg broja tipova brodova međusobno sličnih u pogledu tehnologije izgradnje. Ima npr. brodogradilišta koja grade samo trampere. Ratne mornarice nekih država imaju svoja brodogradilišta samo za izgradnju ratnih brodova (Amerika, SSSR, Francuska itd.). Brodogradilišta ratne mornarice su povezana s mornaričkim bazama, koje su skup mornaričkih pogona, skladišta i obala u sklopu ratne luke.

Treba razlikovati morska od riječnih brodogradilišta. Brodogradilišta na moru imaju po pravilu uzdužne navoze i porinju brodove uzdužno. Riječna brodogradilišta imaju bočne navoze i porinju bočno. Riječni brodovi rijetko kada prelaze veličinu od 1500 tona nosivosti, pa su riječna brodogradilišta, s obzirom na strojeve i uredaje, relativno manja.

Poznato je kako su izgledali brodovi starog i srednjeg vijeka, zna se dosta i o njihovoj konstrukciji i opremi, ali jedva da se išta zna kako su izgledala brodogradilišta gdje su se brodovi gradili. Uglavnom su to bile dobro zaštićene površine na morskoj obali ili na ušćima rijeke. U Evropi je osnovni materijal za gradnju brodova bio hrast, pa se nastojalo da brodogradilišta budu blizu hrastovih šuma ili na takvim mjestima da kojih se lako dopremala prvoj redu hrastova, a zatim borova grada. Drveni brodovi su se gradili ručnim alatom na otvorenim kosim dijeljevima pa su se na jednostavnim saonicama porinjavali u more, tako da nisu bile potrebne velike investicije (sl. 1).

Do početka XVIII st. brodogradnja se smatrala umjetnošću. Nisu postojali nacrti ni proračuni već su se brodovi gradili prema iskuštvima stečenim naranje izgradenim brodovima i prema intuiciji brodograditelja. Industrijska revolucija izazvana izumom parnog stroja odrazila se je i u brodogradnji. Balyani su se počeli piliti u daske pomoću stroja, pa su se gradevni dijelovi broda brže izrađivali. Sve je to utjecalo na to da se gradnja drvenih brodova, koji su se sve više i više tražili, razvila u organizirani rad većeg obima. Ali tek kad se u brodogradnji počeo upotrebljavati čelični kao gradevni materijal i kad se za pogon brodova počeo ugradivati parni stroj, brodogradilišta su stvarno postala industrijska poduzeća.



Sl. 1. Gradnja drvenog broda u Srednjem vijeku