

DK 621.24.001.6

Hidroelastične vibracije ter razvoj hidravličnih strojev in hidromehanske opreme

JANKO BLEIWEIS

V prvih dneh septembra 1963 je bil v Londonu 10. kongres mednarodnega združenja za hidravlične preiskave (AIRH), na katerem sta bili med štirimi obravnavanimi vprašanji tudi dve, ki sta pomembni za strojništvo, posebno še za sektor, ki se peča s projektiranjem in izdelavo hidromehanske opreme in hidravličnimi stroji.

V programu sta bili namreč kot tretje vprašanje: hidroelastične vibracije in kot četrto: sodoben razvoj hidravličnih strojev in hidromehanske opreme.

Ker bi bilo težavno v krajšem izvlečku ustrezno podati vsebino manjšega števila prispevkov, ki posegajo v same fizikalne fenomene ali skušajo matematično analizirati hidrodinamične vibracije, se bomo v naslednjem omejili le na kratek prikaz tistih prispevkov, ki govore o konkretnih primerih, ozir. prispevkov, ki jih lahko praktično apliciramo pri reševanju analognih primerov.

Zaradi utrujanja materiala skušamo vibracije na splošno omejevati ozir. določati tista območja delovanja konstrukcij, kjer bi bile vibracije lahko nevarne. Skratka: imeti želimo jasno sliko delovanja konstrukcije v vseh možnih primerih. Če se je del prispevkov ukvarjal z vprašanji, kakšne okoliščine dovajajo do vibracij in poškodb ter so avtorji skušali dati nekaj bolj splošno veljavnih določil za preprečevanje, je manjši del prispevkov pokazal, kje in kako so prav take hidrodinamične vibracije lahko uporabne in koristne.

Tako je npr. znano, da v eksperimentalni in proizvodni praksi zdaj čedalje pogosteje uporabljamo vibracije z visoko frekvenco. Ker so generatorji takih frekvenc na splošno zelo dragi, priporočata avtorja (M. Priest in C. Shih z univerze Auburn, ZDA) uporabo hidravličnih sredstev za proizvajanje visokofrekvenčnih vibracij. S posebnim načinom uporabe konvergentno divergentnih redukcijskih cevni kosov, z odtekanjem fluida skozi delno odprt zasun itd. lahko pridobimo vibracije s 400 do 8000 Hz. Tudi pri črpanju iz velike globine lahko koristno uporabimo princip hidrodinamičnih vibracij. Podobno kakor v elektriki izme-

nični tok — prenaša generator frekvenc skozi steber fluida hidroelastične valove na črpalno instalacijo v veliki globini. Ta pretvarja impulze v črpanje. S črpanjem pa povzroča v vlakih valov močne diskontinuitete, ker dela pol faze s tlakom, ki je enak črpalnemu, in pol faze nato s potisnim tlakom. Tako povzročajo pogoji ob koncih sistema diskontinuitete v prenosu in s tem okoriščanje s principom hidroelastičnih vibracij. Avtor (Cioc — Hidrotehnični inštitut, Bukarešta) navaja računske metode za določanje osnovnih elementov naprave, ki deluje po tem principu. Vibracije lahko koristno izrabimo tudi pri refuliranju (Maruta — Hidrotehnični inštitut, Bukarešta). Pri takih napravah se lahko za krajši čas pojavljajo pretoki, ki presegajo nominalne. Ta pojav je posledica dodatne kinetične energije, ki jo podeljuje črpani masi oscilatorno obratovanje črpalke in povzroča tudi nihanje tlakov v cevi. Če se v takem primeru v bližini črpalke pojavijo tlaki, ki so manjši od črpalnega tlaka, se zaradi razlike tlakov odpro ventili in črpalna požre tako nekaj več mase. Tudi tu so dane računske osnove za določitev pogojev obratovanja, ki izkoriščajo vibracijski efekt.

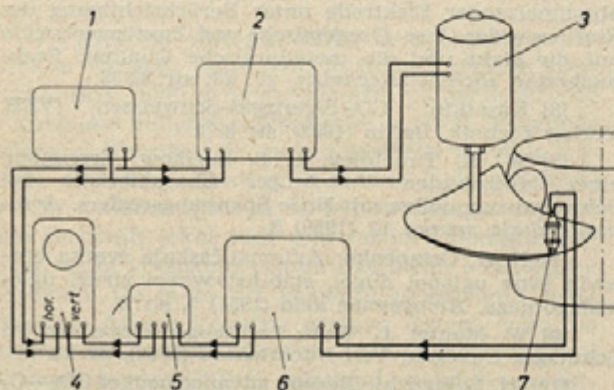
Samo eden od ostalih prispevkov (Lecher — Escher Wyss, Zürich) razmotriva periodično odlepljanje toka na koncu turbinskih lopatic v smeri toka in možnost nastanka vibracij, če pridejo periode odlepljanja v resonanco s frekvenco stroja. Le-ta daje razen primerjave rezultatov eksperimenta in računa tudi napotke za odpravo odlepljanja. Sicer pa se vsi ostali prispevki ukvarjajo z določanjem vibracijskih pojavov na zasunih in zapornicah.

Najpomembnejše je delo Abeleva (VNIIG — Moskva), čigar prispevek je samo zelo kratek povzetek dolgoletnega raziskovanja vibracij hidrodinamičnih tlakov, ki učinkujejo na zapornice raznih vrst. Ob poznavanju nihajočih hidrodinamičnih obremenitev lahko za zapornice določimo njihovo varnost in jim s primernimi ukrepi tudi lahko podaljšamo življenjsko dobo. Avtorju je uspelo najti splošne enačbe, ki označujejo vibracijske značilnosti tako za globinske, tablaste, segmente in druge zaklopke kakor tudi za tablaste zapornice z možnostjo preliivanja in odtekanja izpod table.

Ostali prispevki se pečajo večinoma z enim samim tipom zapornic. Američani so v vicksburški raziskovalni ustanovi (Murphy) podrobno proučevali segmentne zapornice manj običajnega tipa, ki se deloma spušča in tudi dviga. Določili so konstruktivne kriterije, ki zmanjšujejo vibracije. Razen tega so precej natanko analizirali razliko med dviznimi silami pri suhi ter pri dinamično obremenjeni zapornici in iskali ukrepe, ki zmanjšujejo potrebne dvizne sile, ne da bi pri tem zvečali nevarnost vibracij.

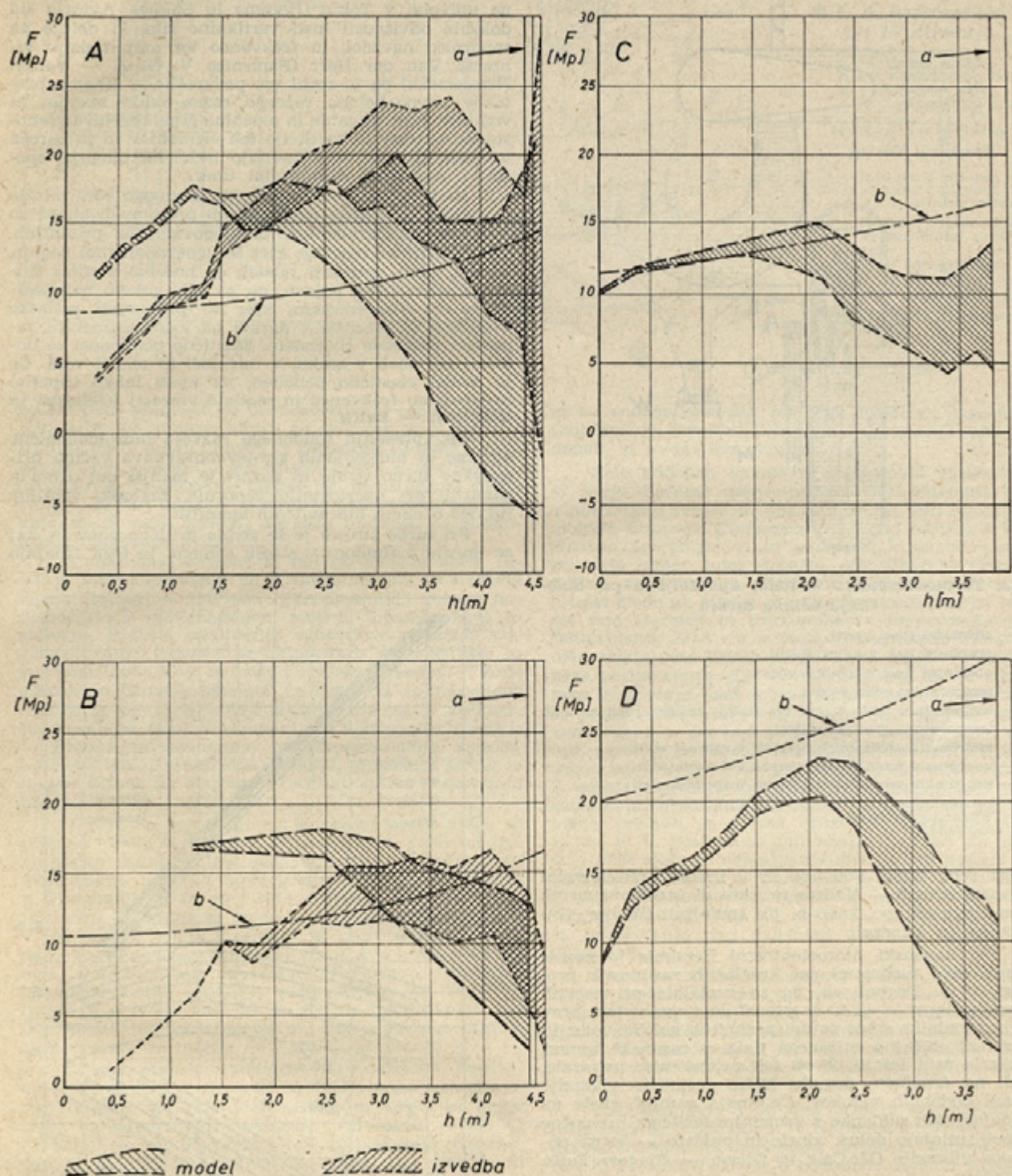
Računska metoda za aproksimativno določitev oblike prelivne zaklopke, tako da ta ni izpostavljena nevarnosti vibracije, je dal Grčić z zagrebške univerze.

Tablaste zapornice obravnavajo trije prispevki. Pri globinski tablasti zapornici za elektrarno Benmore so podrobno proučevali možnost pojava resonance med lastno frekvenco in vrtinci, ki se pojavljajo pri manevriranju za zapornico (Perkins — Wellington, New Zealand). Iztekanje vode izpod zapornice povzroča vibracije in Kolkman (Delft) daje metodo, s katero lahko določimo odnose med amplitudami in frekvenc, tlačno višino itd. pri počasnem nihanju in pri nihanju v resonanci. Dober ukrep proti vibracijam, ki jih povzroča iztekanje izpod table, je primerno oblikovanje spod-

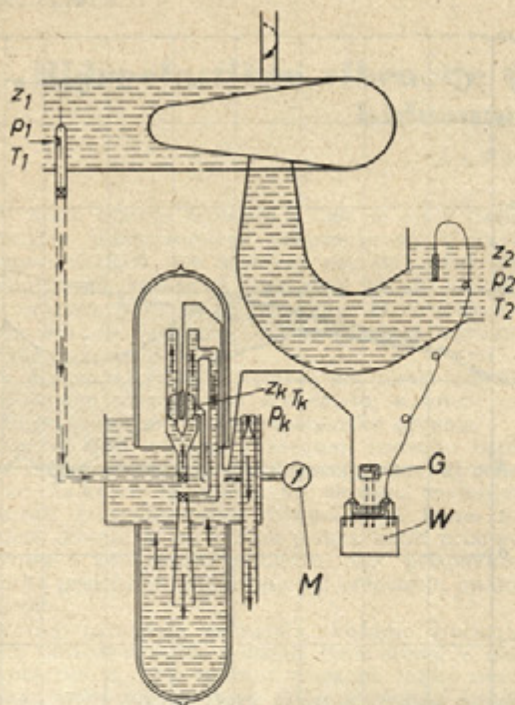


Sl. 1. Shema aparatur za merjenje naravnih frekvenc modelnih tekačev v območju roba turbinske lopatice

- 1 — nizkofrekvenčni generator,
- 2 — 20 W ojačevalnik moči,
- 3 — 20 W elektronski vzbujevalnik,
- 4 — osciloskop,
- 5 — razvrščevalnik amplitud,
- 6 — analizator frekvenc,
- 7 — elektromagnetna sonda.



Sl. 2. Dvižne sile pri segmentnih zapornicah z vzvodnim tečajem na dovodnih sistemih splavnic



Sl. 3. Termodinamična metoda, uporabljena pri določanju učinka turbin

p_1 — absolutni tlak v cevi,
 p_k — absolutni tlak v kalorimetru,
 p_2 — absolutni tlak v spodnji vodi;
 T_1 — temperatura vode v cevi,
 T_k — temperatura vode v cevi pri tlaku, reduciranem na 1 at,
 T_2 — temperatura spodnje vode;
 z_1 — koordinata središčnice prereza v zgornji vodi,
 z_k — koordinata središčnice prereza v kalorimetru,
 z_2 — koordinata središčnice prereza v spodnji vodi;
 G — galvanometer,
 W — Wheatstonov mostič,
 M — manometer.

njega roba table. Podobno so v indijski raziskovalni ustanovi Poondi — Madras raziskovali vzroke nevarnih vibracij in ukrepe, kako bi jih zmanjšali (Walter, Ganapathy in Thomas).

Pri kanadski hidroelektrarni Bersimis je nameščenih pred turbinami pet kroglastih zasunov s premeri 3,6 m. Dognali so, da so nastajale pri zaprtih zasunih vibracije, ki so se prenašale v ves sistem prav do izravnalnika samo zaradi neznatnih količin vode, ki je zaradi slučajno znižanega tlaka v zasunski komori odtekala med tesnili, ki za tak primer niso ustrezala. Tudi na črpalnem dovodu lahko nastanejo vibracije zaradi podobnih vzrokov. Če imajo namreč glede na vladajoči tlak zaklopke z vzmetnim ležiščem premočne vzmeti, ostajajo delno odprte in puščajo — to pa povzroča vibracije (Mc Caig in Gilson — Niagara Falls, Canada).

Pri spodnjih vratih splavnice pri elektrarni Jochenstein so pulzacije tlakov odtrgale eno krilo z ležajev. Valovanje, ki je nastajalo ob čelnih vratih in se je prenašalo vzdolž splavnice, je prišlo v resonanco z nihanjem mase vode, ki je bila med steno splavnice in med krili spodnjih vrat. Da bi se zavarovali pred podobnimi neprililkami, je avtor (Partensky — univerza Laval, Quebec) dal računsko metodo, s katero lahko določimo nevarne obremenitve.

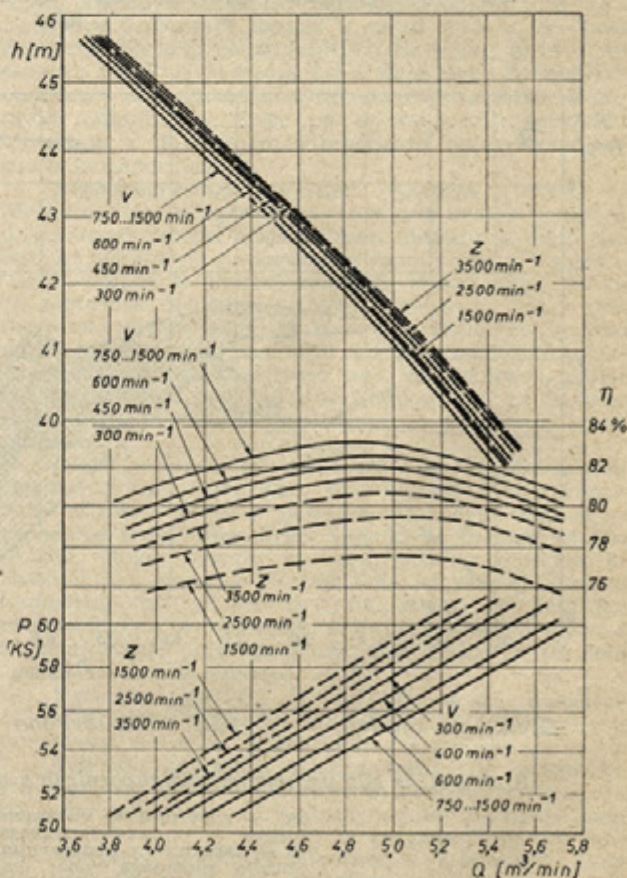
Za model okroglega ploščatega zasuna s premerom 1500 mm so vibracijske lastnosti in odvisnosti od ve-

likosti odprtine in od količine včrpanega zraka merili na univerzi v Tokiu (Homma in Shima). Avtorja sta določila odvisnosti med vertikalno silo, ki deluje na zapornico navzdol, in frekvenco ter amplitudami vibracij. Van der Herr (Papirnice V. G. Z. — Velsen Nizozemska) pa je zbral vse povzročitelje nihanja pretokov: cevna kolena, razcepe, razne oblike zasunov in ventilov, centrifugalne in aksialne črpalke. Navaja enostavne ukrepe za korekcijo teh elementov in priporoča v sistemih, kjer se pojavljajo neželena nihanja, specialno zamišljen umirjevalni tank.

Med navedenimi avtorji jih je mnogo kontroliralo teoretične zaključke na modelnih preiskavah ali pa so rezultate eksperimentov pregledovali na prototipih. Take kontrolne meritve, kjer so ugotavljali tudi pogoje, ki jim mora ustrezati model, če hočemo z njim študirati vibracijske pojave, pa so bile gotovo najboljše na Nizozemskem, kjer so primerjali podatke z modela in meritve v naravi na ločni segmentni zapornici pregrade Hagestein. Elastično podobnost so določali pri obeh v zraku, v mirujoči in tekoči vodi. Če je model elastično podoben, na njem lahko uspešno proučujemo frekvence in module vibracij (Geleedst in Kolkman — Delft).

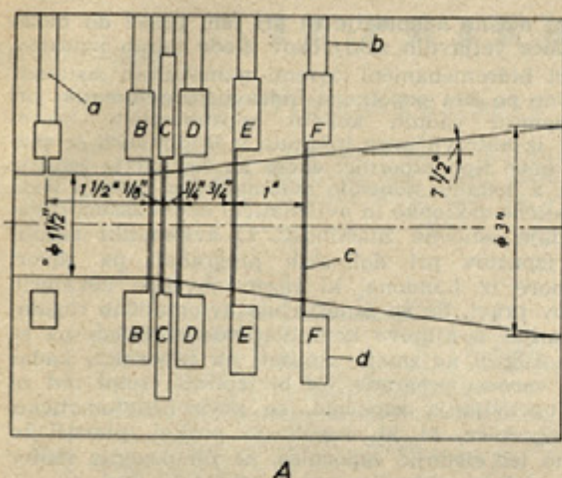
Ob vprašanju sodobnega razvoja hidromehanične opreme in hidravličnih strojev obravnava večina prispevkov turbo stroje in govori le manjši del o novih zamislih pri načrtovanju zapornic, zaklopk, ventilov itd. ter o novih hidravličnih aparatih.

Pri turbo strojih je še vedno prilično nejasno, kaj se dogaja s fluidom v stroju samem. Iz tega izhajajo

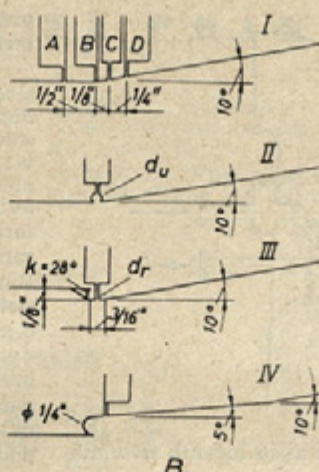


Sl. 4. Primerjava podatkov za črpalke. Vsi podatki se nanašajo na specifično težo $999,5 \text{ kp/m}^3$ ($= 62,4 \text{ lb/ft}^3$) in vrtilno hitrost 1500 min^{-1}

h — tlačna višina, P — moč na gredi, η — izkoristek, Q — pretok; V — poskusi z vodo, Z — poskusi z zrakom.



A



B

Sl. 5. A. Razporeditev rež pri 15° difuzorju

- a — tlačni dovod,
b — sesalni odvodi,
c — sesalne reže,
d — izenačevalni kanal.

B. Različne izvedbe pri 20° difuzorju

- I — izvedba z režami;
II — izvedba z utorom,
 d_u — premer utora;
III — izvedba s konvergenco in različnimi premeri reže,
K — konvergenca,
 d_r — premeri reže: 0,015",
0,05", 0,1", 0,15";
IV — izvedba z odmikom utora.

po eni plati tendence po poenostavljanju osnov za projektiranje teh strojev, hkrati pa se v celi vrsti ustanov trudijo, da bi dobili čimveč in čimboljše podatke o tem, kar se godi v stroju. Tako imamo povrh prispevkov, ki propagirajo posplošene metode za projektiranje turbo strojev, še več takih, v katerih si raziskovalci prizadevajo, da bi našli čimbolj dognane možnosti za spremljanje dogajanja v strojih.

Z analitično metodo, ki naj bi določila način nihanja hidrodinamičnih sil v turbo strojih, se ukvarja Diana Copley — Harlow. Hidrodinamični rotorji nadomeščajo v matematičnem modelu lopate rotorja in statorja. Rešitve analitičnih nastavkov pokažejo odvisnosti med kakovostjo dinamičnih obremenitev in številom lopat. Dva avtorja z univerze Assiut — ZAR (Sadek in Sinbel) izhajata iz tega, da so teoretične osnove za vse turbo stroje enake in dajeta — ne glede na to, ali je stroj konsument ali ustvarjalec energije — osnove za poenoteno brezdimenzionalno metodo, s katero lahko predhodno ocenimo dimenzije stroja in njegov učinek ter olajšamo določitev vpliva posameznih parametrov na koeficiente.

Ker je na kraju samem kontrola stroja draga in težavna — saj terja dolge priprave, med katerimi trpi normalen obrat — ima metoda termodinamične kontrole stalno nove in nove pristaše (Tom — univerza v Glasgowu), ki že od l. 1914 zagovarjajo in razvijajo ta način. Osnovana je na tem, da se energijske izgube v stroju pretvarjajo v toploto, ki segreva fluid. Avtor podrobno opisuje aparate in zlasti dva nova sestavna dela, potrebna pri merjenju. Primerjava rezultatov termodinamičnih meritev, napravljenih na različnih turbinah s padci med 27 in 400 m, z meritvami, napravljenimi na klasičen način, kaže določene razlike. Temperature se merijo do 0,001 °C natančno.

Ceprav prenos rezultatov laboratorijskih meritev na turbo strojih na prototip ni vselej popolnoma osnovan in ima modelno merilo določen vpliv, ki ga je treba še sistematično preiskati (Vercasson — CREC, Francija), se vendar turbo stroji najpogosteje ovrednotijo v laboratorijih. Uporaba zraka ima pri takih preiskavah mnogo prednosti (Worster — Harlow), vendar jo je za vodne črpalke zaradi stisljivosti zraka težko izvedljivo. Kljub temu je potek karakterističnih krivulj za H , Q in η podoben, če delamo z enakimi Re . Modelna črpalka pa mora biti taka, da je njena vrtilna hitrost lahko tudi do desetkrat večja kakor vrtilna hitrost prototipa. Zaradi določil raznih novih standardov in sklepov mednarodnih elektrotehniških komisij še niso določene splošne metode in pravila za meritve manometrične višine dviga pri črpalakah. Prispevek Nixon in Spencerja iz oddelka za mehaniko fluidov NEL, ZDA daje predloge za enotne preizkuse črpalak

in za enoten postopek pri tem. Predlaga napotke za označevanje karakteristik črpalak in omenja tudi vire napak, ki so pri tem možne.

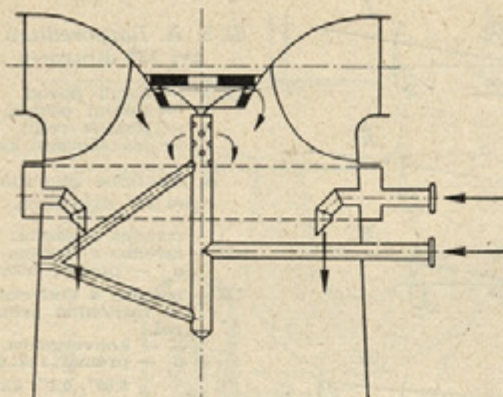
Zelo podobno nalogo so si zastavili raziskovalci, ki želijo direktno meriti in vrednotiti hitrostna polja v notranjosti črpalak in uporabljajo pri tem fotografske metode. Simpson, Cinnamon in Wood od D. & J. Weir, Škotska, uporabljajo za to fotoaparati, ki se suče z enako hitrostjo kakor rotor črpalke. Vizualizirani delci direktno začrtavajo z dolžinami poti svojo relativno hitrost glede na hitrost vrtenja. Drugačen namen imata pri tem Herbich in Christopher z univerze Leigh v Bethlehemu, ZDA, ki z visokofrekvenčnim filmanjem ugotavljata pota trdnih delcev skozi črpalno hidravličnega ekskavatorja. Ker je račun takega stroja tako in tako kompromis med dobro učinkovitostjo in možnostjo za prehod mineralnih zrn, je zelo velikega pomena, da vemo, kako se pri poti skozi stroj obnašajo trdni delci npr. pesek in podobno. Sem spadajo tudi poročila o posebno uspešnih dosežkih pri konstrukciji turbo strojev. Z odsesavanjem mejne plasti v difuzorjih, kjer odsesavamo pri divergencah s kotom 15° do 20° do 4 % pretčne količine, se učinek difuzorja lahko zboljša za 15 do 20 %. Poskusi so bili napravljeni pri Re 32000 do 85000. Reže za odsesavanje morajo biti gosteje razporejene pri vstopu v difuzor, če je vrednost Re visoka in čim večji je kot divergence difuzorja. Količina odsesane vode pa mora biti večja, če so nameščene reže za odsesavanje bolj daleč od vstopnega prereza difuzorja.

Proti kavitaciji se uspešno borimo, če uvajamo zrak v sesalno cev tik pod rotorjem. Razen že znanih načinov priporočata Struna in Solc — Litostroj, Ljubljana, nov način istočasnega dovajanja zraka v jedro in na obod sesalne cevi.* Dajeta tudi empirično enačbo za potrebni prerez zračnih dovodov. Način je preizkušen in se je praktično dobro izkazal.

Naposled sta tu še dva prikaza o dosežkih pri projektiranju Francisovih in Kaplanovih turbin v leninograjski metalni in harkovski turbinski tovarni (Granovski in Melovcov) ter o podobnih uspehih v budimpeštanski tovarni Ganz, kjer so posebej razvili na kratko prikazane analitične metode in so se v praksi izkazali stroji z zelo dobrim učinkom.

Med prispevki, ki obravnavajo stroje oz. aparate, ki so konstruirani na novi aplikaciji znanih fizikalnih dejstev, omenjamo omejevalce pretoka, ki izkoriščata kavitacijo. Deluje uspešno in zanesljivo (Escande — Castex — Toulouse, Francija) in je zasnovan na principu, da se v hidravlično zelo dobro oblikovani kon-

* Glej članek: Struna-Solc, Uvajanje zraka v difuzor, objavljen v SV 1964—1/2.



Sl. 6. Uvajanje zraka v difuzor po dveh ločenih sistemih

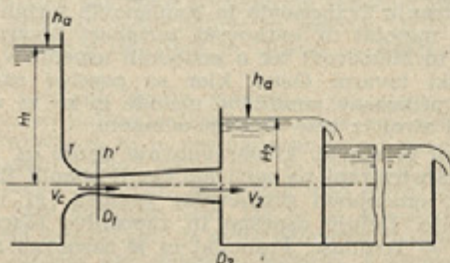
vergentno divergentni spojni cevi zelo kmalu izoblikuje polna kavitacija, ki ne dopušča spreminjanja pretoka pri večanju razlike med gladinama v zgornji in spodnji posodi.

Podobno zamisel, kakršno je imel pri nas že pred leti ing. Segvič, utemeljuje Harnaj iz Bukarešte. Z izrabo učinka sifona, ki je v ta namen posebno oblikovan, si zamišlja čiščenje naplavin in akumulacijskih jezer. Način je uporaben le v primerih, ko usedline niso zablatene in zlepljene.

Med ostalimi aparati, o katerih so poročali, je največ takih, ki zanimajo hidravlične laboratorije in rabijo za meritve pretokov in gladin v vodotokih ali v ceveh. Pri laboratorijskih aparatih je zbral Dedow iz Wallingforda (Anglija) matematične obrazce, ki omogočajo konstrukcijo avtomatov za ponazarjanje valovanja, tokov, plimovanja itd. v laboratorijih po danem programu.

O novih konstrukcijah zapornic govorijo trije prispevki. Na reki Ohio so uporabili pri splavnica nov tip dvodelnih tablastih zapornic, ki rabijo tudi za odplakovanje ledu in odvajanje visoke vode (Moors — Corps of Engineers, ZDA). Na reki Red River so na raztežilnem kanalu zgradili dve, 34 m dolgi sektorski zapornici t. i. evropskega tipa, za kateri so zahtevali zelo stroge obratovalne pogoje. Z izenačenjem hidrodinamičnih obremenitev lahko obvladajo vse manevre z razmeroma šibkimi servomotorji. Posebno skrbno je tu študirana oblika pretočnega roba. S tesnili sektorskih zapornic se ukvarja Jambor — Karlsruhe. Doslej uporabljeni tesnilni profili proti smeri toka v obliki Y so imeli to pomanjkljivost, da je med njimi in oblogo sektorja uhajal v sektorsko komoro pesek. Nova oblika črtnega tesnila odpravlja te pomanjkljivosti.

O splošnih pogojih oblike in namestitve globinskih zapornic odločajo kavitacija, vibracija, uničenje energije, ozračevanje itd. (Grzywiński — Dunaj). Pri adaptaciji nekega neuspelega talnega izpusta je avtor

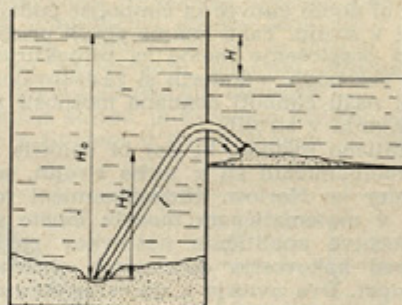


Sl. 7. Shema instalacije z omejevalnikom pretoka s kavitacijo

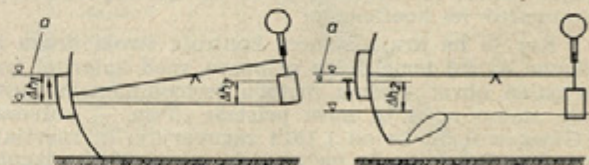
preiskal možne adaptacije in pri tem prišel do nekaterih obče veljavnih zaključkov glede talnih izpustov.

Pri hidromehanični oprepi namakalnih sistemov stremimo po čim popolnejši hidravlični avtomatiki pri dodeljevanju vodnih količin konsumentom. Starsolszky iz hidravličnega inštituta v Budimpešti je razvil tri nove tipe zapornic: enega za regulacijo zgornje gladine z dodatno kontrolo avtomatike v spodnji vodi, avtomatično zaklopko in avtomatični cevni zasun, o katerih daje osnovne značilnosti. O avtomatiki reguliranja izpustov pri dolinskih pregradah pa govori Blackmore iz Londona, ki razen navedbe nekaterih sistemov pravi, da se zanesljivost avtomatične regulacije manjša z njihovo kompliciranostjo. Sploh pa se npr. v Angliji ne smejo zanašati na zapornice, kadar gre za varnost pregrade. Če bi izbirali vrstni red za način upravljanja zapornic, so prve neavtomatične, nato zapornice, ki jih regulirajo prelivi, plavači in podobno ter slednjič zapornice, ki jih poganja motor z avtomatičnim vkloppljanjem in izkloppljanjem.

Pomembno poglavje odpira nazadnje prispevek (Bugliarello — Cornege Institute, ZDA), ki navaja



Sl. 8. Prikaz delovanja hidroaspiratorja



Sl. 9. Avtomatična zapornica z regulirano zgornjo vodno gladino

a — regulirana zgornja voda, Δh_1 — občutljivost reagiranja, Δh_2 — občutljivost pri zapiranju, Δh_3 — občutljivost regulacije.

osnovne vidike za projektiranje hidravličnih strojev tj. zlasti izgubo v njih, če se pretakajo skozi tekoče fluide, za katere ne velja Newtonov zakon viskoznosti. Osnovna je pri tem obravnava karakteristik trenja ob rotirajoči plošči.

Če ponovno nasploh precenimo prispevke iz navedenih tem tega poročila, moramo ugotoviti, da posegajo prispevki s področja hidroelastičnih vibracij globlje v doslej slabo raziskano torišče in dajejo dokaj več koristnih zaključkov kakor pa prispevki iz drugega obravnavanega področja. (Posamezne izvode prispevkov ima: Vodogradbeni laboratorij v Ljubljani.)

Avtorjev naslov: prof. ing. Janko Bleiweis, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana