

močjih vpadnih kotov znatno manjši kakor pri navadnih profilih, če je le njihova površina dovolj gladka. Razmeroma preproste, toda dokaj uspešne računske metode, ki se sicer deloma še naslanjajo na poskuse, so omogočile uspešno izbiro oblik, ki so dale pri preizkusih včasih kar presenetljivo dobre rezultate, tako da lahko rečemo, da se da dandanes že skoraj za vsako potrebo dober profil kar izračunati. V zadnjih nekaj letih delajo na raznih mestih že za to, da bi razvili podobne metode tudi za vrste profilov (kaskade), ki bi jih lahko uporabljali pri konstrukciji Kaplanovih turbin in črpalk, pri vijakih, aksialnih kompresorjih in pod. Za zdaj pa gredo ti proračuni samo pri razmeroma majhnih hitrostih, kjer smemo tudi zrak jemati za nestisljiv, medtem ko smo za večje hitrosti še vedno v znatni meri navezani na poskuse. Prav tako smo seveda navezani na poskuse tudi pri gibanju tekočin okrog drugih teles bolj zamotanih oblik, tako da bodo ostali modelni poskusi še zelo dolgo časa neogibno potreben pripomoček pri razvijanju uspešnih aerodinamičnih in hidravličnih strojev.

Z zgornjimi pripombami, ki seveda niti zdaleč ne morejo izčrpati vseh področij, smo hoteli pokazati, zakaj so potrebna eksperimentalna raziskavanja in kaj lahko od njih pričakujemo. Na primeru vodnih črpalk srednjih velikosti pa hočemo še pokazati, v kolikšni meri lahko rezultati

eksperimentalnih raziskavanj vplivajo na izkoristek stroja. Če konstruirate črpalko z malo bolj zamotanimi pretočnimi razmerami samo po navodilih v strokovni literaturi brez vsakega izkustva in brez vzorcev, boste težko dosegli izkoristek 60 %, kaj še da bi ga presegli. Z razmeroma preprostimi poskusi pa lahko brez posebnih težav konstruiramo črpalke, katerih izkoristek je v najboljši obratni točki vsaj 70 % ali celo nekaj več. Če pa hočete doseči najboljše vrednosti, s katerimi se lahko pohvalijo stara in izkušena podjetja, je potrebno večletno intenzivno raziskovalno delo, včasih pa celo tudi še malo sreče.

Pa ne samo gospodarnost, temveč tudi moč strojev se da znatno povečati s skrbnim raziskovanjem. Tako je več svetovnih tovarn zgradilo v začetku druge svetovne vojne letalske motorje z 12 valji in tekočinskimi hlajenjem, ki so vsi dajali nekaj nad 1000 konjskih moči. S skrbnim proučevanjem stanja motorjev pri revizijah in z raznimi meritvami se je posrečilo te motorje v teku nekaj let tako razviti, da so ob razmeroma majhnih spremembah dajali več kakor 1800 konjskih moči. Tu je šlo predvsem za izboljšanja na delih, ki so bili mehanično in termično premočno obremenjeni, deloma pa so prispevala k povečanju moči seveda tudi izboljšana goriva.

Avtor: akad. prof. dr. ing. Anton Kuhelj,
rektor univerze v Ljubljani.

DK 532. 57

Novi postopki za merjenje pretoka v ceveh*

MIROSLAV PEČORNIK

Pretok skozi cev je dan z enačbo

$$q = A c q \quad (1)$$

kjer pomenijo:

- q — pretok mase,
- A — prerez cevi,
- c — povprečno hitrost,
- q — gostoto.

Razvidno je, da je za določanje pretoka potrebno določiti povprečno hitrost v nekem določenem prerezu. Znano je in popolnoma razumljivo, da hitrost v določenem prerezu ni po celotnem prerezu konstantna. To bi bilo mogoče le v idealni tekočini brez trenja, toda v realni tekočini se vektor hitrosti menja po prerezu.

Določanje povprečne hitrosti se lahko izvaja na več načinov, ki pa so — posebno pri velikih cevovodih — dolgotrajni in dragi. Včasih se zadovoljujemo — ali pa se moramo zadovoljiti — s približnimi metodami za določanje povprečne

hitrosti, ker je to enostavnejše in seveda običajno cenejše. Opisali bomo zato dve aproksimativni metodi — Moodyjevo in Aichelenovo — za določanje povprečne hitrosti in s tem pretoka skozi cev.

Krivulja, po kateri se menja vektor hitrosti v nekem prerezu, je odvisna od karakterja toka. Tok karakteriziramo z Reynoldsovim številom

$$Re = \frac{cd}{\nu} \quad \begin{array}{l} c = \text{hitrost,} \\ d = \text{premer cevi,} \\ \nu = \text{kinematična viskoznost.} \end{array} \quad (2)$$

Pri laminarnem toku, torej do Reynoldsovega števila $\approx Re < 2300$, vpliva na krivuljo hitrosti samo trenje tekočine, t. j. viskoznost. Krivulja hitrosti je tu parabola, dana z enačbo

$$c_x = c_{max} \left(1 - \frac{r_x^2}{r_o^2} \right) \quad (3)$$

- c_x = hitrost na poljubnem radiju r_x ,
- c_{max} = centralna hitrost (v sredini cevi),
- r_x = radij, za katerega iščemo hitrost,
- r_o = radij cevi.

Na sliki 1 je narisana parabola iz enačbe (3).

* Te postopke je — po medsebojnem sporazumu — na kratko omenil že ing. Z. Marinček v svojem članku »Hidro-strojne meritve v hidrocentralah«, Elektrotehniški vestnik, 1-2/1954.

Na stenah cevi $r_x = r_0$ je hitrost $c_x = 0$; v sredini $r_x = 0$ je hitrost $c_x = c_{max}$. Krivulja je torej določena analitično s centralno hitrostjo ter zato zadošča, da izmerimo centralno hitrost in dobimo nato parabolo hitrosti. Povprečno hitrost dobimo po geometrijskem stavku, ki pravi, da je volumen rotacijskega paraboloida enak volumnu valja z enako osnovnico in polovično višino paraboloida:

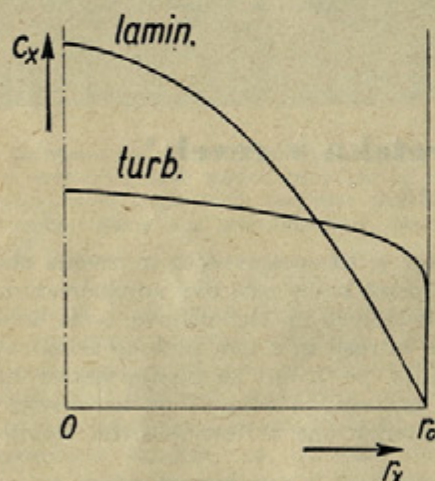
$$c = \frac{c_{max}}{2} \quad (4)$$

Pri turbulentnem toku je stvar nekoliko bolj zapletena. Vektor hitrosti pri turbulentnem toku, torej pri $Re > 2300$, se menja po Prandtlovi enačbi

$$c_x = c_{max} - \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \cdot \ln \frac{r_0}{y} \quad (5)$$

c_x = hitrost na radiju $r_x = r_0 - y$,
 k = Nikuradsejeva konstanta $\approx 0,4$,
 τ = tangencialna napetost,
 ρ = gostota (specifična masa) = γ/g ,
 r_0 = radij cevi,
 y = razdalja od stene cevi = $r_0 - r_x$.

Krivulja hitrosti je tudi narisana na sliki 1.



Sl. 1.

Povprečno hitrost dobimo iz enačbe (5) in se glasi:

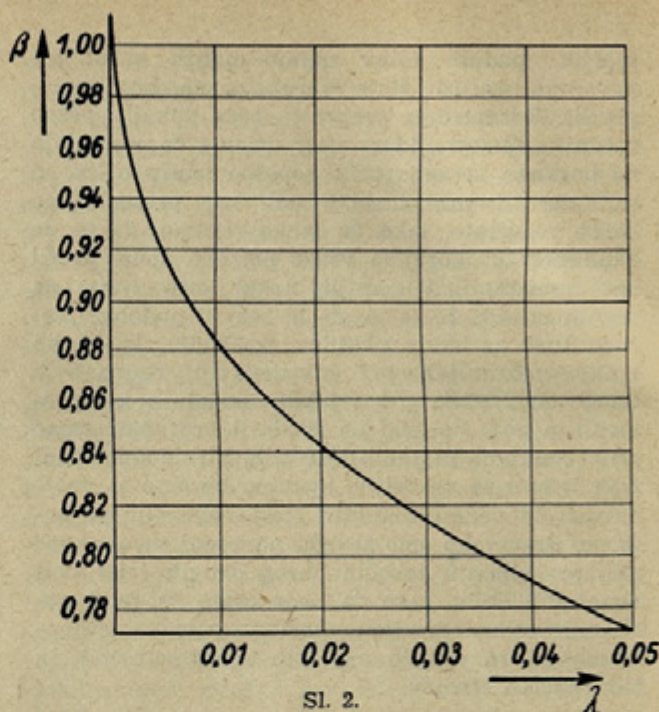
$$c = c_{max} - 3,75 \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (6)$$

Če upoštevamo medsebojno zvezo med tangencialno napetostjo in koeficientom trenja

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{\lambda}{8} c^2 \quad (7)$$

tedaj se glasi enačba za povprečno hitrost:

$$c = \frac{c_{max}}{1 + 1,326 \sqrt{\lambda}} \quad (8)$$



Razmerje med povprečno in maksimalno hitrostjo imenujemo »koeficient hitrosti«:

$$\beta = \frac{c}{c_{max}} = \frac{1}{1 + 1,326 \sqrt{\lambda}} \quad (9)$$

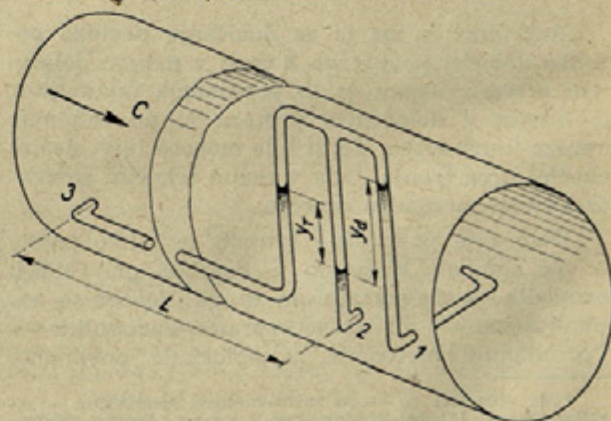
Na sliki 2 je pokazana krivulja $\beta = f(\lambda)$.

Glede na to je za določitev povprečne hitrosti potrebno samo merjenje centralne hitrosti in poznavanje koeficienta trenja. Koeficient trenja lahko izračunamo po znanih formulah za gladke oziroma hrapave cevi.

Da bi se izognili računanju koeficienta trenja, ki ni povsem zanesljivo, lahko določamo povprečno hitrost tudi drugače.

1. Aproximativni postopek Moodyja

Na sliki 3 je pokazana merilna naprava. Na kraju 1 je vgrajena Pitotova cev, ki meri celotni tlak v sredini cevi. Približno na istem mestu (torej v istem prerezu) 2 merimo statični tlak s pri-



Sl. 3.

ključkom na steni cevi. Oba priključka spojimo na diferencialni manometer, ki kaže tako dinamični tlak v sredini cevi, iz katerega lahko izračunamo hitrost v sredini cevi c_{max} . Koeficient trenja določamo prav tako z merjenjem padca tlaka med točkama 2 in 3 s pomočjo drugega kraka diferencialnega manometra. Po navedenem je torej potrebna zadostna dolžina L ravnega dela cevi. Razen tega pa je potreben tudi pred merilnim mestom 3 raven del cevi, in sicer najmanj $(20 \dots 30) d$. Če se opravlja merjenje hitrosti tekočine, je priporočljiva uporaba zaprtih manometrov s pomožno (zaporno) tekočino, da se tako izognemo nihanju meniska.

Če označimo višino stolpca pomožne tekočine, ki kaže dinamični tlak, z y_d , tedaj je ekvivalentna višina stolpca merjene tekočine $h_d = y_d (\gamma - \gamma_p)$, kjer je γ — specifična teža merjene in γ_p — specifična teža pomožne tekočine. Analogno označimo z y_r in h_r višino stolpca tekočine, nastalega zaradi trenja.

Centralna hitrost, merjena s Pitotovo cevjo, je nekoliko večja od dejanske in jo določamo z enačbo

$$c_{max} = a \sqrt{2 g h_d} \quad (10)$$

Koeficient a je izražen po Ed. S. in E. Shaw Coleu kot funkcija koeficienta hitrosti

$$a = 0,85 + 0,15 \beta \quad (11)$$

Koeficient trenja dobimo z znano Darcyjevo formulo

$$\lambda = \frac{2 g h_r d}{L c^2} \quad (12)$$

Če poznamo veličini L in d ter izmerimo h_r in h_d ter sestavimo enačbe (8) odn. (9) z (10), (11) in (12), dobimo izraz za povprečno hitrost:

$$c = 0,5 \sqrt{2 g h_d} \left[1 + \sqrt{1 - 0,796 \sqrt{\frac{h_r d}{h_d L}}} \right] - 1,326 \sqrt{2 g h_d \frac{d}{L}} \quad (13)$$

Ker je drugi izraz pod korenem majhen, lahko pišemo: $\sqrt{1 - X} \approx 1 - X/2$ ter dobimo tako končno obliko enačbe za povprečno hitrost:

$$c = \sqrt{2 g h_d} - 1,525 \sqrt{2 g h_r \frac{d}{L}} \quad (14)$$

ali za metrični sistem (h_d in h_r v [m]):

$$c = 4,429 \sqrt{h_d} - 6,755 \sqrt{h_r \frac{d}{L}} \quad [\text{m/s}] \quad (14a)$$

Enačba (14) daje, po trditvah Moodyja, dovolj točne rezultate za prakso in potrebuje samo eno stalno Pitotovo cev. Ta metoda je povrh tega tudi daleč najhitrejša od do sedaj znanih, potrebna je edino večja dolžina ravne cevi, da bi bil zagotovljen popolnoma enoličen tok.

2. Postopek Aichelena

Osnova je Kármánov t. zv. »enosedminski zakon«. Z njim je aproksimativno izražena krivulja spremembe hitrosti vzdolž nekega prereza pri turbulentnem toku:

$$c_x = c_{max} \left(\frac{y}{r_o} \right)^{1/7} \quad (15)$$

a bazira na Blasiusovi aproksimativni formuli za gladke cevi: $\lambda = 0,3164 Re^{-0,25}$ in velja do $Re = 8 \cdot 10^4$. S poskusi je dokazano, da se zunaj tega območja lahko splošno uporablja ta zakon, če eksponent zmanjšamo na $1/8$, $1/9$ do $1/10$. Še več, zakon velja celo za hrapave cevi, če v eksponentu, ki ga vzamemo za gladke cevi, imenovalc primerno zmanjšamo. Splošno torej lahko pišemo:

$$c_x = c_{max} \left(\frac{y}{r_o} \right)^{1/n} \quad (16)$$

Povprečno hitrost dobimo z integracijo enačbe (16) po celotnem prerezu:

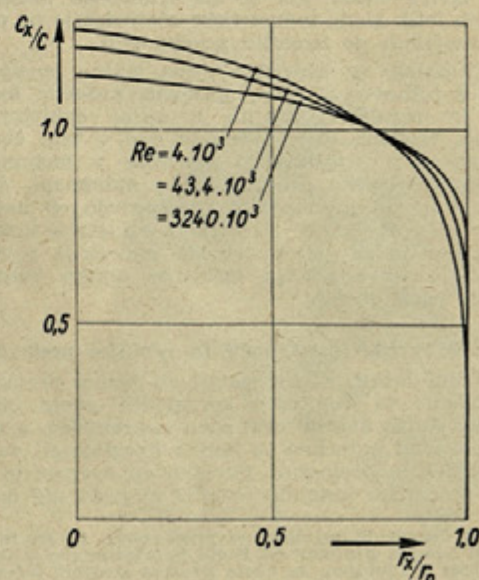
$$c = \frac{1}{F} \int_0^{r_o} c_x dF = c_{max} \frac{2}{\left(\frac{1}{n} + 2 \right) \left(\frac{1}{n} + 1 \right)} \quad (17)$$

in tako znaša koeficient hitrosti

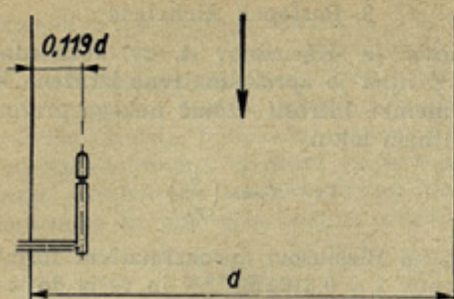
$$\beta = \frac{c}{c_{max}} = \frac{2}{\left(\frac{1}{n} + 2 \right) \left(\frac{1}{n} + 1 \right)} \quad (18)$$

Če uvrstimo namesto radija cevi r_o premer d , dobimo iz (16) in (18):

$$\frac{y}{d} = \frac{1}{2} \left[\frac{2}{\left(\frac{1}{n} + 2 \right) \left(\frac{1}{n} + 1 \right)} \right]^n \quad (19)$$



Sl. 4.



Sl. 5.

Če uvrstimo za n vrednosti 6...10, tedaj se menja y/d od 0,1225 do 0,1183, kar je praktično konstantno.

Z meritvami Aichelena, Nikuradseja in drugih je bilo ugotovljeno, da je pri popolnem turbulentnem toku geometrijsko mesto povprečne hitrosti na razdalji $y = 0,119d$. Kakor je razvidno s slike 4, ki kaže meritve Nikuradseja, se sekajo vse krivulje hitrosti, za Reynoldsova števila $4\,000 < Re < 3\,240\,000$, na razdalji $y = 0,119d$ brez ozira na hrapavost. Niti pri zelo hrapavih ceveh

(z izboklinami do 0,075 d) ni bilo mogoče opaziti odstopkov.

Zanimivo je omeniti, da se profili hitrosti tudi pri laminarnem toku sekajo v točki, ki je oddaljena od stene za $y = 0,142d$.

Če postavimo, po navedenem, v razdalji 0,119 d od stene cevi n. pr. Prandtlovo cev, merimo dinamični tlak povprečne hitrosti, torej c . Posebna prednost tega postopka je v tem, da so razen enostavnosti in majhne izgube tlaka odvečna vsa umerjanja. Aichelen navaja točnost tega postopka z 0,7 % in tudi pri velikih hrapavostih napaka ne presega $\approx 2,5$ %. Na sliki 5 je pokazana enostavnost te meritve.

Opomba: Matematični izводи za enačbe (6), (13) in (17), ki zaradi pomanjkanja razpoložljivega prostora niso mogli biti objavljeni v tem članku, so interesantom na razpolago pri avtorju.

Uporabljena literatura:

1. «La Houille blanche», 3/1950.
2. Bakhmeteff: «Mécanique de l'écoulement turbulent des fluides», Paris, 1941.
3. Eck: «Technische Strömungslehre», Berlin, 1949 in 1954.
4. Edward S. Cole and E. Shaw Cole: «Pitot Tubes in Large Pipes», Trans. A. S. M. E., vol. 61, 1939.

Avtor: ing. Miroslav Pečornik,
Turboinštitut, Ljubljana.

DK 621.753

0 francoski mehaniki z veliko preciznostjo*

André Léauté

Metode mehanike z veliko preciznostjo

Francozi so v mehaniki z veliko preciznostjo znani iz dveh razlogov. Najprvo žele ostati zvesti svojim tradicijam: pred dvema stoletjema so nastale in se razvile v arzenalih francoske artilerije metode industrijske metrologije in medsebojne zamenljivosti delov, ki se sedaj uporabljajo po vsem svetu. Drugi razlog pa izvira od tod, ker je šla francoska industrija v zadnjih letih glede industrijske metrologije po novih poteh, značilnih po izrazitih posebnostih.

Pri razlagi je neogibno treba stalno povezovati metode z njihovo uporabo, opisovati zadevne instrumente in rezultate, ki jih z njimi dobivamo v tovarnah. Metode, ki so obravnavane v tem članku, so povezane z organizacijo kontrole v mehaničnih delavnicah z veliko preciznostjo z namenom, da bi omogočile kar najpreciznejšo proizvodnjo ob najnižji možni ceni. Kot primer je izbrana industrija kotalnih ležajev, ker je ta tudi mehanska industrija z veliko preciznostjo in uporablja nekatere oblike kontrole, ki bi jih želeli obdelati.

Povezanost velike preciznosti in serijske proizvodnje

Kotalni ležaji, ki so nastali ob koncu prejšnjega stoletja, ves ta čas niso spremenili svoje oblike. Se vedno sta to dva obroča, eden nepremičen, a drugi premičen, med katerima se kotale kroglice ali valjčki raznih oblik in premerov. Površni opazovalec bi menil, da industrija kotalnih ležajev ni prav nič napre-

dovala. Res je nasprotno: v tej industriji se velika preciznost leto za leto vse bolj povezuje z velikimi serijami. Razvoj v tej smeri je vsak dan izrazitejši in samo taki kotalni ležaji, ki ne bodo prav nič zastajali za svojimi drugotnimi tekmeci niti po kakovosti niti po ceni, bodo lahko vzdržali v svetovni konkurenci.

Morda se komu vsiljuje pomislek, da sta si obedeve zahtevi nasprotni. Se pred četrto stoletja so nekateri tehnični trdili, da je treba izbirati med ceninimi kotalnimi ležaji, ki bi jih izdelovali na veliko, in takimi boljše kakovosti, ki bi jih izdelovali v majhnih serijah. Ves nadaljnji razvoj pa je dokazal, da je tako mišljenje popolnoma zgrešeno.

Da bi v množinski proizvodnji dosegli nizke cene, je treba paziti na največjo pravilnost, ki jo lahko dajejo samo stroji in orodja z največjo preciznostjo, združeno z najpazljivejšo kontrolo. Preciznost izdelkov je potem povsem naravna. Z razvojem obdelovalnih strojev in industrijske metrologije sta postali velika preciznost in serijska proizvodnja tesno povezani.

Ta načela niso omejena samo na kotalne ležaje, ampak veljajo prav tako tudi za industrijo avtomobilov in letalskih motorjev. Vsekakor pa se dajo najbolje pokazati prav v industriji kotalnih ležajev, ki je zato izbrana kot primer za to razlago.

Kontrola surovin in kakovosti

Pravilno delovanje preciznih strojev je najprej odvisno od kakovosti zanje uporabljenih surovin in nato šele od kakovosti obdelave in sestave. Konstrukcijski biro, ki je prevzel določeno konstrukcijsko nalogo, ima dvojno nalogo: izbrati vrsto jekla ali zlitine in določiti geometrijsko obliko delov ter njihov sklop. Tovarna sme dobavljati samo izdelke, ki ustrezajo

* Ta članek je prirejen po predavanju, ki ga je imel g. André Léauté, profesor na Ecole Polytechnique v Parizu, v maju 1954 v Ljubljani za člane Društva strojnih inženirjev in tehnikov LRS. (Predavanje je bilo pozneje objavljeno še v reviji «La Machine-Outil Française», avg.-sept. 1954.) — Prevod za SV priredil B. Kraut.