DK 621.001.5

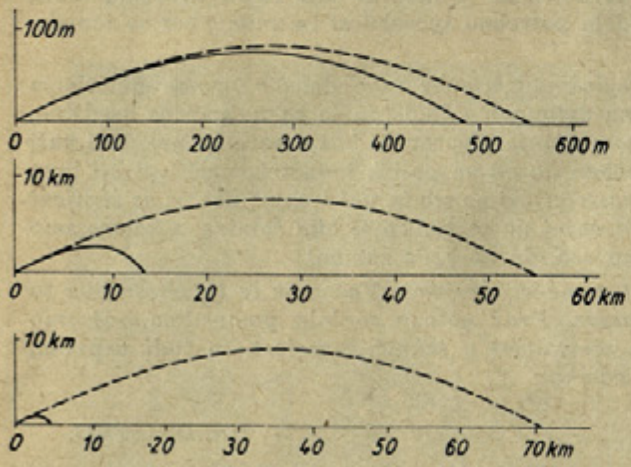
O eksperimentalnih raziskovanjih v mehaniki

ANTON KUHELJ

UVOD

Področje in uspeh eksperimentalnih raziskovanj v mehaniki sta dandanes tako velika, da presenečata marsikaterega poznavalca te vede, dokler ni sam poskušal uporabiti splošnih zakonov na razna konkretna vprašanja, kjer daje teoretično obravnavanje večkrat zelo nezanesljive rezultate. Dejansko je pravzaprav čudno, če pomislimo na matematično zelo zanimive in večkrat tudi zelo uspešne metode splošne mehanike, ki so n. pr. omogočile odkritje dveh planetov (Neptuna pred nekaj več kakor sto leti in Plutona leta 1930) iz motenj, ki so jih zaradi njih utrpeli drugi planeti pri gibanju okrog Sonca. Zgornje nasprotje pa postane razumljivejše, če upoštevamo, da so zakoni splošne težnosti bolj znani kakor n. pr. pojavi med delci trdnih teles pri spremenljivi obremenitvi ali vplivi tekočine na trdna telesa, ki se gibljejo po njej. Prav tako malo vemo tudi o vseh drobnih pojavih, ki vplivajo na trenje trdnih teles in tako se dogaja, da lahko marsikatere pojave med nebesnimi telesi natančneje izračunavamo, kakor nekatera vsakdanja gibanja na zemlji. Tako se pojavlja vprašanje, kaj je bilo doslej storjeno na področju eksperimentalnih raziskavanj in kakšnih metod se poslužujemo pri takem delu.

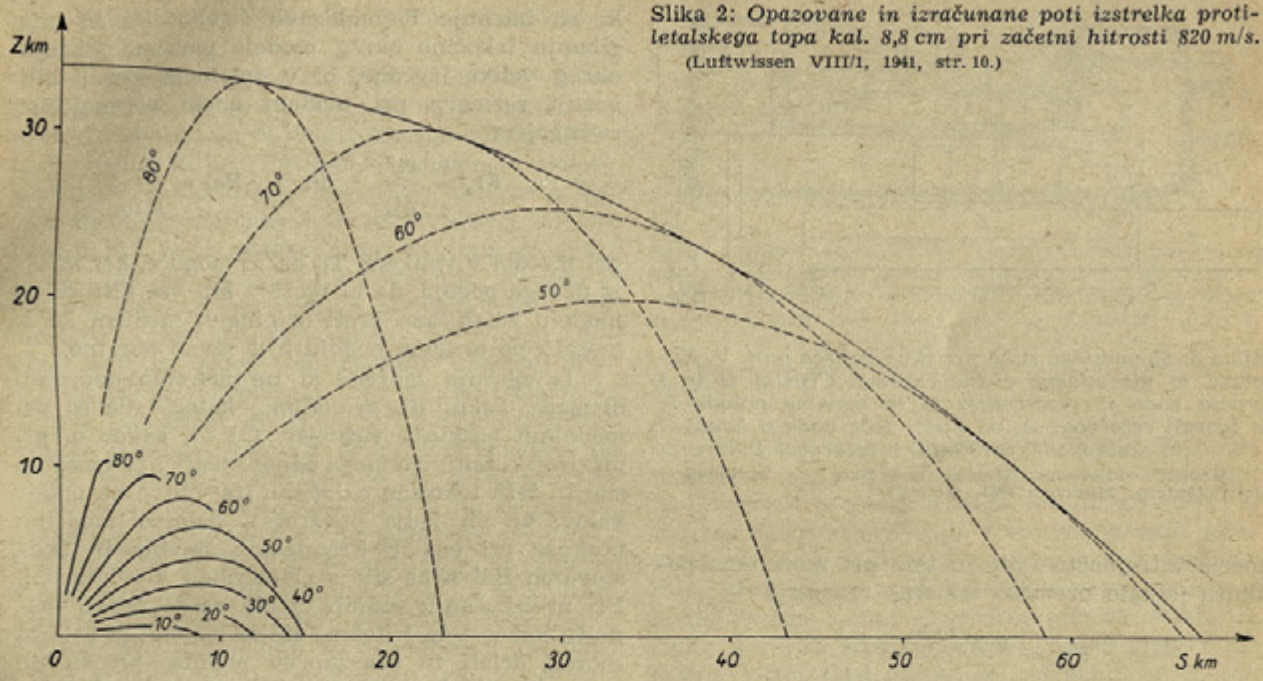
Raziskovalci pa v tem pogledu niso držali križem rok. Veliko eksperimentalnega materiala se je nabralo že v preteklem stoletju po raznih laboratorijih, še več pa ga je prišlo in še prihaja iz številnih novejših laboratorijev, ki so si jih razen univerz in drugih znanstvenih ustanov v izredno veliki meri zgradile tudi razne velike in manjše tovarne. Ogromna večina materiala, ki so ga ti laboratoriji objavili, se nanaša navadno na nešteta drobna vprašanja, ki pa so sicer večkrat za uspeh stroja ali kakšne naprave odločilnega pomena, medtem ko smo po tej poti dobili doslej le malo splošnih zaključkov, ki bi mogli v znatni meri izpopolniti starejše, nepopolne teorije. Kljub ogromnemu eksperimentalnemu materialu se torej zdi, da je posebno na področju mehanike zelo težko najti nove splošne nastavke, ki bi mogli uspešno nadomestiti stare teorije. Oglejmo si zato na kratko na nekaj primerih, s čim se taki laboratoriji ukvarjajo in kako delajo. Se prej pa se hočemo s pogledom na sliki 1 in 2 prepričati, kolikšno napako lahko napravimo, če pri naših računih zanemarimo kakšen važen vpliv. Če n. pr. pri metu železne krogle, kakršno uporabljajo športniki, zanemarimo zračni upor, se izračunana oblika poti ne bo bistveno razlikovala od opazovane parabole, ker je začetna hitrost krogle le majhna, teža pa razmeroma velika. Tudi pri možnarju, ki meče 123 kp težke izstrelke z začetno hitrostjo 80 m/s, niso posebno velike razlike med pravo obliko poti in teoretično krivuljo, pri kateri nismo upoštevali zračnega odpora (sl. 1 zgoraj), čeprav seveda dosežena natančnost teoretičnega računa gotovo ne bo zadovoljila vojaškega strokovnjaka. Pri topovih kalibra 10,5 cm, ki mečejo 14,6 kp težke izstrelke z začetno hitrostjo 793 m/s, prav posebno pa pri puški kalibra 7,9 mm, ki meče krogle s težo 0,01 kp in z začetno hitrostjo 900 m/s, pa se teoretične krivulje sploh ne dajo več primerjati s pravimi potmi (sl. 1 v sredi in spodaj). Na sliki 2 je pokazanih nekaj teoretičnih in pravih krivulj poti za izstrelke protiletalskega topa kalibra 8,8 cm, ki meče 9 kp težke izstrelke z začetno hitrostjo 820 m/s. Tudi tu se izračunani rezultati nikakor ne dajo primerjati z opazovanji, ker bi po teoriji moral pasti izstrelek na tla najdalje v razdalji 68,5 km od topa, medtem ko lahko v resnici dosežemo največ 14,8 km.



Slika 1: *Opazovane (polno izvlečene) in izračunane poti izstrelkov brez upoštevanja zračnega odpora za možnar, top in puško pri nagibu cevi 30°. Čim večja je hitrost in čim lažji je izstrelek, tem večje so razlike med preprosto teorijo in opazovanjem.*
(Luftwissen X/1, 1943, str. 8.)

MODELNI POSKUSI

Predvsem moramo poudariti, da so poskusi na velikih napravah po navadi izredno dragi, zamudni in nenatančni in dajo večkrat samo nepopolne odgovore na nekatera vprašanja, ki so tako za konstruktorja kakor tudi za teoretika velikega pomena. Pomislimo n. pr. samo na dokončno preizkušnjo velike vodne turbine v hidrocentrali ali na poskusne polete velikega potniškega letala. V obeh primerih je treba čisto jasno razčistiti zelo veliko vprašanj, še preden začnemo tako napravo graditi in končni preizkus lahko v glavnem samo potrdi, ali smo pri naših proračunih povprečno dobro zadeli ali ne. Le redko se dajo zaključni računi uporabljati tudi za kontrolo ene

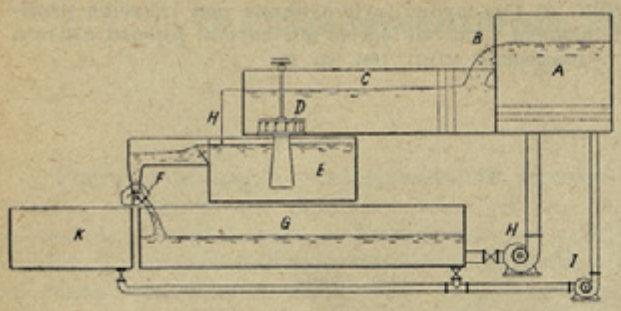


Slika 2: *Opazovane in izračunane poti izstrelka protiletalskega topa kal. 8,8 cm pri začetni hitrosti 820 m/s.* (Luftwissen VIII/1, 1941, str. 10.)

ali več podrobnosti; toda če se to zgodi, pomenijo rezultati takih raziskavanj seveda skoraj vedno izredno dragocen prispevek k teoriji celotne naprave in jih zato le redko objavljajo.

Iz vsega navedenega izhaja, da smo pri mehaničnih poskusih navadno primorani omejiti se na preizkušanje takih posameznih delov, ki se dajo izdelati razmeroma poceni in so za končni uspeh stroja zelo važni ali pa se moramo zateči k poskusom zmanjšane izvedbe celotnega stroja oz. posameznih delov, t. j. k modelnim poskusom. Pri razvijanju važnih strojnih naprav skušamo navadno po možnosti združiti obe vrsti poskusov, da bi tako vsaj deloma izločili napake, ki se kaj lahko prikradejo, če se preveč slepo naslanjamo na ta ali oni način poskušanja. Jasno je namreč, da se da pri ločenem preizkušanju posameznih delov le težko upoštevati medsebojni vpliv ostalih delov stroja na opazovani del, pri modelnih poskusih pa se posebno pri dinamiki tekočin pojavljajo težave pri prenašanju opazovanj z modelov na izvedbe v velikem. Če sta si gibanji tekočine okrog modela in okrog izvedbe v velikem v vseh podrobnostih podobni, se dajo namreč čisto teoretično izračunati sile, tlaki in druge praktično važne veličine na veliki izvedbi, ko smo dobili ustrezajoče podatke za model. Za podobnost gibanj pa bi morala biti pravzaprav izpolnjena cela vrsta pogojev, ki si deloma med seboj nasprotujejo, tako da se moramo na koncu koncev odločiti za sporazum, ki terja posebne korekture, s katerimi se da potem z večjo ali manjšo zanesljivostjo sklepati iz modelnih poskusov na obnašanje velikih naprav. Seveda smo prišli do takih sporazumnih rešitev samo z dolgotrajnim in skrbnim primerjanjem vseh rezultatov in dandanes lahko že rečemo, da v večini primerov lahko z zadovoljivo natančnostjo prenašamo modelne rezultate na izvedbe v velikem.

Da bodo gornja izvajanja nekoliko jasnejša, vzemimo primer vodne turbine, ki jo hočemo predhodno preizkusiti na razmeroma majhnem modelu. Da morejo biti poti posameznih vodnih delcev v modelu in turbini podobne, mora biti model geometrijsko vsekakor podoben turbini. Dimenzije vseh delov in območij okrog modela so potem premosorazmerne neki značilni dolžini l_1, ki je lahko n. pr. premer modelnega tekača; prav tako so dimenzije vseh delov velike turbinske naprave tudi premosorazmerne neki njeni značilni dolžini l_2, ki bo seveda v zgornjem primeru zopet premer turbinskega tekača. Če označimo z v_1 neko značilno hitrost tekočine v modelu (n. pr. hitrost pritekanja vode v rotor) in z γ_1 njeno specifično težo, je teža tekočine v določenem območju (n. pr. nad lopatico rotorja) premosorazmerna produktu $\gamma_1\, l_1^3$ (ker je volumen območja premosorazmeren tretji potenci dolžine l_1). Vztrajnostna sila v tistem območju pa je premosorazmerna $\varrho_1\, v_1^2\, l_1^2$ (kjer je $\varrho_1 = \gamma_1/g$ gostota tekočine), ker lahko vzamemo za ustrezajoči pospešek kar centrifugalni pospešek, ki je — kakor je znano — premosorazmeren kvadratu hitrosti v_1 in obratno sorazmeren krivinskemu radiju krivulje poti tistega delca in zato tudi obratno sorazmeren značilni dolžini l_1; vztrajnostna sila pa je potem dana s produktom vztrajnostnega pospeška in mase tekočine v danem območju. Ker je dalje zaviralna tangencialna sila zaradi notranjega trenja (židkosti) v tekočini enaka produktu židkostnega količnika μ_1 tekočine, površine območja in prirastka hitrosti na enoto dolžine, je ta sila tudi premosorazmerna produktu $\mu_1\, l_1\, v_1$. Raz-



Slika 3: *Shematična slika preizkuševališča prof. V. Kaplana za nizkotlačne vodne turbine. Črpalki H in I črpata vodo iz rezervoarja G in merilne posode K v zgornji rezervoar A, od koder teče voda v kanal C in skozi model turbine D v rezervoar E.*

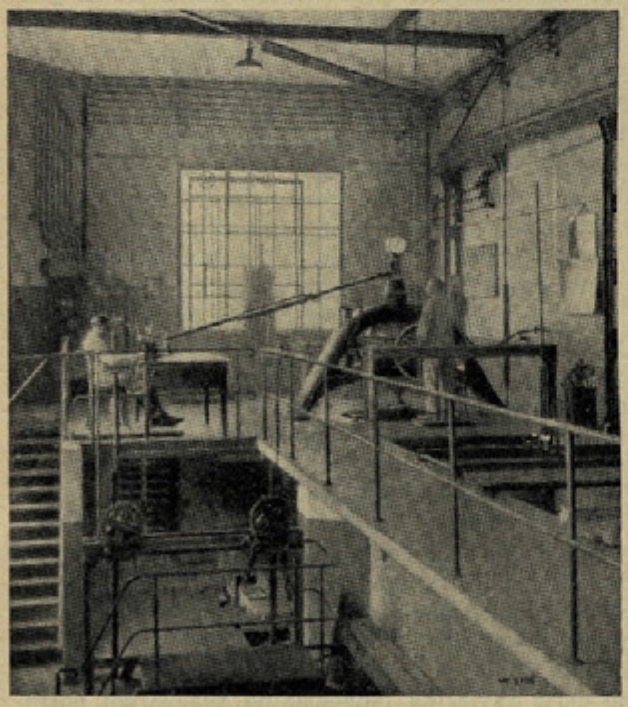
(Kaplan — Lechner: Theorie und Bau von Turbinen — Schnellläufern. München 1931, str. 215.)

merje vztrajnostne sile in teže pri modelnem poskusu je zato premosorazmerno razmerju

$$Fr_1 = \frac{\varrho_1 v_1^2 l_1^2}{\gamma_1 l_1^3} = \frac{v_1^2}{g l_1}$$

ki se imenuje Froudeovo (Frudovo) število, razmerje med vztrajnostno in židkostno silo pa je premosorazmerno razmerju

$$Re_1 = \frac{\varrho_1 v_1^2 l_1^2}{\mu_1 v_1 l_1} = \frac{v_1 l_1}{\mu_1/\varrho_1}$$



Slika 4: *Pogled na merilno mesto pri preizkuševališču tovarne Escher-Wyss, Zürich, za nizkotlačne vodne turbine.*

(Die hydraulischen Versuchsanlagen der Firma Escher-Wyss, Zürich 1934, str. 12.)

ki se imenuje Reynoldsovo število. Da bi bilo gibanje tekočine okrog modela podobno gibanju okrog velike izvedbe, bi v splošnem morali biti gornji razmerji pri modelu enaki ustrezajočim razmerjem

$$Fr_2 = \frac{v_2^2}{g l_2} \quad \text{in} \quad Re_2 = \frac{v_2 l_2}{\mu_2/\varrho_2}$$

pri izvedbi v velikem. To pa ni mogoče, ker izhaja iz prvega pogoja, da bi morale biti vse hitrosti na modelu zmanjšane proti originalu, medtem ko bi moralo po drugem pogoju biti ravno obratno.

Iz zgornje zadrege si ne moremo pomagati drugače, kakor da presodimo, katere sile so pri modelnih poskusih važnejše. Če so, kakor n. pr. pri preizkušanju vodnega odpora ladij, vztrajnostne sile in teža tekočine odločilne (ta vpliva na odpor valov, ki jih ladja povzroča), delamo modelne poskuse pri enakih Froudeovih številih in upoštevamo židkostne sile s primernimi korekturami. Pri preizkušanju vodnih turbin pa so veliko važnejše kakor teža tekočine židkostne sile in zato bi morali delati tu pravzaprav poskuse pri enakih Reynoldsovih številih. To pa navadno ne gre, ker bi morali potem modeli teči z velikanskimi hitrostmi, kar bi povrh velike porabe energije imelo še druge neugodne posledice. Zato se zadovoljujemo tu samo z zahtevo, da Reynoldsovo število pri modelnem poskusu ni preveč majhno in upoštevamo razliko Reynoldsovih števil s posebnimi korekturami.

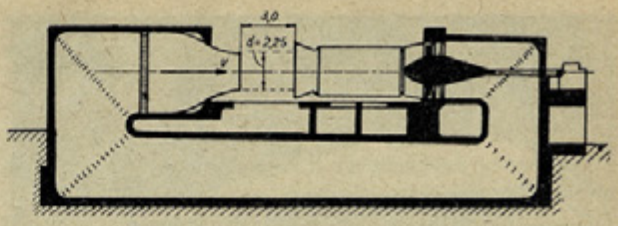
Pri gibanju zraka okrog razmeroma majhnih teles nima teža nikakršne znatne vloge. Enakost Froudeovih števil za model in veliko izvedbo zato tukaj ni potrebna. Toda povečanje hitrosti pri zmanjšanem modelu nasproti hitrosti velike izvedbe tudi tu skoraj nikdar ne prihaja v poštev, da bi dosegli enaka Reynoldsova števila, ker bi tudi tu prišlo do silnega tratenja energije, predvsem pa zato, ker bi se tedaj pregrešili proti nekemu drugemu modelnemu pravilu. Dinamika stisljivih tekočin (dinamika plinov) uči namreč, da je za podobnost gibanja tekočine okrog modela in izvedbe potrebno tudi to, da je razmerje med značilno hitrostjo modela v_1 in hitrostjo zvoka c_1 v modelnem sredstvu ali Machovo število Ma_1 enako Machovemu številu

$$Ma_2 = v_2/c_2$$

velike izvedbe. Če obakrat uporabimo za sredstvo zrak, je $c_1 = c_2$ in iz zahteve po enakosti Machovih števil izhaja potem enakost hitrosti. Na srečo pa nas tudi tu uči izkustvo, da so si gibanja pri majhnih hitrostih podobna tudi, če Machova števila niso enaka. Kakor hitro pa se približa hitrost telesa na 60 do 90 odstotkov hitrosti zvoka, vpliva spreminjanje Machovega števila v izredno veliki meri na gibanje in tukaj je enakost teh števil za model in izvedbo v velikem prvi pogoj za uspešno prenašanje modelnih meritev, ki se mu mora zahteva

po enakosti Reynoldsovih števil brezpogojno umakniti.

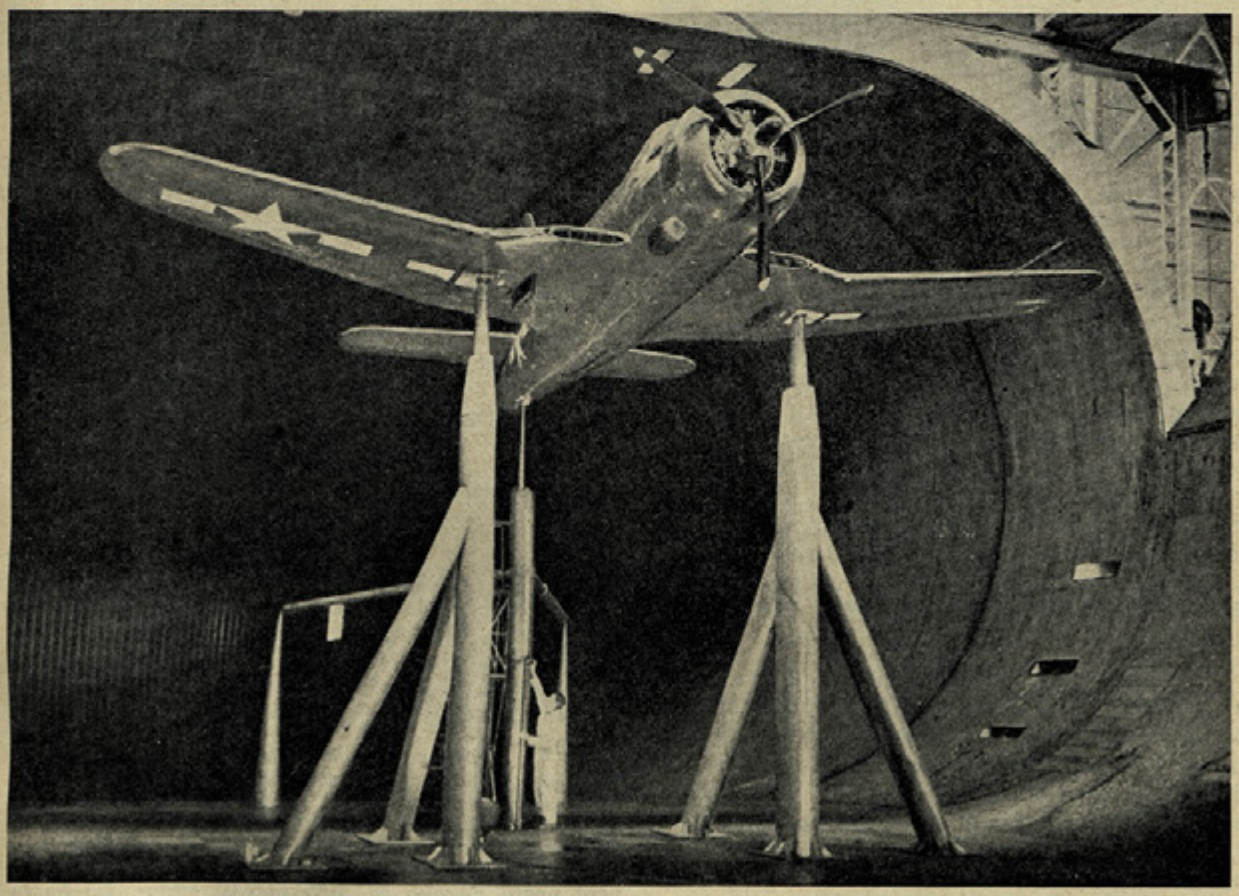
Ni tu mesto, da bi si mogli natančneje ogledati pota, kakršna je ubrala eksperimentalna modelna tehnika, da bi mogla čim natančneje sklepati o razmerah pri izvedbah v velikem. V eksperimentalni aerodinamiki so okrog tridesetih let tega stoletja prišli nekateri resni delavci do zaključka, da se iz poskusov na majhnih modelih ne da prav nič sklepati na obnašanje izvedbe v velikem. Zato so naprave za aerodinamično preizkušanje modelov (aerodinamični tuneli) doživele celo evolucijo. Od majhnih tunelov, kjer je imel zračni tok premer 1 do 2 m in hitrosti do 70 m/s, so prešli najprej k tunelom približno enakih dimenzij, kjer pa je bil zrak stisnjen na 20 do 25 atmosfer. Ker ostane pri stisnjenju židkostni količnik zraka enak, gostota pa se poveča, naraste Reynoldsovo število modelnega poskusa v takem tunelu na 20 ali 25-kratno prvotno vrednost. Pojavile pa so se tu druge težave, ki so izvirale predvsem iz večje zvrtinčenosti (turbulence) zraka v takih tunelih, in zato so dandanes veliko bolj v rabi ogromni tuneli, v katerih se dajo preizkušati



Slika 5: *Shematična slika starega aerodinamičnega tunela v Göttingenu za merjenje vzgona in odpora modelov. Elektromotor za 400 KS žene vijak na desni strani, ki sesa zrak skozi merilno območje zgoraj v sredi s hitrostjo do 216 km na uro.*

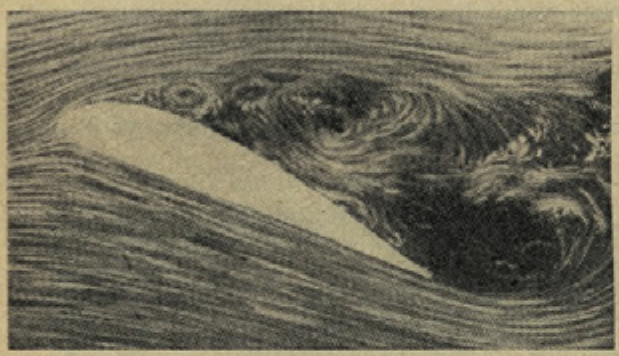
(Ing. R. Živković: Enciklopedija tehničkih znanja, sv. V, str. 40.)

manjša letala kar v naravni velikosti. Prednost meritev v takih velikih tunelih nasproti meritvam na letalih v prostem letu je seveda predvsem v tem, da lahko nemoteno in z vso pazljivostjo opravimo vse delo in so taki poskusi veliko varnejši. Nove zahteve pri gradnji takih tunelov so se pojavile seveda s stopnjevanjem hitrosti letal. Da lahko v večjih tunelih ženemo zračne mase z zadostno hitrostjo naokrog, so potrebne velikanske



Slika 6: *Starejše lovsko letalo na merilnem ogrodju v velikem aerodinamičnem tunelu preizkuševališča Moffett Field v Kaliforniji. Šest elektromotorjev s skupnim učinkom 36 000 KS žene zrak skozi merilno območje s hitrostjo 400 km na uro. Prenašanje izmerjenih rezultatov na razmere v letu ne povzroča tu nobenih težav.* (Interavia III/6, 1948, str. 339.)

Slika 7: *Vodni tok okrog krila pri majhnih vpadnih kotih nazorno kaže, da se le majhen del tekočine nekoliko zavre ob krilu in je zato njegov odpor tudi pri velikem vzgonu razmeroma majhen.*
(L. Prandtl: Abriss der Strömungslehre, Braunschweig 1931, str. 142.)



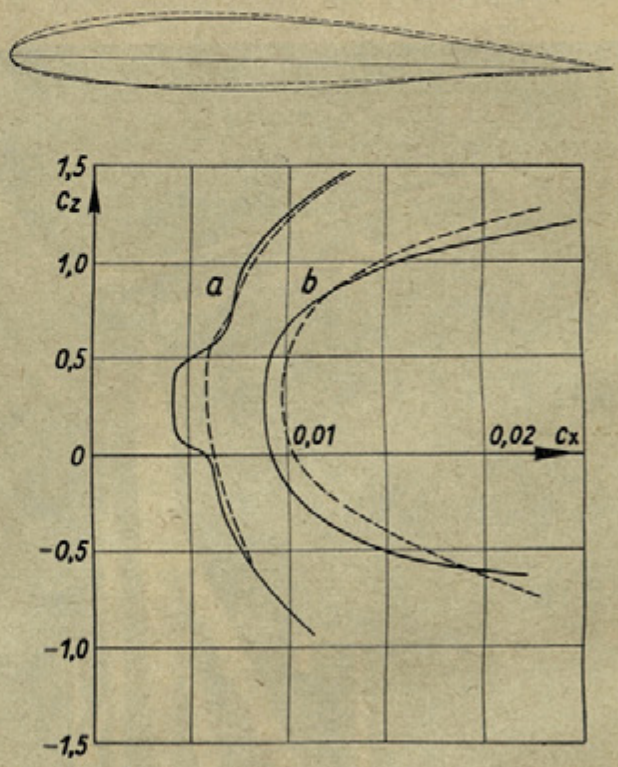
Slika 8: *Odtrgani vodni tok za močno nagnjenim krilom zavre in zvrtinči velike vodne množine in daje zato zelo velik odpor pri znatnem vzgonu.*
(L. Prandtl: Abriss der Strömungslehre, Braunschweig 1931, str. 142.)

energije in za prenašanje takih opazovanj na letala so potrebna posebna izkustva. Dolgotrajne študije, predvsem pa skrbna primerjava rezultatov s preizkusov na majhnih modelih z rezultati, doseženimi v prostem letu in pri poskusih v velikih aerodinamičnih tunelih, so privedli do raznih obrazcev za korekture meritev v majhnih tunelih, ki dajejo še dokaj natančne in zanesljive rezultate.

EKSPERIMENTALNO DELO NA KRILNIH PROFILIH

Da bi nekoliko pobliže spoznali, kako se je vsaj na enem področju razvijalo eksperimentalno delo, si hočemo malo natančneje ogledati razvoj profilov, kakršne uporabljamo za krila pri letalih, za vijačne liste in podobno. V prvih dveh desetletjih tega stoletja so teoretiki kakor Žukovski, Mises, Kármán in Trefftz razvili teoretične profile, ki se dajo z metodo konformnega preslikavanja izvesti iz kroga. Poskusi, predvsem s profili Žukovskega, so pokazali, da niso krila takih oblik prav nič ugodna za praktično uporabo in tako so konstrukterji in eksperimentatorji razvili kakih 2000 profilov čisto po svojem okusu, pozneje pa tudi s tem, da so sistematično spreminjali njihove oblike in kombinirali posamezne profile, ki so se posebno obnesli pri preizkusih. Posebno znani profili te vrste so bili starejši ameriški profili, kakor n. pr. N. A. C. A. 2412, 2415, 4412 in 2312 (N. A. C. A. je kratica za: National advisory committee for aeronautics, Nacionalni posvetovalni komite za letalstvo), ki so jih do začetka II. svetovne vojne in pozneje prav pogosto uporabljali vsi konstrukterji.

Šele nekako po 40 letih eksperimentalnega dela so nekateri raziskovalci v ZDA, deloma pa tudi drugod, počasi prišli do spoznanja, da mora pri dobrem profilu hitrost zraka tako na zgornji, kakor tudi na spodnji strani ob profilu čim dlje naraščati in da sme šele v zadnjem delu svoje poti zopet padati. Poskusi so kmalu pokazali, da je odpor takih laminarnih profilov (imenujejo se tako zato, ker ostanejo na takih profilih zračne plasti neposredno ob površini, t. zv. mejne plasti, veliko dlje gladke — laminarne — in se šele v zadnjem delu profila zvrtinčijo) v določenih ob-



Slika 9: *Laminarni in navadni krilni profil. Profil N. A. C. A. 641—212 (polno izvlečene črte) in profil N. A. C. A. 2412 (črtkano) imata enako relativno debelino. Če narišemo odvisnost vzgona od odpora za oba profila (polara), dobimo v določenem vzgonskem območju pri gladkih površinah kril (diagrama a) za prvi profil nekako za 30 % manjši odpor. Če imata krilni površini spredaj hrapav pas (diagram b), razlike med odpori obeh kril niso velike.*
(I. H. Abbott — A. E. Doenhoff: Theory of Wing Sections, New York 1949, str. 410 in 426 za obris obeh profilov in str. 479 in 571 za polari. Reynoldsovo število 8,9 . 10⁶.)

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 tekočinskim 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

$$q = A c \varrho \tag{1}$$

kjer pomenijo:

q — pretok mase,
A — prerez cevi,
c — povprečno hitrost,
ϱ — 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

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

Pri laminarnem toku, torej do Reynoldsovega števila $\approx Re < 2\,300$, vpliva na krivuljo hitrosti samo trenje tekočine, t. j. viskoznost. Krivulja hitrosti je tu parabola, dana z enačbo

$$c_x = c_{max} \left(1 - \frac{r_x^2}{r_0^2}\right) \tag{3}$$

c_x = hitrost na poljubnem radiju r_x,
c_{max} = centralna hitrost (v sredini cevi),
r_x = radij, za katerega iščemo hitrost,
r_0 = 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 »Hidrostrojne meritve v hidrocentralah«, Elektrotehniški vestnik, 1—2/1954.