

itd.) i, naročito, revolucionarno rešenje novog pogona pomoću turbomlaznih motora, koji je omogućio dosada najveći mogući skok u pogledu brzine vazduhoplova do daleko preko granica brzine zvuka. Ovaj neobični uspeh novog turbomlaznog motora proiziŝao je iz dve pozitivne okolnosti: eliminacije elise i neverovatne koncentracije, odnosno akumulacije snage u relativno malom i lakom motornom agregatu.

Taj vratolomno brzi razvoj aviona, koji nema takmaca u istoriji razvoja ma koga drugog saobraćajnog sredstva, ubrzo je doveo do toga da dotadašnji podvizi postignuti sa upravljivim balonima budu dostignuti i ubrzo i prestignuti. Balon je već posle nepune dve decenije od postanka aviona izgubio utakmicu i bio osuđen na povlačenje. Glavni uzroci njegove inferiornosti bili su: goleme dimenzije i u vezi s tim veliki aerodinamički otpor a mala brzina balona (do ~ 150 km/čas), podložnost glomaznog i sporog balona strahovitom uticaju vetrova, koji su praktično onemogućavali njegovu plansku regularnu službu leta, a naročito premo okeana, za koju je službu on bio prvenstveno zamišljen i projektovan; delikatnost, složenost, opasnost i skupoća manevrisanja na zemlji sa tako glomaznim objektom; relativno visoka nabavna cena samog balona i potrebnih hangara velikih dimenzija. Za bolju ilustraciju prednjih problema treba navesti glavne konstruktivne karakteristike poslednjeg tipa dirižabla »Zeppelin« iz 1934: dužina 248 m, prečnik balona 41,20 m i ukupni deplasman 190 000 m³.

Razvitak aerotehnike, naročito dinamičkih letućih mašina, bio je naročito brz u periodima dva svetska rata, kada su sve vojne uprave uložile velike napore i sredstva za unapređenje te tehnike koja im je odlično poslužila u ratne svrhe kao izviđačko i borbena sredstvo.

Naoružani sve novijim i brojnijim saznanjima i naučnim dostignućima iz pojedinih naučnih grana aerotehnike, konstruktori aviona nisu se više zadovoljavali dotadašnjim ustaljenim formulama aviona, nego su svoje stvaralačke ideje počeli da šire i na sve novije koncepcije dinamičkih letućih mašina.

Tako su najpre stvoreni za upotrebu na vodi *hidroavioni* ili *hidroplani*, koji su u stvarnosti zadržali sve osnovne oblike normalnih aviona. Neposredno posle njih stvoreni su kombinovani tipovi *amfibija*, koji treba da budu sposobni za operacije sa zemlje i sa vode.

Zatim se javlja težnja ka skraćivanju staza poletanja i sletanja, koja je vodila ka novoj formuli obrtnog nosećeg sistema, *rotora*. Tako se stvara kategorija *žiroplana*. Prva vrsta praktično uspele konstrukcije ove kategorije bio je *autožiro* sa samoobrtanim rotorom na principu vetrenjače i sa klasičnom vučom pomoću elise. Tek druga vrsta ove kategorije, tipa *helikopter*, praktično je potpuno postigla postavljeni cilj, omogućivši potpuno vertikalno poletanje i sletanje, kao i lebljenje u mestu. Ali helikopter je pored navedenog uspeha u poletanju i sletanju pokazao i mnoge svoje organske nedostatke, kao problematičnost stabilizacije, konstruktivnu složenost i relativno malu horizontalnu brzinu. Zbog toga je konstruktorima postavljen novi zadatak: stvoriti koncepciju aviona koji će biti sposoban za vertikalno ili bar vrlo kratko uzletanje i sletanje, a da to ne bude na štetu njegove horizontalne brzine. Ti problemi dobili su svoje međunarodne skraćene nazive: »VTOL« i »STOL« (Vertical take-off and landing i Short take-off and landing). To se zasada rešava uglavnom pojačanjem ili pogodnom dispozicijom motornog pogona, skretanjem mlaza itd. Prve probe u cilju studija stabilnosti i upravljivosti ovakvih mašina izvedene su sa tzv. *letećim motorima* i *letećim platformama*.

Pored prednjeg neposrednjeg načina rešenja pomoću aviona javlja se i mogućnost konstruktivne kombinacije objedinjenja dobrih osobina aviona i helikoptera pomoću komandovanih (obrtnih) motora, rotora ili celog krila. To je u poslednje vreme vrlo aktuelna kategorija *konvertoplana*, koji se nalaze još u početnoj fazi svog razvitka.

Konačno, današnje savremeno stanje moderne tehnike omogućilo nam je i stvaranje famoznih letućih vasionkih satelita. Iako satelit ne stvara aerodinamičku uzgonsku silu kao druge naše letelice, on ipak u svojoj suštini spada u dinamičke leteće mašine, jer se održava u letu savlađujući svoju težinu suprotnim dejstvom centrifugalne sile prouzrokovane vlastitom brzinom, a ova brzina je stvorena dinamičkim pogonom pomoću raketnog motora.

LIT.: M. Арлазоров, Человек на крыльях, Москва, 1950. — C. H. Gibbs-Smith, A history of flying, London 1953. — Hébrard, L'aviation des origines à nos jours, Paris 1954. — A. Bié i G. Salomon, L'aéronautique, son histoire, Paris 1956. — G. Wißmann, Die Luftfahrt, Berlin 1960. Si. M.

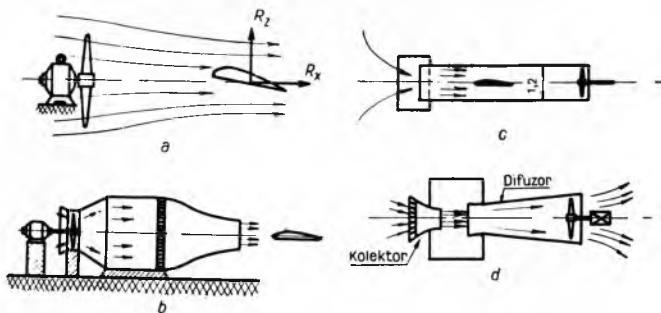
AEROTUNEL (aerodinamički tunel) je opitno postrojenje za stvaranje jednolike vazdušne struje radi određivanja aerodinamičkih svojstava tela.

Prvi aerotunel odnosno prvo postrojenje za stvaranje umetne vazdušne struje načinio je F. H. Wenham 1871 u Velikoj Britaniji. Njegov zemljak H. Philips načinio je 1884 aerotunel koristeći ejektorsko dejstvo sabijenog vazduha. Čuveni ruski naučnik N. E. Zukovski načinio je 1891 aerotunel prečnika od dve stope.

U prvoj dekadi dvadesetog veka pojavili su se aerotuneli u više zemalja. U Engleskoj graditelji aerotunela bili su Stanton i Maxim, u Francuskoj Rateau i Eiffel, u Nemačkoj Prandtl, u Italiji Crocco, u Rusiji Zukovski i Rjabušinski.

U upoređenju sa savremenim aerotunelima ta prva postrojenja bila su sasvim skromna. Tako npr. ni jedan aerotunel izgrađen pre 1910 nije imao veću snagu od 100 KS, dok danas postoje aerotuneli snage i do 200 000 KS.

Prvobitno su za stvaranje vazdušne struje korišćeni ventilatori koji su neposredno duvali vazduh na model u ispitivanju (sl. 1a). Kasnije je ventilator ugrađivan u cev kroz koju je duvao vazduh na model. Cev je imala zadatak da umanji vrtloženje iza ventilatora i da koliko toliko stvori jednoliku struju. Ovo je tzv. *duvaljka* (sl. 1b).



Sl. 1. Razvoj ispitivanja sa nepokretnim modelom. a neposredno duvanje, b duvaljka Rateau (1909), c postrojenje »Rjabušinski« (1906) sa usisavajućim ventilatorom, d aerotunel tipa »Eiffel«

Dalji napredak u poboljšanju osobina vazdušne struje bila je upotreba ventilatora koji su usisavali vazduh kroz cev u kojoj se nalazio model (sl. 1c). Međutim, tek uvođenjem dvaju bitnih elemenata u konstrukciju aerotunela: kolektora i difuzora, što je učinio francuski naučnik Eiffel (1909), počinje stvarni napredak u tehničkim ostvarenjima aerotunela (sl. 1d).

Uslovi sličnosti pri ispitivanjima i stvarnom letu zahtevali su s jedne strane povećavanje brzina a s druge strane povećavanje dimenzija radnog dela aerotunela. Brzine strujanja u radnom delu od ~ 50...60 m/s u klasičnim aerotunelima narasle su u izvesnim specijalnim aerotunelima i do brzina 16...20 puta većih od brzine zvuka.

Površine poprečnih preseka radnog dela aerotunela kreću se u širokom dijazonu. Danas se mogu naći aerotuneli sa površinom poprečnog preseka radnog dela počev od svega nekoliko santimetara do blizu 300 m².

Broj aerotunela 1914 jedva da je iznosio oko desetak, danas ima nekoliko stotina značajnijih postrojenja.

KONSTRUKTIVNA IZVOĐENJA I DELOVI AEROTUNELA

Načini stvaranja umetne vazdušne struje, odnosno izvođenja aerotunela, veoma su različiti i zavise od namene, pogonske grupe, brzine mlaza u radnom delu i dr. Danas postoji veliki broj vrlo različitih aerotunela kako po obliku, veličini, konstruktivnim rešenjima tako i po nameni i postignutim brzinama. U osnovi postoje dva glavna tipa aerotunela u pogledu izvođenja: protočni i povratni. *Protočni aerotunel* je postrojenje za stvaranje umetne vazdušne struje kroz koje za vreme rada protiču stalno nove količine vazduha (sl. 2a). *Povratni aerotunel* je postrojenje za stvaranje umetne vazdušne struje u kome za sve vreme rada kruži jedna ista količina vazduha (sl. 2b).

Glavni delovi protočnog aerotunela jesu: uvodni mlaznik (kolektor), radni deo, izlazni mlaznik (difuzor) i pogonska grupa sa usmerivačima i umirivačima.

Povratni aerotunel sem gornjih delova ima još i povratni vod koji se sastoji od kolena, povratnih difuzora i skretnih lopatica.

Kolektor je uvodni deo aerotunela u vidu cevi promenljivog oblika. Površina preseka kolektora smanjuje se po određenom zakonu od ulaza ka izlazu. Smanjenje površine preseka ima za posledicu povećavanje brzine strujanja vazduha, koja postiže svoju najveću vrednost na izlazu iz kolektora, tj. u radnom delu aerotunela. Odnos površine ulaznog i izlaznog preseka kolektora naziva se kontrakcijom

$$k = S_u/S_1. \quad (1)$$

Kontrakcija starijih tipova kolektora iznosila je ~ 5...6, a dužina im je bila obično jednaka dvostrukom prečniku izlaznog preseka. Veća kontrakcija, za određenu veličinu preseka radnog dela, zahteva i veće dimenzije aerotunela. Savremeni aerotuneli sa veoma niskom uzburkanošću imaju kontrakciju ~ 15...16, a postoje izvođenja sa kontrakcijom između 20 i 25.

Kolektor svojim oblikom treba da ubrza vazдушnu struju i da osigura jednoliku raspodelu brzina na svome izlazu. Uticaj kontrakcije na kvalitet vazdušne struje može se proceniti iz sledećeg razmatranja.

Prema jednačini kontinuiteta za ulazni (u) i izlazni (i) presek postoji jednakost

$$\rho_u S_u V_u = \rho_i S_i V_i. \quad (2)$$

Ako se na ulazu kolektora javi neki poremećaj brzine ΔV_u usled spoljnih uzroka, to će izazvati promenu kinetičke energije koja će se sačuvati na prolazu kroz kolektor i izazvaće na izlazu iz kolektora promenu brzine ΔV_i . Na osnovu toga važi:

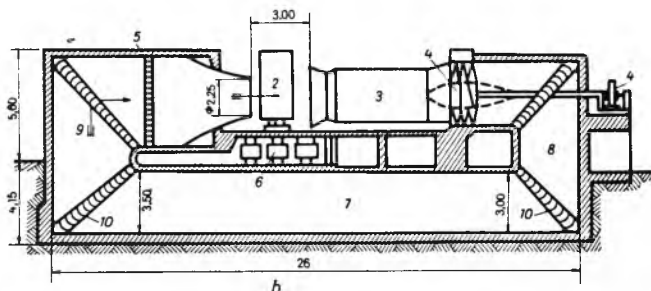
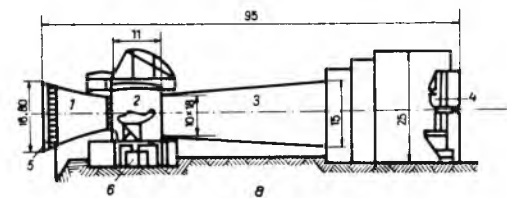
$$V_u \Delta V_u = V_i \Delta V_i, \quad (3)$$

a iz (1) i (3) sledi

$$\frac{\Delta V_i}{V_i} = \frac{\Delta V_u}{V_u} \left(\frac{V_u}{V_i} \right)^2 = \frac{\Delta V_u}{V_u} \cdot \frac{1}{k^2} \cdot \left(\frac{\rho_i}{\rho_u} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Relativni poremećaj brzine na izlazu iz kolektora u odnosu na onaj na ulazu opada sa kvadratom kontrakcije. Kako se jedna od osobina aerotunela — stepen uzburkanosti — iskazuje baš odnosom relativnih poremećaja $\Delta V/V$, to kontrakcija kolektora neposredno utiče na smanjenje uzburkanosti i time i na kvalitet aerotunela.

Radni deo je onaj prostor aerotunela u kome se vrše ispitivanja i merenja, a nastavlja se obično na kolektor. Oblik preseka



Sl. 2. Protočni i povratni aerotunel. a protočni aerotunel, b povratni aerotunel. 1 kolektor, 2 radni deo, 3 difuzor, 4 ventilator, 5 umirivač, 6 aerovaga, 7 povratni difuzor, 8, 9 kolena, 10 skretne lopatice

radnog dela može biti veoma različit: krug, elipsa, pravougaonik ili mnogougonaonik. Pritisak kroz kolektor opada sa povećavanjem brzine strujanja i u radnom delu je najniži, jer je tu brzina najveća. S obzirom na ovu činjenicu, radni deo protočnih aerotunela mora biti hermetizovan, tj. izolovan od spoljne sredine. Povratni aerotuneli ne moraju biti hermetizovani već se u radnom delu može da uspostavi pritisak okolne sredine a u vodovima aerotunela u tom slučaju se uspostavlja natpritisak. Prema izvođenju radnog dela aerotuneli se mogu svrstati u nekoliko grupa.

Aerotunel sa otvorenim radnim delom ima vazдушnu struju u radnom delu bez čvrstih zidova. Mlaz vazduha ograničen je mirnim vazduhom u radnoj prostoriji u kojoj se nalazi radni deo. Ova prostorija mora biti hermetizovana ako je aerotunel protočan.

Aerotunel sa zatvorenim radnim delom ima u radnom delu čvrste zidove koji ograničavaju vazдушnu struju i odvajaju je od okolnog vazduha.

Aerotunel sa poluzatvorenim radnim delom ima vazдушnu struju u radnom delu delimično slobodnu a delimično ograničenu čvrstim zidovima. Obično se čvrsti zidovi stavljaju sa gornje i donje strane vazdušne struje. Ovaj tip zahteva takođe hermetizovanu radnu prostoriju ako je aerotunel protočan. Radni deo se delimično zatvara da se izbegne uvođenje korekcija usled prisustva odnosno odsustva zidova, jer su korekcije za prethodna dva tipa aerotu-



Sl. 3. Radni deo aerotunela sa modelom za ispitivanje

nela suprotnog znaka. Pravilnim izborom delimičnog zatvaranja radnog dela mogu se korekcije usled zidova svesti na nulu.

Difuzor je cev kojoj poprečni presek raste od ulaza ka izlazu. Zadatak difuzora je da sa najmanjim gubicima pretvori kinetičku energiju vazdušne struje koja dolazi iz radnog dela aerotunela u potencijalnu energiju, odnosno u energiju pritiska. Brzina strujanja vazduha kroz difuzor smanjuje se a pritisak raste.

Duž zidova difuzora javlja se uvek pozitivni gradijent pritiska, što ima za posledicu naglo podebljavanje graničnog sloja kao i mesna odvajanja struje od zidova i vrtloženje. Ovo povlači za sobom gubitke i utiče na koeficijent iskorišćenja difuzora. Najmanji gubici su pri uglu otvora difuzora od $\sim 7 \dots 9^\circ$.

Koeficijent iskorišćenja difuzora za slučaj strujanja nesabitljivog fluida (vazduh se može smatrati nesabitljivim do brzina od oko 80 m/s) iznosi:

$$\eta_D = \frac{p_i - p_u}{\frac{1}{2} \rho (V_u^2 - V_i^2)}$$

Ovde se indeksi (u, i) odnose na ulazni i izlazni presek difuzora.

Vazduh iz difuzora protočnih aerotunela izlazi u okolnu sredinu.

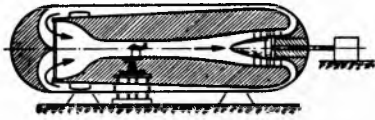
Povratni vod je cev stalnog ili promenljivog preseka kojom se vazduh iz radnog dela posle promene smeru strujanja od 360° ponovo dovodi do radnog dela u istom pravcu i smeru. Ovaj zaokret se može izvesti pomoću četiri kolena pod uglom od 90° ili pomoću dva neprekidna kolena od 180° .

U najvećem broju povratnih aerotunela primenjen je sistem sa četiri kolena. U svako od ova četiri kolena postavljaju se skretne lopatice koje vrše skretanje i usmeravanje vazdušne struje u kolenu. Bez njih dolazilo bi u kolenu do znatnog vrtloženja i velikih gubitaka. Pravilno odabrane, one bitno poboljšavaju kvalitet vazdušne



Sl. 4. Radni deo aerotunela Aerotehničkog instituta Mašinskog fakulteta u Beogradu

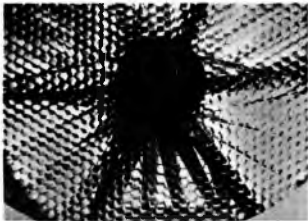
struje a utiču i na energetski bilans. Između kolena nalaze se jedan ili više *povratnih difuzora*. Prema tipu povratnog voda razlikuju se: *jednstruko povratni aerotunel* u kome sav vazduh iz radnog dela prolazi kroz jedan vod (sl. 2b) i *dvojno povratni aerotunel* u kome se vazduh iz radnog dela razdvaja i struji kroz dva različita voda. Ovi vodovi se ponovo sastaju pred kolektorom i vazduh skupno prolazi kroz radni deo (sl. 5).



Sl. 5. Dvojno povratni aerotunel promenljive gustine

Umirivači. Usled rada pogonske grupe, trenja, odvajanja struje i drugih pojava vazдушna struja u aerotunelu je uzburkana, zavrtiložena i nejednolika. Da bi se ovi nedostaci uklonili i u radnom delu dobila kvalitetna vazдушna struja, primenjuju se umirivači, koji mogu biti u vidu mreža i u obliku saća. Saće se obično postavlja u najvećem preseku kolektora i ima zadatak da usitni eventualni središnji vrtlog kolektora ili pak ostatke vrtložne pletenice ventilatora (sl. 6). *Mreže* služe za smanjenje uzburkanosti vazduha i za izjednačavanje mesnih brzina po poprečnom preseku.

Pogonska grupa osigurava snagu potrebnu za pokretanje vazduha i održavanje brzine strujanja odnosno za savladivanje svih gubitaka koji se javljaju u aerotunelu. U najvećem broju slučajeva za pogon se upotrebljava *ventilator* sličan avionskim elisama. Ventilator ostvaruje veliki protok a mali odnos sabijanja; koeficijent korisnosti mu se kreće oko 0,9. Za jedan određeni pritisak u aerotunelu, brzina strujanja u radnom delu proporcionalna je broju obrtaja ventilatora. Ventilatori mogu biti sa lopaticama okretnim



Sl. 6. Umirivač u vidu saća. Iza njega vidi se ventilator

oko uzdužne ose, što omogućuje bolje iskorišćenje ventilatora za slučaj promenljivog pritiska i drugih izmenjenih uslova rada.

Neposredno iza ventilatora postavlja se *usmerivač*, koji usmerava vazduh tako da se uništi vrtložna pletenica iza ventilatora. Usmerivač ima niz nepokretnih lopatica, sličnih lopaticama ventilatora, a broj im je obavezno različit od broja krakova ventilatora.

Na aerotunelima sa nadzvučnim strujanjem u radnom delu za pogon se obično upotrebljavaju *kompresori*, koji ostvaruju veliki odnos sabijanja a mali protok. Mogu biti aksijalni ili centrifugalni.

Osim na ta dva načina, strujanje se može dobiti još i nizom drugih postupaka: iskorišćenjem ejektorskog dejstva, isticanjem sabijenog vazduha iz spremnika i dr.

KOEFICIJENT DOBROTE RADA AEROTUNELA

Odnos kinetičke energije mase vazduha koja u jedinici vremena proteče kroz radni deo (npr. sekundne mase) i snage utrošene za rad aerotunela označava koeficijent dobrote rada: $\eta_D = E/P$.

Pod pretpostavkom da je brzina jednolika po čitavom preseku S radnog dela, kinetička energija mase vazduha koja proteče u jedinici vremena može se izraziti jednačinama

$$E = \frac{1}{2} m_s V^2 = \frac{1}{2} \rho S V^3,$$

gde je $m_s = \rho S V$ masa vazduha koja proteče kroz radni deo u jedinici vremena, a ρ specifična masa ili gustina vazduha.

Na osnovu toga je koeficijent dobrote rada aerotunela

$$\eta_D = \frac{\rho S V^3}{2P}.$$

Koeficijent dobrote rada je veći od jedinice, sem za duvaljke, i kreće se u širokim granicama od 1 do blizu 20 (najčešće između 2 i 6). On je po prirodi različit od koeficijenta korisnosti, sa kojim ga ne treba zamenjivati. Utoliko je veći ukoliko je aerotunel bolje projektovan i izveden, tj. ukoliko su gubici u njemu manji. Koeficijent dobrote rada pruža sliku o aerodinamičkom kvalitetu aerotunela.

Iz izraza za koeficijent dobrote rada može se lako zaključiti da pri neizmenjenim ostalim uslovima pogonska snaga raste srazmerno povećanju površine preseka radnog dela i da je srazmerna trećem stepenu brzine strujanja. Npr., aerotunel u Chalais-Meudon sa eliptičnim presekom radnog dela (8×16 m) troši snagu od 6000 KS i pri tome postiže brzinu strujanja u radnom delu od 50 m/s. Ako bismo želeli da u tome aerotunelu postignemo brzinu samo od oko polovine vrednosti brzine zvuka, bila bi potrebna snaga oko 200 000 KS.

Kako su snage aerotunela ograničene bilo tehničkim bilo ekonomskim razlozima, to se usvajaju kompromisna rešenja kao: veći presek a manja brzina i obratno, jasno, uz traženje rešenja koja daju najveći koeficijent dobrote rada. Tako npr. aerotunel u Wright-Fieldu, USA, kružnog preseka prečnika 3 m i brzine od 268 m/s, troši 30.000 kW, dok aerotunel u Langley-Fieldu, takode USA, eliptičnog preseka (18×9 m), troši samo 6000 kW ali mu je brzina svega 53 m/s.

VRSTE AEROTUNELA

Aerotuneli mogu se klasificirati prema nizu različitih osobina i konstruktivnih izvođenja: prema brzini strujanja u radnom delu, prema načinu rada, prema nameni.

Podela aerotunela prema brzini strujanja u radnom delu. Pri toj podeli osnovnu ulogu ima brzina zvuka. Prema njoj se pojave dele na dve grupe: podzvučne i nadzvučne. Osobine strujanja bitno se menjaju kada se brzina strujanja približava brzini zvuka u posmatranoj sredini. Vazduh, kao i ostali gasovi,



Sl. 7. Ventilator aerotunela Aerotehničkog instituta u Beogradu

spada u grupu sabitljivih fluida, što znači da usled promene pritiska i temperature menja svoju zapreminu odnosno specifičnu masu (gustinu). Promena gustine gustina je promeni pritiska; pod pretpostavkom da se promena vrši bez razmene toplote sa okolnom sredinom, koeficijent srazmernosti je odnos specifične toplote pri stalnom pritisku i pri stalnoj zapremini ($k = c_p/c_v$).

Ova zavisnost data je sledećim izrazom

$$dp/p = k \cdot d\rho/\rho.$$

Osnovni izraz za brzinu zvuka je $c^2 = dp/d\rho$.

Povezivanjem ovih dveju jednačina i jednačine stanja gasa ($p/\rho = RT$) dobija se za brzinu zvuka izraz $c^2 = kRT$.

Kako je za vazduh $k = 1,405$ a $R = 287 \text{ m}^2/\text{s}^2 \text{ }^\circ\text{K}$, dobija se za brzinu zvuka u vazduhu, u m/s:

$$c = 20,1 \sqrt{T}.$$

Pri zemlji, gde je temperatura $t = 15^\circ\text{C}$, odnosno $T = 288^\circ\text{K}$, brzina zvuka iznosi $c = 341 \text{ m/s} = 1228 \text{ km/h}$.

Prostiranje malih promena pritiska kroz vazduh vrši se brzinom zvuka. Brzina zvuka usvaja se kao jedinica za relativno merenje brzina. Broj koji pokazuje koliko je puta brzina strujanja vazduha odnosno brzina kretanja nekog tela kroz vazduh veća ili manja od brzine zvuka u toj sredini naziva se *Machov broj* ($Ma = V/c$).

Priilikom strujanja vazduha kroz aerotunel dolazi do promena brzina, što izaziva promene pritiska, a prema tome dolazi i do promena gustine vazduha. Pri malim brzinama strujanja male su i

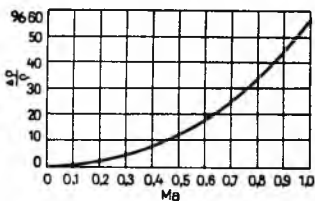
promene gustine, te se vazduh može smatrati nesabitljivim. Gde je granica zanemarivanja promene gustine zavisi od vrste i preciznosti merenja. Promena gustine vazduha u zavisnosti od brzine data je sledećim izrazom

$$\Delta \rho/\rho = (Ma^2/5 + 1)^{2,5} - 1$$

a prikazana je na dijagramu na sl. 8. Prema tome može se izračunati kolika je greška koja se čini na veličini gustine ako se vazduh smatra nesabitljivim. Tako imamo na primer za

Ma	0,10	0,14	0,20	0,33
$\Delta \rho/\rho$	0,005	0,01	0,02	0,05

Pri zemlji činimo grešku od 1% na gustini već pri brzini od 47,6 m/s. Promeni gustine od 2% odgovaraće brzina od 68 m/s.



Sl. 8. Zavisnost gustine vazduha od brzine strujanja

Ako se tolika greška može da dopusti, onda se pri tim brzinama vazduh može smatrati nesabitljivim.

Aerotunel je zapravo strujna cev promenljivog preseka, bilo da je izveden kao protočni ili kao povratni tip. Jednačina kontinuiteta (zakon o protoku) pruža mogućnost da se odredi veličina pojedinih poprečnih preseka ako su nam poznate brzine strujanja kroz njih.

$$S_1 \rho_1 V_1 = \text{const} = S_2 \rho_2 V_2.$$

Za slučaj strujanja nesabitljivog fluida ($\rho_1 = \rho_2$) dobija se da je odnos poprečnih preseka obrnuto srazmeran odnosu brzina strujanja $S_1/S_2 = V_2/V_1$.

U slučaju kada se vazduh ne može smatrati nesabitljivim mora se primeniti ovaj izraz:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{Ma_2}{Ma_1} \left(\frac{Ma_1^2 + 5}{Ma_2^2 + 5} \right)^3.$$

Prilikom strujanja vazduha pojavljuju se dve oprečne tendencije. S jedne strane usled povećavanja brzine postoji težnja ka smanjenju preseka ($S V = \text{const}$). S druge strane povećanje brzine povlači za sobom smanjenje pritiska (pretvaranje energije pritiska u kinetičku energiju). To smanjenje pritiska pri stalnom protoku praćeno je težnjom za povećavanjem zapremine odnosno povećavanjem preseka strujne cevi.

Od ova dva uticaja preovladava prvi za brzine do $Ma = 1$, tj. sa smanjivanjem preseka brzina raste i obratno. U slučaju kada brzina dostigne brzinu zvuka, ova se dva uticaja izjednačuju. Presek u kome se postiže brzina strujanja jednaka brzini zvuka

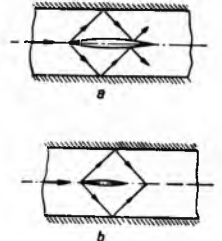
okozvučni (transonični), nadzvučni (supersonični) i hiperzvučni (hipersonični) aerotuneli.

Malobrzinski aerotunel ima glavnu odliku da mu brzina strujanja vazduha u radnom delu ostaje u granicama gde se vazduh može smatrati nesabitljivim, te se ne mora voditi računa o uticaju sabitljivosti vazduha ($V < 100$ m/s).

Podzvučni aerotunel ima brzine strujanja vazduha u radnom delu takve da dolazi do osetnijeg uticaja sabitljivosti vazduha ($0,3 < Ma < 0,8$), ali se još po pravilu na ispitivanom modelu ne javljaju mesne zvučne brzine odnosno ne dolazi do pojave mesnih udarnih talasa.

Okozvučni aerotunel služi za ispitivanja pojava koje nastaju u oblasti brzina bliskih brzini zvuka ($0,8 < Ma < 1,2$), a pri čemu dolazi do pojava udarnih talasa na ispitivanom modelu (sl. 9).

Nadzvučni aerotunel se upotrebljava za opite pri brzinama strujanja većim od brzine zvuka. Pri ispitivanjima u nadzvučnim aerotunelima javlja se ispred ispitivanog modela čeonni udarni talas, koji se prostire ka zidovima aerotunela odakle se odbija u struju vazduha. Da bi se izbegao uticaj odbijenih talasa na rezultate ispitivanja, mora se voditi računa o veličini modela kao i o pravilnom odabiranju oblika radnog dela koji se nastavlja iza prvog grla (sl. 10). Prestanak nadzvučnog strujanja nastaje u drugom grlu iza radnog dela.



Sl. 10. Odabiranje veličine modela u nadzvučnom aerotunelu. a) nepravilno odabrana veličina, b) pravilno odabrana veličina

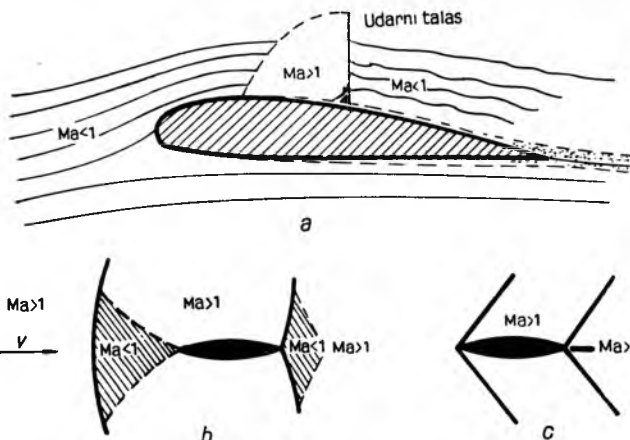
Jedna od velikih teškoća u radu sa nadzvučnim aerotunelima je vlažnost vazduha, koja se mora svesti na vrlo malu vrednost. Veća vlažnost izaziva pojavu kondenzacionih talasa koji nepovoljno utiču na pravilnost merenja. Smatra se da relativna vlažnost od 5%, odnosno vlažnost od 0,3 g/kg vazduha nema nepovoljnih posledica. Nadzvučni aerotuneli mogu biti protočni i povratni. U protočnim nadzvučnim aerotunelima teškoće sa vlažnošću su nesrazmerno veće nego u povratnim.

Hiperzvučni aerotunel je vrsta nadzvučnog aerotunela sa brzinama strujanja $Ma > 5$.

Podela aerotunelâ prema načinu rada. Prema načinu rada, aerotuneli mogu biti neprekidnog i prekidnog dejstva.

Aerotunel neprekidnog dejstva nije ograničen vremenskim trajanjem vršenja opita. Pri radu na ovakvim aerotunelima, protočnog ili povratnog tipa, vreme trajanja opita određuje po volji ispitivač. Rad ovakvih aerotunela ostvaruje se najčešće pomoću ventilatora ili kompresora, a ima ih i ejektorskog tipa.

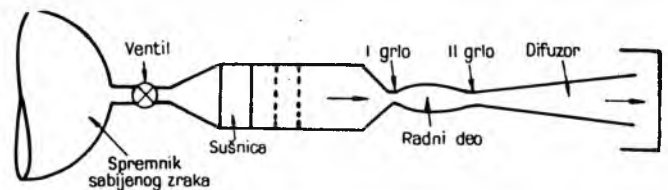
Aerotunel prekidnog dejstva ograničen je u pogledu vremena trajanja rada. Obično je ovaj period vrlo kratak i kreće se od



Sl. 9. Pojave u oblasti brzina bliskih brzini zvuka. a) pojava udarnog talasa na gornjaci aeroprofila krila u okozvučnoj oblasti, b) slika strujanja sa pojavom čeonog udarnog talasa odvojenog od napadne ivice aeroprofila u nadzvučnoj oblasti, c) vezani udarni talas kod aeroprofila pri velikim nadzvučnim brzinama

naziva se *kritičnim presekom* ili *grlom*. Dalje povećavanje brzine strujanja moguće je samo ako se poveća presek strujne cevi.

Prema ostvarenoj brzini strujanja u radnom delu aerotuneli se svrstavaju u ove grupe: malobrzinski, podzvučni (subsonični),



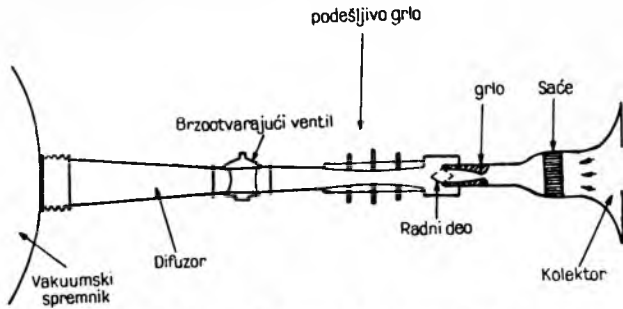
Sl. 11. Aerotunel prekidnog dejstva na sabijeni vazduh

delova sekunde do nekoliko desetina sekunde. Najčešće to je tip sa isticanjem ili uticanjem vazduha u posebne spremnike, a može biti i ejektorskog tipa. Instalirana snaga ovoga tipa aerotunela obično je mala, ali se vrši akumulacija energije u vidu povećavanja ili smanjenja pritiska u dužem periodu ($\sim 5 \dots 30$ minuta) da bi se iskoristila za kratkotrajni rad.

Aerotunel na sabijeni vazduh je tip aerotunela prekidnog dejstva kojemu je radni deo povezan sa spremnikom sabijenog vazduha. Vazduh, koji se nalazi u spremniku pod visokim pritiskom, prilikom isticanja struji kroz aerotunel i u radnom delu postiže nadzvučnu brzinu (sl. 11). Nadzvučna brzina u radnom delu se održava sve dok odnos pritisaka u grlu ispred radnog dela i u spremniku ne postigne vrednost 0,527.

Vakuumski aerotunel pripada tipu aerotunela sa prekidnim dejstvom. Akumulacija energije vrši se stvaranjem razređenosti

(vakuuma) u posebnom spremniku podešenom da može da izdrži naprezanja usled smanjenog pritiska. Sa ovim spremnikom spojena je truba aerotunela. Otvaranjem naročitog brzootvarajućeg ventila vazduh iz atmosfere ili posebnog spremnika suvog vazduha naglo poteče u vakuumski spremnik i pri tome se u radnom delu aerotunela uspostavlja nadzvučna brzina (sl. 12).

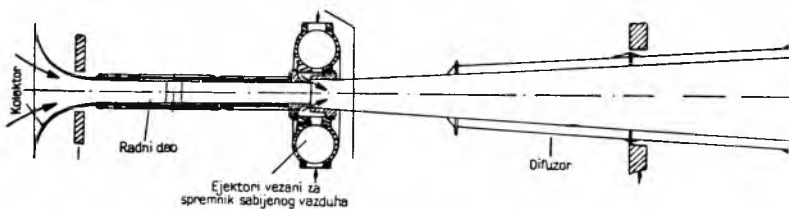


Sl. 12. Vakuumski aerotunel prekidnog dejstva

Ejektorski aerotunel može biti prekidnog i neprekidnog dejstva. U tipu prekidnog dejstva strujanje se vazduha u radnom delu ostvaruje time što se vazduh iz atmosfere ili spremnika suvog vazduha povlači ejektorskim dejstvom struje sekundarnog vazduha koji ističe velikom brzinom iz spremnika visokog pritiska. U ejektorskom aerotunelu neprekidnog dejstva strujanje se ostvaruje uz pomoć mlaza sagorelih gasova koji ističu iz jednog ili više mlaznih motora (sl. 13).

Impulsni aerotunel je aerotunel prekidnog dejstva sa vrlo kratkim trajanjem radnog perioda, svega nekoliko mikrosekundi. Osnovna karakteristika ovakvih aerotunela je u tome što model nije izložen vazdušnoj struji već dejstvu udarnog talasa koji putuje duž cevi u kojoj se vrši ispitivanje. Udarni talas nastaje usled impulsa koji se javlja kao posledica nagle ekspanzije ili eksplozije. Prema načinu stvaranja početnog impulsa i kasnijem eventualnom ubrzavanju proširivanja impulsa kroz radnu sredinu ovakva postrojenja se mogu podeliti na više grupa. *Udarne cev* sastoji se od spremnika i cevi u kojoj se vrši ispitivanje. U spremniku se nalazi vazduh ili koji drugi gas pod vrlo visokim pritiskom, a cev je od njega izolovana membranom. Rasprskavanjem membrane izaziva se početni impuls, koji se naglo širi kroz cev u vidu udarnog talasa i nailazi na model u ispitivanju. Rasprskavanje membrane se vrši na razne načine. Jedan od načina je mehaničko probijanje membrane izložene snažnom pritisku sa strane spremnika; drugi jedan način je da se smeša vodonika i kiseonika podvrgnuta visokom pritisku u spremniku zapali i tada dolazi do eksplozije koja izaziva početni impuls. — *Aerotunel sa plazmom* radi sa gasovima pod vrlo visokim temperaturama (preko 3000 °K, do nekoliko miliona stepeni) tako da gas prelazi u stanje plazme. Početni impuls se ubrzava elektromagnetskim putem, tako da se postižu vrlo visoke brzine prostiranja impulsa. Postignute su brzine i do $Ma \approx 200$.

Impulsni aerotuneli upotrebljavaju se u projektilskoj i raketnoj tehnici, a posebno za ispitivanja aerodinamičkog zagrevanja (zaustavne temperature) i trošenja vrha projektila usled dejstva ovog zagrevanja.



Sl. 13. Ejektorski aerotunel

Podela aerotunela prema nameni. Prema nameni, aerotuneli mogu biti za opšte i za posebne svrhe.

Aerotunel za opšte svrhe upotrebljava se za uobičajena aerodinamička ispitivanja kao što su određivanje osnovnih aerodinamičkih svojstava modela letelice i drugih tela koja se kreću kroz vazduh. U ovim aerotunelima let se uz pomoć aerovaga i drugih uređaja i

instrumenata vrše merenja aerodinamičkih sila i momenata, raspodele pritiska na modelu letelice i druga merenja.

Aerotunel za posebne svrhe namenjen je specijalizovanim ispitivanjima i obično je prilagođen svojim oblikom i svojom konstrukcijom ovoj vrsti ispitivanja. Postoji mnogo grupa takvih aerotunela:

Aerotunel promenljive gustine izveden je tako da se u njemu može po volji menjati radni pritisak pa prema tome i gustina vazduha. Ovaj tip aerotunela mora biti hermetičan i potpuno izolovan od okolne sredine, što znači da po konstrukciji mora biti povratnog tipa (sl. 4). *Aerotunel sa natpritiskom* je tip aerotunela promenljive gustine u kome radni pritisak može da ide i do 25 at. Povećanje pritiska ima za posledicu i smanjenje kinematičkog viskoziteta ($\nu = \frac{\mu}{\rho}$) vazduha kao radnog fluida, usled čega naraste Reynoldsov broj ($Re = V l / \nu$), koji je obrnuto srazmeran viskozitetu. U aerotunelu sa natpritiskom mogu se stoga postići veliki Reynoldsovi brojevi, koji odgovaraju stvarnom letu, i uz manje brzine strujanja vazduha. Povećanje gustine vazduha u radnom delu. — *Aerotunel sa potpritiskom* ima radni fluid sniženog pritiska, što povlači za sobom i smanjenje gustine. Ovo se čini radi ostvarivanja velikih brzina strujanja sa relativno manjim snagama za pogon. Na ovaj način postiže se sličnost po Machov broju, ali se gubi sličnost po Reynoldsovu broju. Često se kombinuju aerotuneli sa natpritiskom i aerotuneli s potpritiskom konstruktivno tako da se radnom vazduhu jedinstvenog postrojenja može i povećati i smanjivati pritisak u odnosu na atmosferski.

Niskoturbulentni aerotunel ima veoma mali stepen uezburkarnosti i u tom pogledu se znatno približava slobodnoj atmosferi. Mala uezburkarnost se postiže velikom kontrakcijom kolektora kao i njegovim povoljnim oblikom, a sem toga se upotrebljavaju umirivači u vidu vrlo finih mreža.

Dvodimenzioni aerotunel ima radni deo pravougaonog preseka izveden tako da mu je jedna strana preseka (obično horizontalna) znatno manja od druge i služi za ispitivanja ravanskih strujanja. Može biti protočnog ili povratnog tipa, podzvučnih ili nadzvučnih brzina.

Vertikalni aerotunel ima vertikalnu podužnu osu radnog dela i strujanje mu je usmereno nagore. U većini slučajeva upotrebljava se za ispitivanja ponašanja slobodnih modela. Ovakvi modeli moraju imati sem geometrijske sličnosti sa pravom letelicom i istovetan raspored masa. *Aerotunel za ispitivanja kovita* je tip vertikalnog aerotunela posebno podešen za ispitivanje ponašanja modela u kovitu. Na početku i na kraju radnog dela postavljaju se mreže za hvatanje modela pri prestanku rada ili za slučaj da model iz kovita pređe u poniru let. Registrovanje ponašanja modela vrši se fotografskim putem uz pomoć fotokamera raspoređenih oko radnog dela. Za vreme ispitivanja komandne površine se pokreću satnim mehanizmom smeštenim u samom modelu, telekomandovanjem radio-putem ili promenom magnetnog polja u radnom delu uz pomoć velikih elektromagneta.

Aerotunel za ispitivanje slobodnog leta služi za ispitivanja slobodnih modela izloženih uticaju sile teže, aerodinamičkih sila i sila inercije. Iz ovakvih ispitivanja dobijaju se podaci o stabilnosti i upravljivosti letelice čiji se model ispituje.

Aerotunel za zaleđivanje upotrebljava se za rešavanje problema zaleđivanja pojedinih delova letelice, kao i ispitivanje uslova i mogućnosti razleđivanja uz pomoć raznih sredstava za ove svrhe. Sam aerotunel snabdeven je uređajima za hlađenje ili se pak iskorištavaju povoljne meteorološke prilike i klimatski uslovi planinskih mesta na većim visinama gde su izgrađeni ovakvi aerotuneli.

Dimni aerotunel pruža mogućnost vizualizacije strujanja pomoću dimnih strujnica. Takav aerotunel snabdeven je dimnim generatorom iz koga se crpe dim povlačenjem ili se ubacuje pod pritiskom. Dim obrazuje niz paralelnih strujnica, koje nailazeći na model čine vidljivom sliku opstrujavanja i na taj se način omogućuje istraživanje povoljnih aerodinamičkih oblika (sl. 14). U najvećem broju slučajeva dimni aerotuneli se upotrebljavaju u nastavne svrhe.

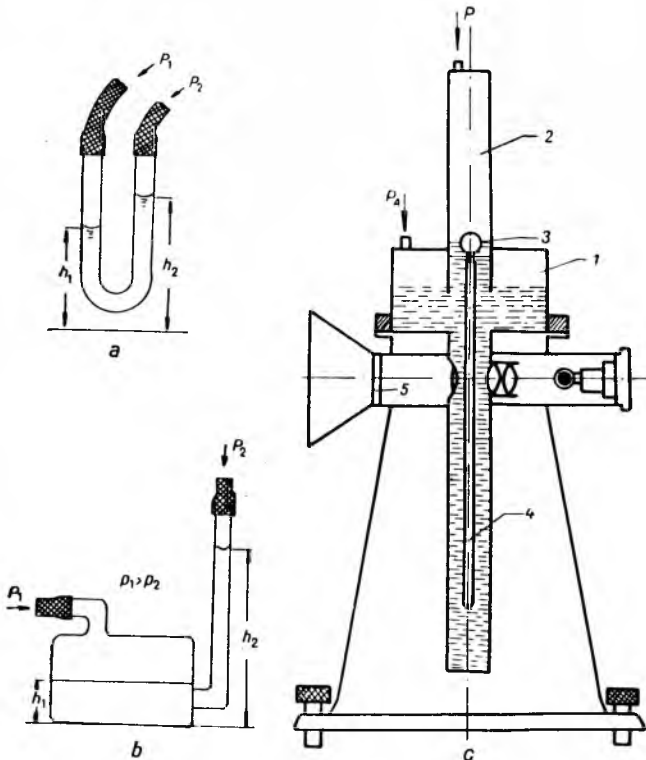
Postoje strujni aerotuneli kojima radni fluid nije vazduh već neki drugi fluid. Za to se najčešće upotrebljavaju teški gasovi, npr. freon, ili pak sasvim laki, kao helijum i vodonik. Nisu retki ni strujni aerotuneli za aerodinamička ispitivanja u kojima je radni fluid voda. *Vodenokavitacioni kanal* je strujni kanal sa vodom kao radnim fluidom. Snižavanjem pritiska u radnom delu i istovremenim povećavanjem brzine strujanja ostvaruju se uslovi za pojavu hladnog isparavanja vode (kavitacije), tj. naglog isparavanja i pri relativno niskim temperaturama vode. Takvi kanali imaju višestruknu primenu. Jedna od namena im je da strujanje učine vidljivim uz pomoć sitnih opijljaka, koji svojim kretanjem u vodi čine vidljivom sliku opstrujavanja. Druga im je namena ispitivanje hidrodinamičkih osobina tela koja se kreću kroz vodu. I najzad, u njima se putem analogije između pojave kavitacije u vodi i pojave mesnih zvučnih brzina u vazduhu vrše kvalitativna ispitivanja u okozvučnoj oblasti brzina u vazduhu. Kavitacija će se na modelu pojaviti na mestu najnižeg pritiska odnosno na mestu najveće mesne brzine. Ovo mesto po svom karakteru odgovara mestu gde bi se u vazduhu pojavila mesna zvučna brzina odnosno udarni talas. Doterivanjem oblika moguće je izbeći izuzetno visoke razlike pritisaka i na taj način odgoditi pojavu udarnih talasa ka većim brzinama. U vodenokavitacionim kanalima moguće je odrediti povoljne brzinske modele sa konstantnom raspodelom pritisaka ako se prati oblik kavitacionog mehurca. Ovakvi su kanali zbog relativno male instalisane snage korisni za prethodna doterivanja oblika letelice.



Sl. 14. Opstrujavanje oko aeroprofila krila u dimnom aerotunelu

MERENJA U AEROTUNELIMA

U cilju određivanja aerodinamičkih svojstava modela aviona i drugih letelica kao i uopšte tela koja se kreću kroz vazduh ili su izložena vazдушnim strujama (vetrovima), u aerotunelima se pro-



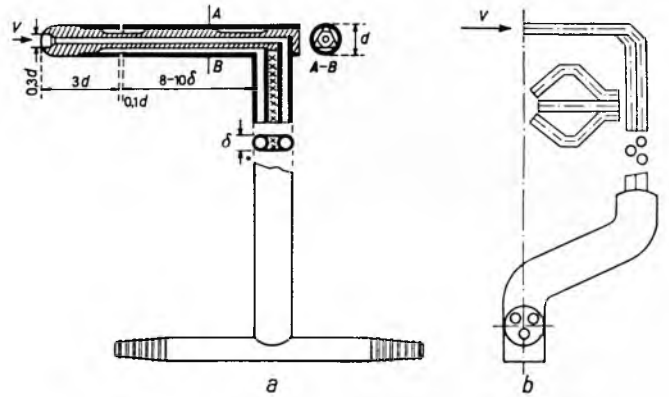
Sl. 15. Manometri s posudom i plovkom. a manometar oblika U, b manometar sa posudom, c mikromanometar sa plovkom: 1 široki sud, 2 sud sa plovkom, 3 plovak-nosač skale, 4 skala, 5 mutno štaklo za očitavanje

vodi niz različitih merenja ili posmatranja, bilo neposredno očitavanjem na odgovarajućim uređajima i instrumentima ili registrovanjem pomoću fotosnimaka ili pisača.

Određivanje aerodinamičkih sila i momenata koji se pojavljuju na modelu u ispitivanju može se izvesti na više načina: merenjem promena pritisaka u vazдушnom mlazu usled prisustva modela u njemu, merenjem raspodele pritisaka na samom modelu i neposrednim merenjem sila i momenata pomoću aerovaga.

Merenje brzina i pritisaka u vazдушnom mlazu vrši se *mikromanometri* vrlo različitih izvođenja. Najprostiji su manometri oblika U. Nezgoda im je promenljivost nule, što otežava rad. Manometri sa posudom ili sa plovkom (sl. 15) precizniji su i povoljniji za rad, ali su znatno složenije konstrukcije pa i znatno skuplji. Za istovremeno merenje većeg broja pritisaka upotrebljavaju se manometri sa više cevi, tzv. *multimanometri*.

Primač brzine odnosno primač razlike pritisaka na osnovu koje se određuje brzina, u najvećem broju slučajeva je *Pitotova cev* (sl. 16a). To je dvojna cev sa čeonim otvorom za ukupni pritisak i nizom otvora po obodu za prijem statičkog pritiska. Razlika ova dva pritiska koja se očitava na manometru je dinamički pritisak ($q = \frac{1}{2} \rho V^2$), iz koga se neposredno izračunava brzina. Sem



Sl. 16. Instrumenti za merenje opstrujavanja. a Prandtlova cev (poboljšana Pitotova cev) za određivanje brzine, b merač veličine i pravca strujanja

pomenutih uređaja i instrumenata pri merenjima u aerotunelima upotrebljavaju se za merenje promena u vazдушnom mlazu još mnogi drugi instrumenti i uređaji: turbulente kugle, merači skretanja i merači pravca strujanja (sl. 16 b) i dr.

Aerovaga

Aerovaga (aerodinamička vaga) je uređaj za merenje aerodinamičkih sila i momenata koji se javljaju na modelu prilikom ispitivanja u aerotunelima.

Aerodinamička sila i aerodinamički moment mogu se razložiti na komponente. To se razlaganje vrši u aerodinamičkom koordinatnom sistemu koji se primenjuje pri merenjima u aerotunelima. (*V. Aerodinamička sila i moment.*)

Prilikom ispitivanja u aerotunelima merenja sila i momenata mogu se vršiti uglavnom na dva načina: merenjem ukupne aerodinamičke sile i momenta, iz kojih podataka je moguće računskim putem odrediti njihove komponente; merenjem pojedinih komponenta aerodinamičke sile i momenta, iz čijih se vrednosti dalje računom određuju ukupna aerodinamička sila i moment.

Aerovage po svojim konstruktivnim izvođenjima mogu da mere jednu, dve ili više komponenta aerodinamičke sile i momenta. Ukoliko se zahteva istovremeno merenje većeg broja komponenta, aerovaga postaje složenija i merenja teža. Od savremenih aerovaga zahteva se da istovremeno mere šest komponenta, preko kojih se dolazi računom do ukupne aerodinamičke sile i momenta, ukoliko je to potrebno.

Osnovni elementi aerovage su: nosač modela, prenosni sistem i merni instrumenti. *Nosač modela* je deo aerovage kojim se model održava u radnom delu aerotunela za vreme ispitivanja i preko koga se model priključuje za aerovagu. Ovaj deo aerovage je većim svojim delom izložen vazдушnoj struji za vreme ispitivanja i utiče svojim prisustvom na tačnost merenja, stoga se mora svojim oblikom i položajem prema modelu podesiti tako da izaziva što

manje poremećaje u struji vazduha. Nosač modela najčešće služi i za promenu napadnog ugla modela. *Prenosni sistem* nastavlja se na nosač modela i služi za razlaganje ukupne aerodinamičke sile i momenta i prenošenje njenih komponenata od modela na merne instrumente. Složenost prenosnog sistema zavisi od vrste aerovage kao i od broja komponenata koje aerovaga meri. *Merni instrument* je deo aerovage na kome se neposredno očitavaju ili beleže veličine merenih komponenata aerodinamičke sile i momenta.

Prema načinu izvođenja nosača modela i prenosnog sistema postoje uglavnom dva osnovna tipa aerovaga. *Aerovaga sa žicama* je tip pri kojem se model drži u radnom delu pomoću sistema tankih čeličnih žica, koje istovremeno služe i za prenos sila od modela do mernih instrumenata. *Kruta aerovaga* ima sistem krutih prenosnih poluga sa osetljivim zglobnim vezama preko kojih se prenose sile i momenti sa modela na merne instrumente. *Mešovita aerovaga* ima prenosni sistem, odnosno nosač modela izveden delimično od krutih elemenata a delimično u vidu sistema žica.

Prilikom proučavanja raznih tipova aerovaga i prilikom izbora koncepcije aerovage za određeni aerotunel potrebno je, sem čisto konstruktivnih mogućnosti, uočiti i međudejstvo nosača modela i samoga modela, sopstveni otpor nosača modela izloženog dejstvu vazdušne struje za vreme ispitivanja i deformacije nosača modela i prenosnog sistema pod opterećenjem od aerodinamičkih sila i momenata koji se javljaju na modelu. Svi ovi činioci nepovoljno utiču na tačnost merenja i iziskuju naknadno uvođenje odgovarajućih popravki.

Tačnost merenja koja se zahteva od aerovage kreće se u vrlo uskim granicama. Greška kvalitetno izvedenih aerovaga ne sme da pređe 1/5000 najvećeg opterećenja. Ovakvo strogi zahtevi u pogledu tačnosti su neophodni, jer se pri merenjima na modelima u smanjenoj razmeri moraju da osete i minimalne promene oblika, površinske obrade i dr.

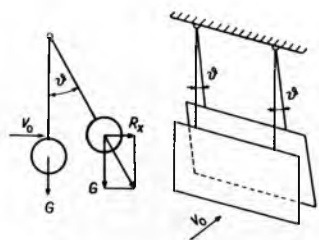
Osim aerovaga za merenje aerodinamičkih sila i momenata modela letelica postoje aerovage koje se upotrebljavaju pri ispitivanjima elisa kao i aerovage za određivanje pojedinih izvoda dinamičke stabilnosti.

Aerovage sa žicama. U ovom tipu aerovage model je privazan za merne instrumente, odnosno održava se u vazdušnoj struji radnog dela, pomoću sistema uspravnih, vodoravnih i kosih žica. Ove žice su prethodno zategnute statičkim opterećenjem. Prve aerovage za merenje otpora bile su žičanog tipa. Poznati francuski aerodinamičar Eiffel merio je otpor lopte izložene vazdušnoj struji vešanjem lopte o jednu žicu (sl. 17). Pri radu aerotunela lopta poznate težine G će se usled dejstva aerodinamičke sile (otpora) pomeriti iz prvobitnog položaja. Novi položaj žice zaklapaće neki ugao ϑ sa početnim položajem. Sila otpora lopte (uz zanemarivanje otpora same žice) biće:

$$R_x = G \operatorname{tg} \vartheta.$$

Sličnim metodom merenja moguće je odrediti otpor ravne ploče obešene o dve žice (sl. 17).

Merenje više komponenata putem sistema žica je složenije i zahteva veći broj žica za vezivanje



Sl. 17. Prve aerovage: Eiffelovo merenje otpora lopte i merenje otpora ravne ploče

zivanje modela, a to izaziva i dopunski otpor sistema vešanja modela, koji se nikako ne može zanemariti.

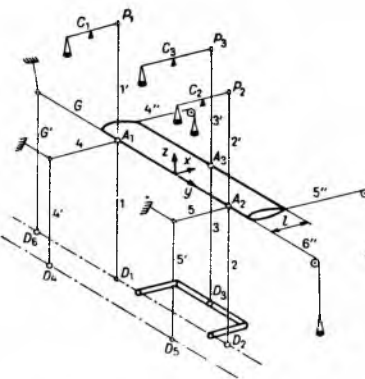
Šestokomponentna aerovaga sa žicama prikazana je na sl. 18. Njome može da se meri sledećih šest komponenata aerodinamičke sile i momenta:

- otpor: $R_x = D_4 + D_5,$
- klizanje: $R_y = D_6,$
- uzgon: $R_z = D_1 + D_2 + D_3,$
- moment naginjanja: $M_x = (D_1 - D_2) a,$
- moment propinjanja: $M_y = D_3 l \cos \alpha,$
- moment skretanja: $M_z = (D_4 - D_5) b.$

Ovde su sile na odgovarajućim dinamometrima obeležene slovom D , a veličine a i b predstavljaju polovinu rastojanja između odgo-

varajućih dinamometara. Sa α obeležen je napadni ugao. Ovakvo izmerene komponente aerodinamičke sile i momenta moraju se

popraviti zbog prisustva i uticaja žica koje se nalaze u vazdušnoj struji. Otpor žica određuje se baždarenjem u odsustvu modela. Model se zamenjuje jednim komadom oblika slova T, čiji je otpor poznat. Izmereni otpor, umanjen za otpor komada T, daje otpor žica sistema vešanja modela. Prosečno, otpor sistema vešanja je reda minimalnog otpora savremenih aviona, tj. $c_x \text{ min} = 0,02 \dots 0,025$, odnosno dva do tri puta je veći od minimalnog otpora krila.



Sl. 18. Šestokomponentna vaga sa žicama

Iz ovoga proizilazi da je potrebno smanjiti u što većoj meri sopstveni otpor sistema vešanja modela, jer on ograničava tačnost merenja minimalnog otpora modela. Ako se sa u obeleži ukupan otpor modela i sistema vešanja, sa v otpor sistema vešanja i sa m otpor samog modela, važiće:

$$u = m + v.$$

Tražeći najveću moguću grešku dobija se

$$\frac{dm}{m} = \frac{du}{u - v} + \frac{dv}{u - v}.$$

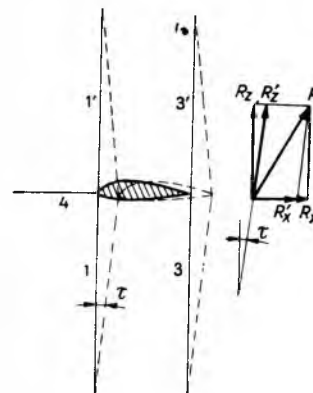
Stavljajući da je $v = km$ i pretpostavljajući da je $\frac{du}{u} = \frac{dv}{v}$ dobija se:

$$\frac{dm}{m} = (1 + 2k) \cdot \frac{dv}{v}.$$

Dakle, ako se pri merenju otpora sistema vešanja načini greška u merenju od samo $\frac{dv}{v} = 1\%$, greška na otporu modela krila ($k = 2$) poraste na $\frac{dm}{m} = 5\%$.

Sem neposrednog uticaja žica preko sopstvenog otpora sistema vešanja modela postoji još i međudejstvo žica i modela. Priključna mesta žica, naročito ako su na prednjoj ivici ili gornjaci krila, predstavljaju mesta gde se struja počinje da odvajati, a čega nema u stvarnosti, što se nepovoljno odražava na vernost i tačnost merenja. Uticaji vodoravnih žica, naročito onih paralelnih prednjoj ivici, znatni su i nepovoljniji od uticaja uspravnih žica. Stoga se u praksi izbegavaju vodoravne žice paralelne napadnoj ivici.

Usled elastičnih izduženja nastalih od naprezanja, žice ne ostaju strogo uspravne i vodoravne te aerovaga ne meri više željene veličine, pa je potrebno uvođenje popravki. Tako npr. usled dejstva otpora dolazi do deformacije uspravnih žica (sl. 19). One nisu više uspravne već sa ranijim pravcem zaklapaju neki ugao τ . Ukupna aerodinamička sila rastavlja se sada prema novim pravcima žica, tako da imamo $R_z' = R_z \cos \tau$ i $R_x' = R_x - R_z \operatorname{tg} \tau$. Otpor nije više jednak zbiru $D_4 + D_5$, već se mora vršiti popravka. Greška na otporu u opštem slučaju nije zanemarljiva, dok greška na uzgonu jeste. Da bi se izbegle ove nezgode, upotrebljavaju se žice većeg preseka. No sa povećavanjem preseka žica ne može se ići daleko zbog povećanja sopstvenog otpora žica.



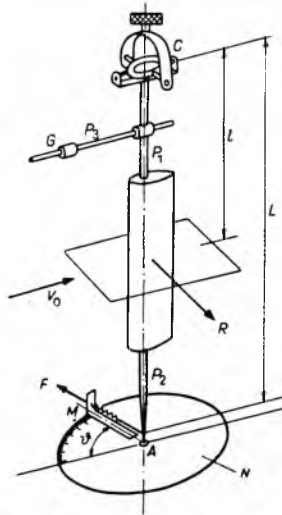
Sl. 19. Deformacije žičane aerovage pod opterećenjem

Krute aerovage. Na ovoj vrsti aerovage model je pričvršćen pomoću krutih nosača, preko kojih se sile koje deluju na model prenose do mernih instrumenata. Složenost i ovoga tipa aerovage zavisi od zahtevane preciznosti merenja i broja komponenata koje se žele da mere.

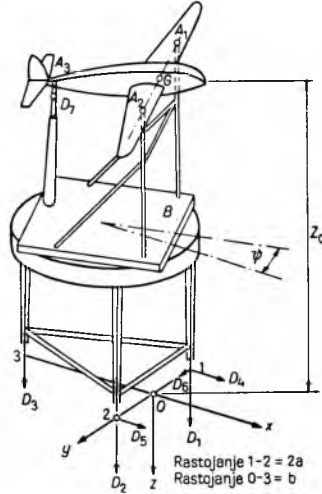
Najčešći je slučaj da se model postavlja u radni deo aerotunela preko tri profilisane noge. Zadnja noga svojim pomeranjem

omogućuje promenu napadnog ugla modela. Veza modela i profilisanih nogu mora biti zglobna, kako bi bilo moguće kretanje modela pri promeni napadnog ugla.

Aerodinamičke sile i momenti na modelu prenose se preko profilisanih nogu na jednu ili više poluga, radi razlaganja i pre-



Sl. 20. Kruta dvokomponentna aerovaga



Sl. 21. Kruta šestokomponentna aerovaga

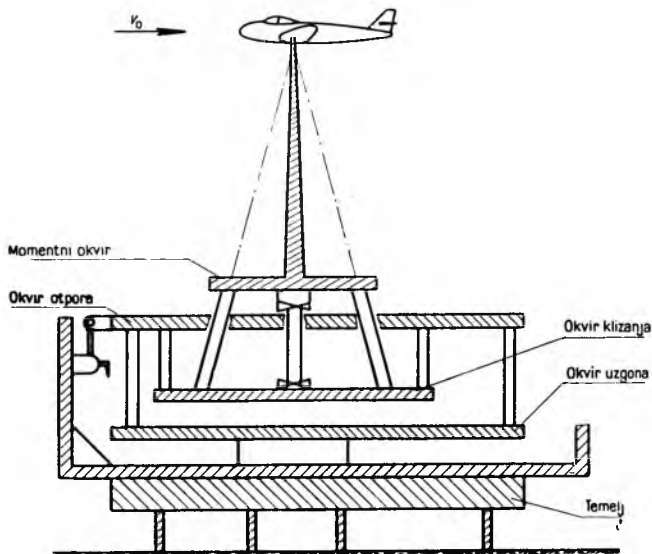
nošenja na merne instrumente. Merenjem sila na pojedinim mernim instrumentima, a znajući geometrijske karakteristike (odstojanja pojedinih tačaka) aerovage, moguće je doći do jedne, dve ili svih šest komponenata aerodinamičke sile i momenta. Na sl. 20 prikazana je jedna aerovaga starijeg tipa za merenja samo dve komponente: uzgona i otpora. Ova vaga radi na principu vraćanja modela u prvobitni položaj putem sile nastale zatezanjem opruge. Merenjem ove sile i ugla ϑ dobijaju se veličine uzgona i otpora odnosno njihove rezultante

$$R_z = R \sin \vartheta, \quad R_x = R \cos \vartheta; \quad R = FL/l.$$

Šestokomponentna aerovaga krutoga tipa primenjena u aerotunelu u Chalais-Meudon prikazana je na sl. 21.

Ovih šest komponenata su tri sile i tri momenta, i to:

$$\begin{aligned} \text{otpor:} & R_x = -(D_4 + D_5), \\ \text{klizanje:} & R_y = -D_6, \\ \text{uzgon:} & R_z = -(D_1 + D_2 + D_3), \\ \text{moment naginjanja:} & M_x = (D_1 - D_2)a, \\ \text{moment propinjanja:} & M_y = D_3 b + R_x z_0, \\ \text{moment skretanja:} & M_z = (D_5 - D_4)a. \end{aligned}$$



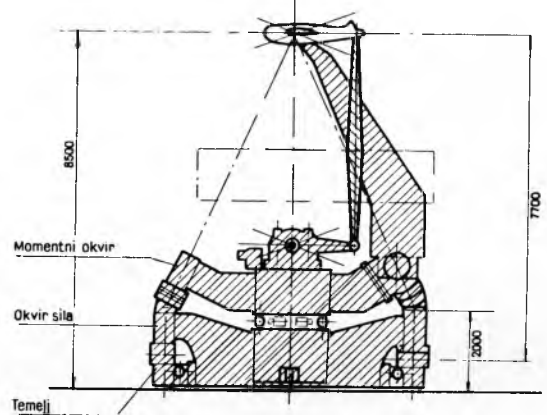
Sl. 22. Kruta aerovaga sa više nezavisnih okvira za prijem sila i momenta (aerotunel Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., USA)

Shematski prikaz aerovage krutog tipa sa više poluga dat je na sl. 22. Aerovaga je izvedena u vidu okvira postavljenih jedan iznad drugoga. Tri okvira (okviri sila) imaju svaki za sebe samo po jedan stepen slobode kretanja. Četvrti okvir (momentni okvir) je prenosnik sila i momenata od modela sa kojim je vezan preko nosača.

Čitavu težinu uređaja prima okvir uzgona i to služi kao početno opterećenje. Radom aerotunela dolazi do rasterećenja mernih instrumenata i ta razlika daje uzgon. Ovaj okvir ima mogućnost sasvim minimalnog vertikalnog pomeranja i u tom pravcu može jedino da prenosi sile. Okvir otpora je zglobno vezan za okvir uzgona preko četiri vertikalne upornice i ima mogućnost samo neznatnog pomeranja u pravcu strujanja. Treći okvir obešen je za okvir otpora i ima jedini stepen slobode kretanja u bočnom pravcu. Meri silu klizanja. Momentni okvir je vezan za ostalu konstrukciju aerovage preko univerzalnih zglobova i omogućuje da se neposredno mere momenti propinjanja i naginjanja. Sl. 23 prikazuje aerovagu za aerotunel Modane-Avrieux od 110 000 KS.

Od krutih aerovaga zahteva se da imaju što manje deformacije koje nepovoljno utiču na merenja. Ovo zahteva u aerotunelima velikih razmera i brzina konstruktivno prilično složene i glomazne aerovage.

Težnja je da se nosač modela svede na što manju površinu izloženu vazdušnoj struji i da se nosač udalji što više iza modela da svojim prisustvom ne bi kvario strujanje. Zato se u aerotunelima velikih brzina primenjuju nosači modela u vidu samo jedne upornice na koju se model natiče (sl. 24). U ovakvom nosaču, nazvanom *koplje* ili *ražanj*, mogu se postaviti elementi koji registruju

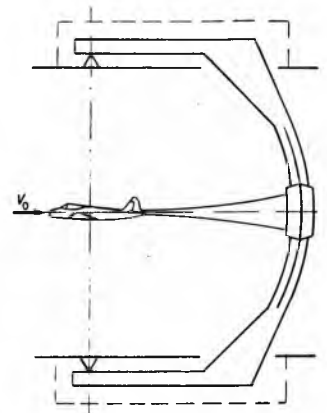


Sl. 23. Aerovaga krutoga tipa aerotunela okozvučnih brzina (Modane-Avrieux, Francuska)

sile i dalje ih električnim ili kojim drugim načinom upućuju u merne instrumente.

Krute aerovage imaju niz prednosti u odnosu na žičani tip. Kruti nosači modela izazivaju manje međudejstvo između sebe i modela, a naročito s obzirom na činjenicu da se u najvećem broju slučajeva priključenje vrši na donjaci krila prilično daleko od napadne ivice. Sopstveni otpor nosača modela je manji od minimalnog otpora savremenog aviona i obično se kreće oko vrednosti $c_x = 0,015$. Međudejstvo se manifestuje povećanjem koeficijenta otpora za oko 0,001, ali sa povećanjem napadnog ugla ova vrednost obično opada. Deformacije krutih nosača su daleko manje i manje utiču na tačnost merenja nego kod aerovaga sa žicama.

Rukovanje i postavljanje modela na aerovagu krutog tipa mnogo je prostije i brže nego na aerovagu žičanog tipa. Sa svih tih razloga najveći broj savremenih aerotunela snabdeven je aerovagama krutoga tipa.

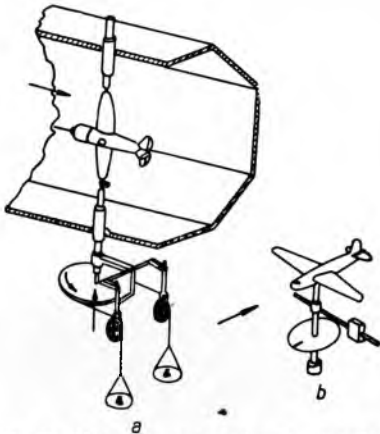


Sl. 24. Aerovaga sa nosačem modela u vidu koplja (ražnja)

Raznovrsnost izvedenih aerovaga je vrlo velika, jer se gotovo uvek radi o prototipu koji je prilagođen određenim zahtevima i dimenzijama aerotunela.

Vetrenica. Merenja sa dosada opisanim aerovagama odnosila su se na jednu određenu repenu tačku (težište modela ili aviona), tj. bila su izvršena za jednu centražu. Prevođenje momenata na drugu centražu vrši se računskim putem. Postoji međutim način za neposredno merenje momenta oko težišta za različite centraže. To se vrši pomoću tzv. *vetrenice* (žiruete).

Vetrenice su u stvari jednokomponentne aerovage za merenje određenog momenta. Princip rada vetrenice se sastoji u tome



Sl. 25. Vetrenice. a vetrenica za merenje momenta propinjanja, b vetrenica za merenje skretnog momenta

što je model tako postavljen da može slobodno da se okreće oko jedne od tri ose dijedra brzine. Uravnotežavanjem momenta od aerodinamičkih sila, pomoću tegova ili pločica poznatog otpora izloženih vazdušnoj struji, dobijaju se elementi za neposredno merenje momenta oko te ose. Vetrenica za merenje momenta propinjanja pomoću tegova prikazana je na sl. 25a. Primena pločice poznatog otpora za merenje momenta skretanja putem vetrenice prikazana je na sl. 25b.

Instrumenti za merenje sile. Uređaji za neposredno merenje i registrovanje sile mogu biti veoma različiti, počev od jedne uglovne skale na Eiffelovoj aerovagi za merenje otpora, pa preko opruga, tegova do najsavremenijih optičkih i elektronskih dinamometara i pisaača.

Automatska aerovaga sa tegovima je tip uređaja za merenje pri kojem se sila prenosi na jedan kraj poluge aerovage prethodno uravnotežene tegom. Drugi kraj poluge, na kome se nalazi teg za uravnoteženje, izrađen je u vidu zavojnice po kojoj teg može da se kreće pri njenom okretanju. Ova poluga je vezana za elektromotor (*selzin-primač*). Na poluzi se nalaze dva električna kontakta koja nisu u dodiru kada je poluga u ravnoteži. Svaki od ova dva kontakta vezan je za po jedan elektromotor (*selzin-davač*), koji su u električnoj vezi sa motorom primačem na poluzi. Kada sila počne da deluje, poluga se izvodi iz ravnoteže i jedan od kontakata se spaja. Usled toga motor-davač počinje da radi i prenosi svoje okretanje na motor-primač. Ovaj pokreće zavojnicu i teg klizi po poluzi do uspostavljanja ravnoteže, kada se kontakt prekida i motor prestaje da radi. Registrovanje kretanja tega vrši se obično električnim putem, i to najčešće daljinskim obrtomerom, čiji se broj obrtaja otkucava na traci. Određujući broj obrtaja zavojnice, a znajući njen hod, izračunava se pomeranje tega od jednog do drugog ravnotežnog položaja. Iz pomeranja tega i njegove težine lako se određuje sila koja je delovala na aerovagu.

Električni dinamometri rade sa promenljivim kapacitetom ili promenom indukcije. U *kapacitativnom dinamometru* sila koja se meri minimalno deformiše elastičnu lamelu i time proizvodi promenu kapaciteta jednog električnog kondenzatora kojemu je ta lamela jedna od obloga. Merenjem promene kapaciteta kondenzatora određuje se sila koja deluje na lamelu. *Indukcioni električni dinamometar* zasniva svoj rad na promeni indukcije magnetnog kola koja nastaje promenom međuprostora u kolu usled dejstva sile na jednu lamelu. Merenjem promene indukcije određuje se veličina sile koja je delovala.

Piezo-kvarcni dinamometar koristi se osobinom kristala piezokvarca da pod pritiskom menja svoj električni naboj. Kristali piezokvarca postavljaju se između obloga kondenzatora i izlažu se dejstvu sile koja se meri. Usled pritiska pojavljuje se među stranama kristala električni napon koji je proporcionalan ovom pritisku. Ovo se dalje prenosi na elektrometrijsku lampu i preko pojačivača na oscilograf, gde se pomoću fotokamere ili na neki drugi način vrši registrovanje.

Dinamometar sa mernim trakama je danas najrasprostranjeniji instrument za merenje aerodinamičkih sila. Merna traka (otporna žica debljine ~ 20 mikrona) lepi se na lamelu koja prima sile.



Sl. 26. Strujanje oko klina sa pojavom udarnih talasa pri opitu u nadzvučnom aerotunelu

Deformacija lamele nastala pod dejstvom sile prenosi se na mernu traku u kojoj dolazi do promene električnog otpora. Ova promena otpora u mernoj traci srazmerna sili očitava se na nekom električnom pokazivaču (galvanometru, oscilografu i sl.) ili registruje nekim elektropisačem (grafispot i sl.). Preciznost u radu ovakvih dinamometara je reda veličine 1%. Granica registrovanja pomoću mernih traka je definisana deformacijama koje trpi metal pri opterećenju između $0,110 \text{ kp/mm}^2$ i 110 kp/mm^2 .

Svetlosni dinamometri rade na principu minimalne deformacije metalne lamele koja prima silu, a koja nosi na sebi malo ogledalo. Svetlosni zrak iz nepokretnog svetlosnog izvora odbija se od ovoga ogledala i pada na ekran ili foto-papir gde se očitava ili registruje. Svaka promena deformacije lamele koja dolazi od opterećenja prenosi se na ovaj način do registratora. Prethodnim baždarenjem lako se određuju sile koje su delovale na dinamometar.

Optički metodi. U nadzvučnim aerotunelima za posmatranja strujanja i snimanja pojava primenjuju se razni optički metodi i uređaji: metod senke, metod interferencije, šliren-uređaj i sl. Rad ovih uređaja zasniva se na promeni indeksa prelamanja svetlosti pri prolasku kroz sredine različitih gustina. Udarni talasi postaju vidljivi usled promene gustine vazduha u ovim i promene indeksa prelamanja svetlosti pri prolazu kroz njih (sl. 26 i 27).

Težnja je da se merenja u aerotunelima automatizuju, kako bi se izbegle moguće greške eksperimentatora. U savremenim aerotunelima najveći broj uređaja i instrumentata zasniva svoj rad na primenjenoj elektronic.

LIT.: A. Pope, Wind-tunnel testing, London 1947. — P. Rebuffet, Aérodynamique expérimentale, Paris 1950. — P. Пэнхерст и Д. Холдер, Техника эксперимента в аэродинамических трубах, Москва 1955. — В. Јовановић, Аэродинамика испитивања, Техника 1959/9. Br. J.

AKCELERATORI NUKLEARNIH ČESTICA, uređaji koji s pomoću električnih polja ubrzavaju pozitivno ili negativno nabijene nuklearne čestice do vrlo velikih brzina i njima pripadnih kinetičkih energija. Nuklearne čestice postaju time, na kraju procesa ubrzavanja, vrlo prodorni projektili, koji udarajući o atome pripremljenih «meta» izazivaju nuklearne reakcije ili intenzivno rendgensko ili gama zračenje. Područja primjene akceleratora su osnovna istraživanja u nuklearnoj fizici, terapija u medicini, istraživanje materijala u industriji i, donekle, proizvodnja radioaktivnih izotopa.

Betatroni i elektrostatski generatori upotrebljavaju se u medicini za dubinsku terapiju oboljelog tkiva, a u industriji se njima ispituje homogenost materijala, kvalitet varnih šavova i slično. Ciklotronima i linearnim akceleratorima iona proizvode se oni radioaktivni izotopi koji se ne mogu dobiti u reaktoru. Ipak, glavno je područje primjene akceleratora u fundamentalnim istraživanjima nuklearne fizike. S pomoću njih se istražuje struktura atomskih jezgara, svojstva tih jezgara i svojstva njihovih frag-



Sl. 27. Snimak udarnog talasa pomoću šliren-uređaja u nadzvučnom aerotunelu