

Koanda efekat i njegova primena u klimatizaciji

A. Saljnikov*

Da bi se bolje shvatila suština Koanda efekta i prikazala njegova, već postojeća, praktična primena u tehnici, biće dat pregled nekih bitnijih istraživanja i stečenih saznanja na ovom polju i to hronološkim redosledom.

Ono što je danas poznato pod nazivom Koanda efekat je, pre svega, zanimljiva pojava, koja se i u svakodnevnom životu može lako uočiti. Na primer, ako se prst stavi neposredno pored mlaza vode, koji teče iz slavine, onda, kao što se vidi na sl. 1, mlaz prijanja uz prst i skreće sa prvobitnog pravca. Ovo i druga slična zapažanja je izneo Young još 1800. godine [1], izražavajući pretpostavku da je bočni pritisak koji prinuđuje plamen sveće na skretanje u pravcu struje vazduha iz duvaljke, verovatno istovetan po svojoj prirodi sa uzrokom koji dovodi do savijanja struje vazduha oko prepreke. Ako se uoči jamica, koju tanak mlaz vazduha pravi na površini vode i ako se neko konveksno telo približi mlazu, onda se na osnovu pomeranja jamice odmah zaključuje da je mlaz skrenuo prema telu, odnosno da je slobodno telo skrenulo prema mlazu. Na osnovu ovih vizuelnih zapažanja je još u doba Younga postavljeno pitanje o uzroku primećenih pojava.

Naime, da li je to površinski napon, kao što je obično smatrano, ili nešto drugo? U ono vreme, međutim, nije bilo nimalo jednostavno dati odgovor na ovo pitanje. Tek posle više od 100 godina od Youngovih prvih zapažanja, tačnije 1910. godine [2], mladom rumunskom inženjeru po imenu H. M. Coanda je pošlo za rukom da unese nešto više svetla u ovu pojavu, zahvaljujući udesu do koga je došlo prilikom ispitivanja njegove nove letelice. On je, inače, bio učenik A. G. Eiffela, projektanta čuvene pariske kule i jednog od pionira aerodinamike na Ecole Supérieure Aeronautique u Parizu. Pristup mladog inženjera projektovanju letelica bio je smeo i maštovit. Letelica, koju je on konstruisao bila je neka vrsta mlaznog aviona.

Ne ulazeći u detalje, koji za rešavanje praktičnih problema nisu od interesa, bitno je istaći da je u toku svog projektantskog rada Koanda želeo da ukloni mogućnost da plamenovi iz oba mlazna motora zapale avionske spojeve izrađene od konoplje. U tom cilju je predvideo metalne štitnike koji će skrenuti plamenove na izlasku iz mlaznika na drugu stranu. Na početku probnog leta, koji je trebalo da se izvrši na jednom polju u blizini Pariza, naime

još pri rulanju, obuzeo ga je strah kad je primetio da štitnici, predviđeni za skretanje izlaznih plamenova utiču na njih tako, da se ovi lepe za telo aviona. Zbunjen i zaoкупljen ovom pojavom, nije primetio, krećući se velikom brzinom, da se približava gradskom zidu. U poslednjem trenutku je naglo povukao komandu za visinu prema sebi i, postigavši dovoljan uzgon da preleti zid, odmah posle toga pao i slupao letelicu.

Interesantno je napomenuti da je ovo bio, koliko je poznato, prvi let jednog mlaznog aviona. Razmišljajući kasnije o ovom događaju, Koanda je, međutim bio manje zainteresovan za uklanjanje te pojave, a više za čudan i u ono vreme, neobjašnjiv fenomen na prvi pogled nelogičnog savijanja struje oko postavljenih štitnika. O ovoj pojavi on je, prvom prilikom, raspravljao sa poznatim naučnikom u oblasti aerodinamike T. von Karmanom, ondašnjim profesorom na Univerzitetu u Getingen-u, koji je shvatio da se ovde radi o jednom interesantnom efektu, koga je nazvao Koandinim imenom.

Više od 25 godina je prošlo od tog vremena, a da se nijedan istraživač nije ozbiljnije zainteresovao za Koanda efekat [2]. Sam Koanda je u međuvremenu postao

* Aleksandar Saljnikov, dipl. ing.,
Mašinski fakultet, Beograd, 27. marta 80

glavni inženjer u Bristol Aeroplane Company (Engleska), uključivši se u tehnička istraživanja koja nisu imala nikakve veze sa tom pojavom. U svom slobodnom vremenu, međutim, on je i dalje vršio eksperimente u cilju rasvetljavanja osnovnih uzroka koji dovode do ove pojave, kao i ispitivanja mogućnosti njene primene. Između ostalog on je razmatrao mlaz nekog fluida (gasa ili tečnosti) koji ističe kroz prorez (sl. 2).

Kao i u slučaju sipanja vode iz čaše, slojeviti mlaz prijanja uz krivu površinu i prati oblik konture. Ispitujući ovaj slučaj, Koanda je pronašao da se pogodnom konstrukcijom spoljašnjeg ispušćenog dela posmatranog rezervoara (sl. 2), naime dajući joj poligonalan oblik sastavljen od više kratkih segmenata, pri čemu svaki pod nekim određenim uglom u odnosu na prethodni, može postići lučno skretanje mlaza i to preko 180° . Štaviše, radeći sa vazduhom, koji je izduvavan kroz prorez, otkrio je da skrenuta struja povlači sa sobom vazduh iz okoline. Naime, mlaz, pri svom obilasku oko ispušćenog dela povlači količinu vazduha koja znatno prevazilazi zapreminu početne struje. Koanda je pri tome merio pritisak vazduha u nekoliko tačaka posmatrane površine, preko koje je strujao vazduh, i ustanovio značajnu činjenicu da je pritisak na toj površini manji od atmosferskog, zbog čega se fluid lepi za zid, a relativni vakuum u blizini otvora ubrzava isticanje mlaza.

Na osnovu svojih istraživanja, Koanda je došao do zaključka da bi razmatrani efekat mogao dovesti i do podizanja i pokretanja letelice u rezultatu procesa suprotnog od onog koji dejstvuje kod uobičajenog propulzionog sistema. Naime, ovim efektom bi bila stvorena oblast nižeg pritiska iznad tela, a višeg ispod njega. Prema tome, kao bismo postigli da uzgonska sila bude veća od težine letelice, ona bi se podigla bez zaletanja aviona, samo u rezultatu pomenu-tog duvanja vazduha oko tela. Kako je ovaj predlog bio u tolikoj suprotnosti sa uobičajenim saznanjima o strujanju fluida oko pokretnih tela, to je razumljivo što je izazvao skepsu među aerodinamičarima,

Koanda je, međutim, i pored nedostatka interesovanja za njegove ideje, nastavio sa konstruisanjem različitih letelica pokretanih na način koji smo prikazali, oblika sličnog letećim tanjirima.

Koanda efekat je mogao biti odbačen kao ekscentrična zamisao, da nije, na sreću, privukao pažnju radne grupe iz Allied Scientists, koja je bila određena da ispituje naučna istraživanja u nacističkoj Nemačkoj, posle oslobođenja Pariza, za vreme II svetskog rata. [2]. Pri tome je ustanovljeno da su Nemci uključili Koandine ideje u svoja mlazno-propulziona istraživanja. Ispitavši Koandine pronalaskeske, grupa iz AllSc. je došla do zaključka da Koanda efekat zaslu-žuje nastavak ozbiljnih istraživanja. Međutim, i pored toga što su teoretske analize von Karmana 1949. godine i eksperimenti na Cornel Aeron. Labor. potvrdili Koandu, mnogi drugi istraživači su bili suprotnog mišljenja, tj. da njegove postavke ne mogu biti potvrđene, što je za izvesno vreme zaustavilo istraživanja povezana sa ovom pojavom.

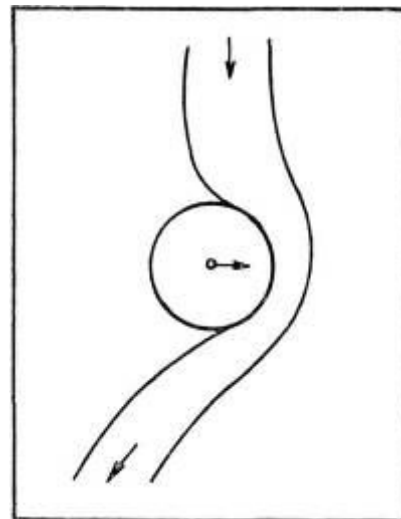
Međutim, to nije smetalo teoretičarima da, u međuvremenu, daju svoju interpretaciju ove pojave. Tako, na primer, poznati sovjetski naučnik L. G. Lojczanski, u svojoj knjizi [3], u paragrafu koji govori o laminarnom graničnom sloju nestišljivog fluida i o odvajanju tog sloja, daje objašnjenje Koanda efekta s aspekta teorije graničnog sloja. Njegova interpretacija ove pojave se zasniva na poznatoj činjenici da pri konstantnom pritisku duž graničnog sloja, ne može doći do njegovog odvajanja. Ovaj uslov nepromenljivosti pritiska se javlja i pri opticanju tela slojem tečnosti tankim s obzirom na dimenzije tela. Naime, kako je spoljna granica takve struje u datom slučaju slobodna površina, na kojoj je pritisak konstantan, takav sloj se ne odvajava od površine tela već se tanka struja »lepi« za njegovu površinu duž koje se dalje kreće.

Sredinom ovog veka počinje ponovo da raste interes za dubljim rasvetljavanjem ove pojave i za njenim korišćenjem u praktične svrhe. Ovo je izraženo osetnim porastom broja objavljenih,

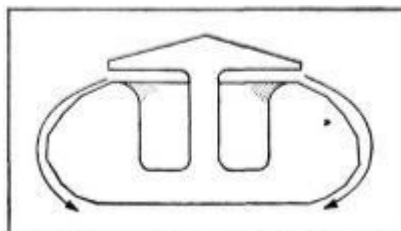
većinom eksperimentalnih, radova u ovoj oblasti.

Kao logična posledica ovoga, održan je 1965. godine u Berlinu naučni skup, prvi European Mechanics Colloquium, posvećen ovoj pojavi, odnosno graničnom sloju i strujama na jako zakrivljenim zidovima. U izveštaju sa tog simpozijuma [1], zaključuje se između ostalog da je Koanda

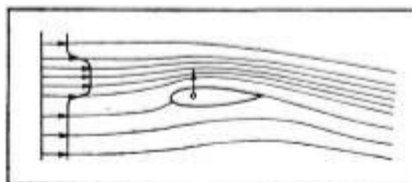
Sl. 1.



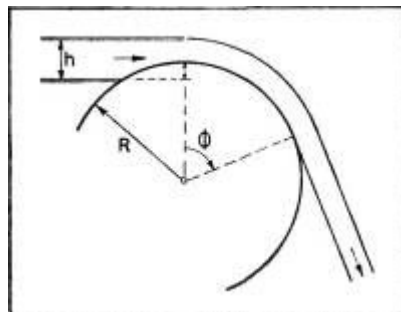
Sl. 2.



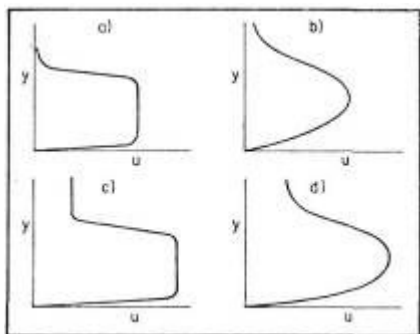
Sl. 3.



Sl. 4.



Sl. 5.



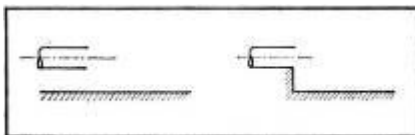
efekat jedna od manifestacija pojave opštijeg karaktera, koja dolazi do izražaja na telu postavljenom u nejednoliko strujanje. Tipičan primer ovakvog opstrujavanja predstavljen je na sl. 3, gde telo ima oblik debljeg nesimetričnog aeroprofila, na koji, kao što je poznato, deluje sila uzgona li to prema oblasti veće brzine odnosno smanjenog pritiska. U stvari, ovo je posledica simultanog dejstva dva bitna efekta. Prvi je prouzrokovao zakrivljenjem mlaza usled krivine konveksnog tela, što se može lako objasniti klasičnom potencijalnom teorijom. Drugi efekat je tesno povezan sa uvlačenjem okolnog fluida u struju koje nastupa usled intenzivnog turbulentnog mešanja. Međutim, ovaj indukovani tok koji stvara dopunsku silu na telo u istom pravcu, predstavlja efekat koji zahteva, pri njegovom razjašnjavanju, uzimanje u obzir viskoznosti.

Na ovom simpozijumu je posebno razmatran i slučaj, prikazan na sl. 4, prijanjanja struje za zakrivljeni zid, na kome linija odvajanja nije unapred fiksirana. Ovaj slučaj je od praktičnog značaja zbog mogućnosti postizanja što većeg ugla zaokretanja mlaza. Odgovarajući potencijalno-strujni deo problema odnosi se na mlaz ograničen slobodnom površinom sa jedne strane i čvrstim zidom s druge strane. Zbog nepostojanja spoljašnjeg strujanja, pritisak u ovom slučaju mora da se održava konstantnim duž slobodne granice, sve do linije odvajanja, pri čemu mora da bude po svojoj vrednosti više od raspodele pritiska duž zida. S druge strane, pošto je poznato da pritisak kod tačke odvajanja kao i nizvodno od nje, a na unutrašnjoj slobodnoj površini, mora ponovo da

bude jednak pritisku u neometanoj struji, sleduje da raspodela pritiska duž zida mora imati gradijent usmeren od tačke najmanjeg pritiska ka tački odvajanja. Sledeći deo problema koji se odnosi na razvrtak graničnog sloja duž zida, pruža mogućnost određivanja tačke odvajanja i izbora partikularnog rešenja problema potencijalnog strujanja, koje u ovom slučaju nije jednoznačno.

Treba, međutim, istaći da se ovi »granični slojevi« unekoliko razlikuju od klasičnog graničnog sloja duž ravnog zida, kao što se može zaključiti iz oblika brzinskih profila prikazanih na sl. 5. Naime, za slučaj mlaza debelog u odnosu na poluprečnik krivine zida, stvara se uobičajeni granični podsloj sa slobodnim nepomešanim slojem iznad njega (slučajevi a i c), za razliku od tankog mlaza kod koga je drugačija raspodela brzina (slučajevi b i d). Samo u slučajevima označenim sa a) i c) može se očekivati da je polje pritiska ono koje je definisano teorijom potencijalnog strujanja i da će partikularno rešenje biti određeno posredstvom graničnog sloja. Slučajevi označeni sa b) i d), međutim, odgovaraju osnovnim strujanjima koja su po svojoj prirodi vrtložna. Stoga će se polje

Sl. 6.



pritiska čak i pri neviskoznom vrtložnom zakrivljenom strujanju razlikovati od onoga pri odgovarajućem nevrtložnom zakrivljenom strujanju. Ovim se može objasniti zašto postojeće teorijske metode nisu dovoljno upotrebljive za rešavanje praktičnih problema kao i zašto se eksperimentalni podaci moraju koristiti strogo u određenim granicama. Granični slojevi van proreza iz koga mlaz izlazi, kao i u prisustvu stepenika ili šupljine između mlaza i zida (vidi sl. 6) predstavljaju, sa teorijske tačke gledišta, još složenije slučajeve. Osim toga, čak i u prikazanim slučajevima a) i c) mogući efekti zakrivljenosti zida, [1] mogu obezvređiti uobičajenu

pretpostavku u teoriji graničnog sloja prema kojoj je $p = \text{const}$ u poprečnom preseku graničnog sloja. Na kraju ovih razmatranja se zaključuje da predstoji još dug put do dobijanja kompletnog postupka za teorijsko razmatranje ovakvih strujanja. Naime, teškoće sa kojima se ovde istraživači susreću uglavnom su iste prirode kao i u drugim oblastima teorijske i primenjene mehanike fluida. A to su, pre svega, problem viskoznih strujanja i posebno njihovih odvajanja od čvrstog zida u slučajevima kada ne važe pretpostavke klasične teorije graničnog sloja i zatim problem turbulencije u posmatranim strujanjima.

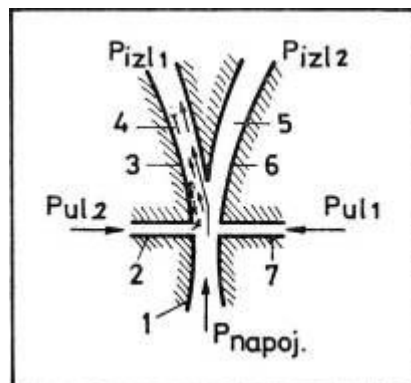
Interesantno je napomenuti da su izlaganja na ovom skupu bila podeljena u nekoliko oblasti i da su se nizala sledećim redom:

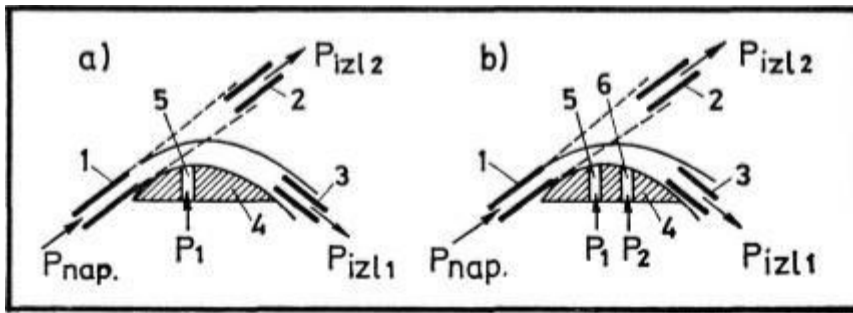
- neviskozno strujanje duž zida,
- dvodimenzijски granični slojevi na zakrivljenim zidovima,
- teorijska istraživanja mlazeva duž zida u mirnom vazduhu i posebno u struji vazduha koji se kreće itd.

Na kraju izveštaja [1] dat je veliki spisak literature, od oko 120 radova, koji s jedne strane ubedljivo govori o intenzitetu istraživanja u navedenim oblastima, a koji, s druge strane, može korisno da posluži kao temeljna teorijsko-eksperimentalna priprema svakome ko misli da se dublje pozabavi ovim problemima.

Treba istaći da je na ovom skupu posebna pažnja posvećena i eksperimentalnim istraživanjima koja se odnose na skretanje mlaza na zakrivljenim zidovima. Između ostalih, proučavani su razni uslovi pri kojima je postignut Koanda efekat. Naime, u ovim

Sl. 7.





ogledima menjan je oblik zidova, brzina mlaza, pritisak u fluidu itd., da bi se uočilo šta najviše utiče na ovu pojavu. Pri tome je posebna pažnja obraćena odvajanju mlaza posle njegovog lepljenja na zid. Izvučen je dosta optimistički zaključak da je, u svim ovim oblastima, pokazan vidan napredak, ali da se još ne vidi, kako i na koji način je moguće da se dobije kompletno teorijsko-računsko rešenje ovih problema. Dalje se konstatuje da je neslaganje teorijskih rešenja sa eksperimentalnim rezultatima, odnosno njihovo slaganje, ali samo u određenim granicama, posledica ili nedovoljno tačnih početnih pretpostavki, ili činjenica da prilikom laboratorijskih ispitivanja svi bitni uticaji nisu uzeti u obzir.

Izveštaj [1] se završava navođenjem mnogostruke praktične primene Koanda efekta, kao na primer u avijaciji, za povećanje vučne sile i promenu pravca, a isto tako i pri hlađenju kružnih cilindara mlazom umesto jednolikom strujom vazduha, čime se ubrzava prenos toplote.

S obzirom na temu ovog rada, posebno je interesantna primena ovog efekta u automatici, odnosno u takozvanim fluidičkim sistemima, kao i kod garionika. Naime, kod ovih problema se javljaju određeni slučajevi, čije razmatranje i način rešavanja podstiču razmišljanja i formiranje izvesnih ideja o tome da se dobijeni rezultati uz određenu modifikaciju transponuju na analogno razmatranje i rešavanje problema u klimatizacijskoj tehnici i na poboljšanje odgovarajućih postojećih uređaja. Naime, na osnovu izveštaja [1] i druge literature, kojom se raspolagalo, stekao se utisak, da su baš u toj oblasti tehničke primene, Koanda efekat i

sve njegove, zasad poznate prednosti nedovoljno iskorišćene.

U takva istraživanja spadaju dva rada koja su izložena na pomenutom skupu, a odnose se na primenu Koanda efekta u fluidičko-logičkim sistemima. Osnovni princip se naime zasniva na činjenici da mlaz koji se uvodi u jedan divergentan kanal može da se prilepi za jedan ili drugi zid kanala, pri čemu se kontrolisanje toga može postići malim pomoćnim strujama koje dolaze iz bočnih otvora u svakom od zidova i ko je deluju kao signali.

Za bliži opis ovih, takozvanih bistabilnih elemenata korišćenje prikaz i odgovarajuća slika (vidi sl. 7) iz knjige [4] i to na primeru pojačavača. U kanal 1 se dovodi vazduh pod pritiskom p , radi pojačanja signala koji dolaze kroz kanale 2. ili 7. U zavisnosti od toga koji je kanal (2. ili 7) aktiviran, dovedeni mlaz se lepi za odgovarajuću površinu i usmerava u određeni kanal, čime se dobija pojačan signal u kanalu 4 (ako je uključen kanal 7) i u kanalu 5. (ako je uključen kanal 2).

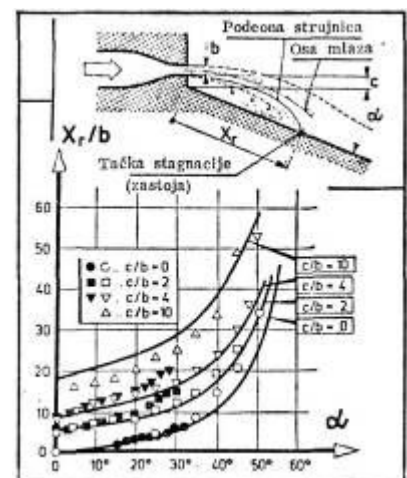
Iz pomenutih razloga eventualne analogije sa klima-tehničkim elementima, korisno je da se spomene i primena Koanda efekta u oblasti fluidičkih elemenata pri realizaciji logičkih funkcija »DA«, »NE«, »I«, i »ILI« na strujnim relejima (v. sl. 8). Naime, na prvoj skici se u zavisnosti od dodatnog pritiska fluid lepi (signal »DA«) ili ne lepi (signal »NE«) za krivinu zida, dok na drugoj skici, već prema tome kako se namesti reakcija elementa, dobija se logička funkcija »I« ili »ILI«, odnosno njihove negacije zavisno od vrednosti ulaznih signala, datih pritiscima P_1 i P_2 .

Ovom problemu je posvećena pažnja i u radu [5] u kome su prikazani rezultati odgovarajućih

eksperimenata (vidi sl. 9). Naime data je zavisnost dužine zone ponovljenog strujanja (X_r) od ugla nagiba zida (α) i rastojanja (c) na povratnom zidu. Uočeno je da u slučajevima, gde je potrebno da uglovi skretanja budu veći od 45° odgovarajuća konfiguracija pravog zida, predviđenog za lepljenje mlaza, vodi ka veoma dugoj zoni ponovljenog strujanja i lepljenje nije dovoljno stabilno. Sam Koanda je doskočio ovom problemu [5], tako što je formirao zid od određenog broja pravih, postepeno sve više i više nagnutih segmenata, gde je na svakom preгибу formirana nova zona ponovljenog strujanja. Međutim, kasnije je otkriveno da je slično kretanje, sa znatnim uglom, moguće dobiti jednostavnijom geometrijom i uz manje gubitke, ako je zid po dužini kontinualno zakrivljen (v. sl. 10). U tom slučaju mlaz prati njegovu konturu ne stvarajući pri tome bilo kakve posebne zone. Autor rada [5] je u svojim ranijim istraživanjima detaljno proučavao problem vođenja mlaza po zakrivljenom zidu, s mogućnošću primene dobijenih rezultata u fluidici, naime u pojačavačima sa odvajanjem mlaza na jednoj strani, odnosno naročito kod fluidičkih ulaznih elemenata na drugoj.

S obzirom na praktičnu primenu u klima-tehnici od posebnog su interesa elementi koji stvaraju fluidički signal posredstvom ulaznog mehaničkog kretanja zasnovanog na principu tzv. »vođenog mlaza« (v. sl. 11). U ovom slučaju, naime, mlaz se lepi na spoljnu stranu vodećeg jezika

Sl. 9.



— analogno zidu sa promenljivo krivinom.

Ako se za trenutak to transponuje na srodne probleme klimatike i pokrene mašta, počće da se ukazuju analogna rešenja za te probleme. Na primer, za optimalno uvođenje hladnog ili toplog vazduha odnosno njihove mešavine u prostoriju, za regulaciju tog dovoda. Prema tome bi se, na ovaj način, mogla u postojeće klimatizacijske konstrukcije uneti, po analogiji sa postojećim rešenjima iz drugih oblasti tehnike, izvesna poboljšanja.

Izlaganje o tehničkoj primeni Koanda efekta treba dopuniti zanimljivom konstatacijom preuzetom iz [6], prema kojoj su analitičke metode ispitivanja i proračuna Koanda elemenata nedovoljno razvijene, a eksperimentalne metode, na uvećanim modelima različite konfiguracije, vezane za primenu teorije hidro-dinamičke sličnosti, zasad u većoj upotrebi. Treba napomenuti da se trenutno najviše koriste sledeće eksperimentalne metode:

— klasična, sa svim odgovarajućim mernim uređajima i načinom merenja brzine zasnovanom na korišćenju Pitot-Prandtlove sonde,

— savremena, u našim uslovi ma zasad vodeća metoda, zasnovana na korišćenju anemometra sa usijanim vlaknom, i

— najnovija, još nedovoljno adaptirana za praktičnu upotrebu i veoma skupa, ali već izvesno najefikasnija metoda zasnovana na primeni laserskih zraka.

U prilog opštem utisku o sve široj primeni Koanda efekta u različitim oblastima strujne tehnike, govori i podatak preuzet iz [6] da se Koanda elementi koriste i u razvođenju naftinih derivata i drugih tečnosti. Prednost primene Koanda efekta da su svi ti regulacioni elementi po konstrukciji kompaktni i bez pokretnih delova tj. da su sigurniji u pogonu — dolazi do izražaja i u ovom slučaju.

Zanimljivo je spomenuti još jedan vid primene Koanda efekta u tehnici. Naime, mlaznice zasnovane u tom efektu [2], izvanredno su efikasne komponente gorionika. Ako su pravilno konstruisane,

proizvode skoro nevidljivi plamen bez dima i sa skoro potpunim sagorevanjem goriva. Providni deo, kao što se vidi na pomenutoj slici predstavlja cilindrični zaklon za pojačanje Koanda efekta. Najbitniji deo, međutim, koji ostvaruje taj efekat je konično-šiljatog oblika. Zahvaljujući njemu plamen je dobro koncentrisan i usmeren, tako da se postiže mimo i potpuno sagorevanje. Pri tome znatan deo vazduha potiče iz bočnog uvlačenja prouzrokovanog Koanda efektom.

Od interesa je da se navede i pronalazak C Pavlina [1], zasnovan na primeni Koanda efekta u veštačkom respiratoru (v. sl. 12). Njegove prednosti sastoje se u tome što ne sadrži pokretne delove i što se u njemu ostvaruju, kao što je pokazano na slici, obe faze: udisanje i izdisanje. Na osnovu promene pritiska u pacijentovim plućima automatski se reguliše dovod kiseonika. U ovom procesu bitnu ulogu igra tanka cevčica, postavljena tako da kretanje vazduha u njoj reguliše promenu pravca osnovnog mlaza. Ovo se periodički ponavlja i aparat radi kao što je i zamišljeno. Za praktičnu primenu u klima-tehnici od posebnog interesa su eksperimentalni rezultati [7]. Ovde se, naime, vrši ispitivanje dovoda vazduha kroz otvor u prostoriju i mogućnost njegovog lepljenja za tavanicu, što je za probleme u klimatizaciji od posebnog značaja, jer se time poboljšava ventilacija, odnosno samo klimatizacija.

Za slučaj prikazan na sl. 13, kada je otvor za dovod vazduha smešten u bočnom zidu na izvesnom odstojanju od tavanice, najpre se formira slobodni mlaz koji zatim povlači sa strane još izvesnu količinu vazduha. Dok je odozdo, gde mlaz nije ograničen, to moguće, dotle se odozgo, sa strane tavanice, zbog ograničene količine vazduha koju mlaz može da povuče, formira zona potpritiska, koja uslovljava lepljenje mlaza za tavanicu. Ustanovljeno je da se Koanda efekt može očekivati samo onda ako između ulaznog mlaza i tavanice nema dovoljno prostora za formiranje makro-vrtloga, potrebne veličine, koji bi sprečio povlačenje vazduha od strane mlaza.

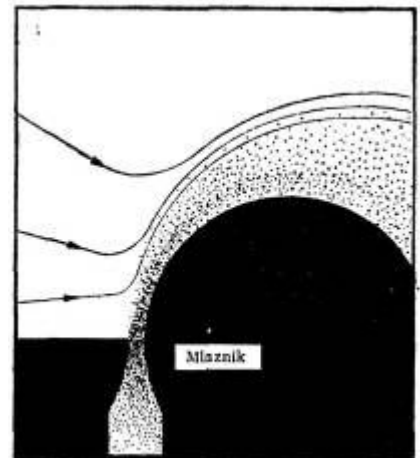
Eksperimenti su vršeni sa vazduhom koji je radi boljeg praćenja zbivanja u strujanju pomešan sa dimom.

U prvom slučaju prikazanom na sl. 14, kada je otvor smešten neposredno uz tavanicu, koja sa zidom gradi proizvoljan ugao $\alpha < 90^\circ$, tj. nije paralelna sa osom ulazne struje, dobijeni su sledeći rezultati:

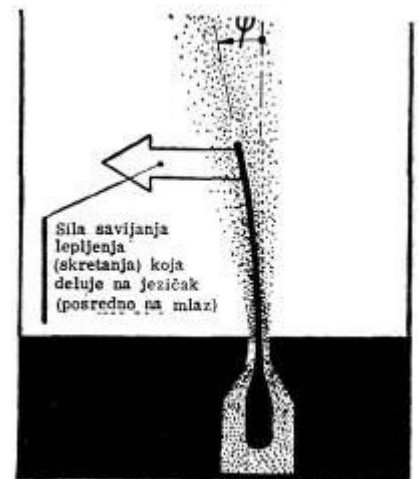
a) Neporemećena struja se do određenog kritičnog ugla α_{krit} u potpunosti lepi za tavanicu i prati je po zakonima koji važe za strujanja duž ravnih zidova.

b) Čim je ugao α malo manji od α_{krit} , odnosno kad se ugao između ose strujanja i tavanice ($90^\circ - \alpha$) sasvim malo poveća, formira se slobodan mlaz, koji međutim nije stabilan. Naime, pod dejstvom nekog spoljnog uticaja, koji ga upravlja ka tavanici, dolazi do Koanda efekta tj.

51. 10.



Sl. 11.



mlaz se lepi i struji duž tavanice. U ovom slučaju, međutim, on više ne podleže zakonima strujanja duž ravnog zida. Prema tome, u zavisnosti od uslova javljaju se sledeće dve mogućnosti:

- mlaz se lepi za tavanicu,
- mlaz je slobodan,

c) Akra je umesto tavanice postavljena pokretna ploča, onda se jednom već zalepljen mlaz može skrenuti čak i preko α_{krit} ali na ravno ne mnogo.

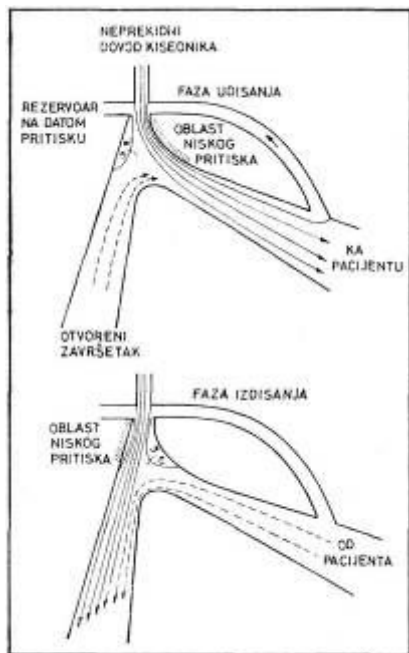
d) Pri daljem povećanju ugla koji zaklapa osa ulazne struje sa tavanicom, posmatrani mlaz se ponaša približno kao slobodan mlaz.

O veličini ugla između ose strujanja i tavanice, pri kom se izotermni mlaz još uvek lepi za tavanicu, zasad se ne može ništa uopšteno reći. Ovaj ugao zavisi najverovatnije od sledećih uticajnih faktora:

- konstrukcije, geometrijskog oblika i dimenzionisanja ulaznog otvora,
- zapreminskog protoka i izlazne brzine mlaza,
- stepena turbulencije mlaza,
- temperaturske razlike između dovedenog i unutrašnjeg vazduha,
- veličine i oblika prostorije, kao i njenog uređenja.

Za slučaj izlaznog otvora u obliku proreza vršena su ispitivanja zavisnosti ugla α_{krit} od izlazne brzine vazduha W koja se kretala

Sl. 12.



u granicama od 2,5 do 10 m/s. Pri tome je ustanovljeno da je njen uticaj značajan. Iz dijagrama na sl. 15. se vidi da je ugao α_{krit} utoliko manji odnosno skretanje je utoliko veće, što je izlazna brzina mlaza manja.

U drugom slučaju je otvor za dovod vazduha smešten u bočnom zidu, na određenom odstojanju x od tavanice, kao što je pokazano na sl. 16. Odgovarajući eksperimenti su dali sledeće rezultate:

a) U toku svog razvoja mlaz se pri izotermnim uslovima formirao kao slobodan mlaz, koji svojim sišućim dejstvom povlači vazduh iz okolnog prostora. Kasnije se, međutim, ako je odstojanje tavanice od ulaznog otvora toliko malo da dolazi do stvaranja zone potpristiska između mlaza i tavanice, mlaz priljubljuje uz nju. Treba napomenuti da se odstojanje tavanice od otvora za ulaz vazduha, pri kome se još uvek javlja Koanda efekat naziva kritičnim odstojanjem X_{krit} .

b) Zahvaljujući silama inercije, mlaz se pri ulazu u prostoriju ne može naglo prelomiti i od samog početka priljubljuje uz tavanicu. To priljubljivanje se dešava tek posle određene dužine toka.

c) U pojedinim slučajevima Koanda efekat dolazi do izražaja tek posle izvesnog vremena, pri čemu mlaz naglo napušta svoju putanju da bi se priljubio uz ravnu površinu. Ovo se dešava u sledećim slučajevima:

— kad je otvor za ulaz vazduha smešten upravo na kritičnom odstojanju od tavanice i

— kada je upravljanje mlaza prema tavanici prouzrokovano različitim uslovima u prostoriji (oblikom, uređenjem prostorije, termičkim uticajima itd.).

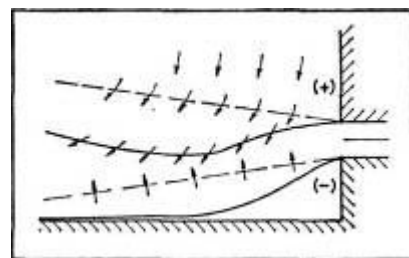
Onda međutim nisu više obezbeđeni uslovi za stabilno strujanje, tako da mlaz menja, posle dužih ili kraćih deonica, svoj pravac, odvajajući se od ravnih površina na koje je nalegao i lepeći se ponovo na druge. Navedena pojava je uzrok promeni strujne slike u čitavoj prostoriji, a samim tim mnogim smetnjama u smislu njene klimatizacije. Treba istaći da pri tzv. prodorima hladnog vazduha kroz klima-zastore, dolazi do sličnih pojava. Primećeno je da se, u slučaju neizoternog strujanja toplija struja vazduha koja se diže, lepi uz tavanicu i

pri većem odstojanju ulaznog otvora od nje, nego li hladnija struja, koja se spušta nadole.

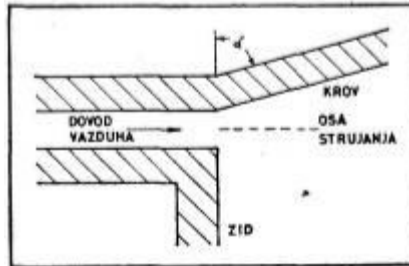
Osim toga je zapaženo da se češće događa da hladan mlaz posle lepljenja za tavanicu i strujanja duž nje kasnije ponovo odvaja iz čega zaključuje da u tom slučaju otvor nije postavljen dovoljno blizu tavanice.

Treba istaći da se o kritičnom odstojanju od tavanice X_{krit} zasad ne može ništa uopšteno reći. Nasuprot tome je ponašanje mlaza za slučaj otvora u obliku proreza na bočnom zidu proučeno znatno preciznije i to za odstojanja $X = 0,3 m$

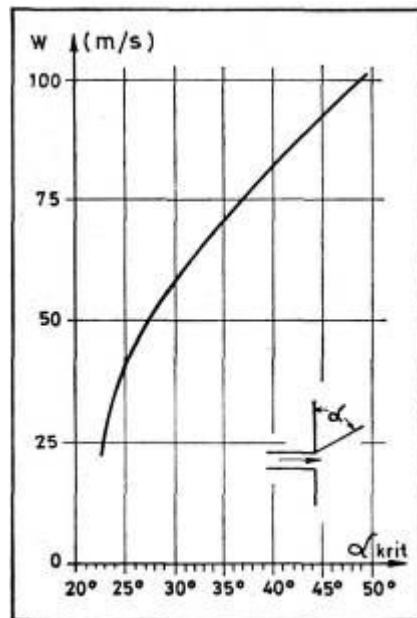
Sl. 13.



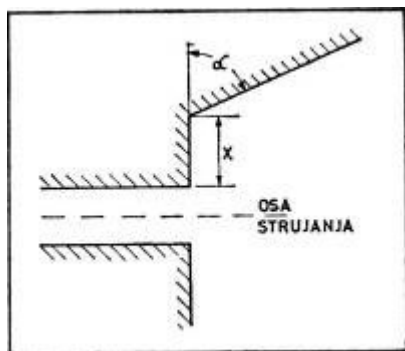
Sl. 14.



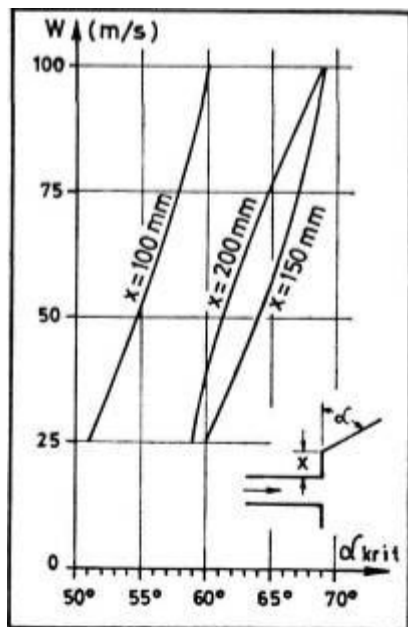
Sl. 15.



Sl. 16.



Sl. 17.



od tavanice kao i za brzine u granicama od 2,5 do 10 m/s. Pri tome je vršena promena nagibnog ugla i to a) $\alpha = 90^\circ$, b) $\alpha = 75^\circ$ i c) $\alpha = 60^\circ$, tako da je primećeno sledeće:

a) kritični ugao α_{krit} pri kome još uvek dolazi, za sva odstojanja $X < X_{krit}$, do prijanjanja mlaza uza zid, zavisi, izrazito od izlazne brzine vazduha (sl. 17);

b) najmanje odstojanje X pri kome još ne dolazi do prijanjanja i to za sve brzine u granicama od 2,5 do 10 m/s, i pri svim uglovima α , za slučaj preseka visine $\leq 0,02$ m, iznosi $X_{krit} = 0,3$ m; međutim, pili povećanju ulaznog otvora raste i ta najmanja vrednost.

Treba spomenuti i pojavu odvajanja graničnog sloja, tj. otkidanja mlaza posle strujanja duž tavanice, koja se može zapaziti kod mlazeva hladnog vazduha. Odvajanje je okarakterisano tangencijalnim naponom na zidu koji je u graničnom sloju jednak nuli, što je prouzrokovano porastom pritiska

u pravcu strujanja. Ovaj porast pritiska je, međutim, posledica smanjenja brzine mlaza usled njegovog mešanja sa okolnim fluidom i njegovog istovremenog širenja. Pokazalo se da mlaz hladnog vazduha često ne sledi uobičajene zakone odvajanja, već da to čini kontrolisano. Naime, pri tangencijalnim naponima bliskim nuli dovoljno je postojanje neznatnih smetnji, npr. malih neravnina maltera koji mogu da izazovu odvajanje mlaza.

Vredan pažnje je i rad [8] na osnovu koga se zaključuje da su i u Jugoslaviji vršena izvesna istraživanja posvećena Koanda efektu. Pri tome je bilo neophodno da se radi pojednostavljenja problema uvedu izvesne pretpostavke. Na ovaj način su dobijene geometrijske karakteristike mlaza definisanog sistemom jednačina sa izvesnim konstantama, koje je trebalo odrediti eksperimentalno. Merenja su izvršena anemometrom sa usijanim vlaknom. Istim uređajem sa ugrađenim manometrom izmerene su raspodele brzine i pritiska u strujnom polju i to kako u slučaju paralelno pomerene, tako i u slučaju nagnute ploče. Izvedeni su i određeni zaključci o zavisnosti položaja tačke priljublivanja mlaza od vrednosti R , broja i geometrijskih karakteristika otvora i ravne površine na koju mlaz prijanja. Tom prilikom je međutim napomenuto da bi ovom problemu trebalo prići egzaktnije u teorijskom i sa preciznijim merenjima u eksperimentalnom pogledu, tako da bi bilo omogućeno dobijanje tačnijih i kompleksnijih rezultata. Ovi autori [8] nisu se, koliko je poznato, više bavili ovom pojavom, pa ta interesantna i korisna istraživanja nisu nastavljena.

Iz svega do sada izloženog se zaključuje da je Koanda efekat pojava koja zaslužuje punu pažnju i da njeno razjašnjavanje u cilju što intenzivnije praktične primene zahteva dublja teorijsko-eksperimentalna istraživanja. Osim toga se iz gornjeg prikaza jasno vidi da ova pojava nalazi sve veću primenu u različitim oblastima strujne tehnike, a da je na žalost u klimatizaciji još nedovoljno iskorišćena. Ovo se ističe zbog toga, što bi se primenom Koanda efekta pri razmatranju i rešavanju savremenih klima-tehničkih problema vrlo verovatno postigla

povoljnija rešenja od postojećih u pogledu estetskog oblikovanja samih uređaja, zadovoljavanja higijenskih zahteva i racionalnije potrošnje energije. Ova istraživanja, međutim, nisu moguća bez savremeno opremljene laboratorije koja bi omogućila izvođenje odgovarajućih eksperimenata i dobijanje preciznijih rezultata. Što se tiče teorijske, odnosno analitičke obrade problema, stiže se utisak da bi se na osnovu već postojećih radova iz oblasti strujanja tankih mlazeva preko krivih površina odnosno provetrenih prostora u kojima vlada potpritisak, moglo doći do jednog opštijeg, egzaktnijeg, rešenja u okviru koga bi rešenja klima-tehničkih problema imala partikularni karakter.

Put do ostvarenja ovog cilja, koji očigledno nije lak ni jednostavan, svakako je privlačan, s obzirom na perspektivu interesantnih, svrsishodnih, teorijsko-eksperimentalnih istraživanja, a isto tako i na kasniju tehničku primenu dobijenih rezultata, koja bi vrlo verovatno doprinela poboljšanju klasičnih klimatizacionih konstrukcija.

LITERATURA

- [1] WILLE, R. & FERNHOLZ, H.: *Report on the First Euromech Colloquium on the Coanda effect*, H. Fottiger Institut, Technische Universität Berlin, Sept. 1965.
- [2] REBA, I.: *Applications of the Coanda effect*, Scientific American, Vol. 214 № 6, June 1966.
- [3] ЛОЙЦИАНСКИЙ, Л. Г.: *Механика жидкости и газа*, Наука, гл. редакция физико-математической литературы, III издание, Москва, 1970.
- [4] ИБРАГИМОВ, И. А., ФАРЗАЕ, Н. Г., ИАЯСОВ, А. В.: *Элементы и системы пневмоавтоматики*, Высшая школа, Москва, 1975.
- [5] TESAŽ, V.: *Uvod u probleme mehanike fluida koji se odnose na fluidiku*, Fluidičke komponente i sistemi, SMEITS, Beograd, 1975.
- [6] МИКИРТУМОВ, Э. А.: *Курс лекций по пневмоавтоматике*, (Газодинамический расчет элементов пневмоавтоматики) М. В. Т. У. им. Баумана, Москва 1976.
- [7] *** *Lehbuch der Klimatechnik*.
- [8] SOVILJ, R., BUKUROV, Ž., CVI JANDVIĆ, P. i STEVANOV, M.: *Eksperimentalno ispitivanje Coandinog efekta*, XII jugoslovenski kongres racionalne i primenjene mehanike.