BIBLID 0350–1426 (2006) 35:2 p. 53–56

VISOKOTURBULENTNO MEŠANJE VAZDUHA UBAČENOG KROZ SISTEM „UnoDuct“

Prethodna istraživanja širenja slobodnog mlaza bila su obično ograničena na osnosimetrične kvazidvodimenzionalne mlazeve. Višestruki mlazevi u obliku niza mlaznica, ili otvora, jedva da su bili predmet sistematskog istraživanja. U ovom članku, turbulentni proces mešanja koji nastaje u ovom slučaju, razmatra se uz pomoć numeričke dinamike fluida (CFD). Pokazalo se da smanjenje brzine i sniženje temperature kao i proces turbulentnog mešanja, zavise od razmaka između vazdušnih dovoda.

KLJUČNE REČI: vazduh; mlaz; mešanje; turbulencija; sistem „UnoDuct“

CHRISTIAN HESCHL i ANDREA KELZ,
Fachhochschulstudiengänge Burgenland, Burgenland, Nemačka

HIGHER TURBULENT MIXING DUE TO UnoDuct – AIR SUPPLY SYSTEM

Previous investigations of free jet propagation are usually limited to axialsymmetrical and gasi two-dimensional jets. Multiple jets in the form of nozzle arrays or slot inlets have hardly been subject of systematic investigation. In this article the turbulent mixing processes occuring in this case are discussed with the aid of Computational Fluid Dynamics. It is shown that velocity and temperature reduction as well as the turbulent mixing process are dependent on the distance between the air supplies.

KEY WORDS: air; jet; mixing; turbulence; UnoDuct system

Uvod

Osnovna svrha jednog sistema KGH je da obezbedi željeni kvalitet vazduha u prostoriji. Da bi se ovaj cilj ostvario, treba već u fazi planiranja odabrati i dimenzionisati odgovarajući sistem za dovod vazduha. Ako se koristi mehanička ventilacija, na raspolaganju je sistem potisne ili ventilacije sa mešanjem. U većini slučajeva bira se koncept mešanja, što znači da se vazduh dovodi velikom količinom kretanja. Da bi se zadovoljili zahtevi korisnika, dovodi vazduha treba da osiguraju brzo smanjenje brzine i sniženje temperature između ulaznog vazduha i vazduha u prostoriji. Zato se mora osigurati proces visokoturbulentnog mešanja sa vazduhom u prostoriji.

Eksperimentalna i numerička istraživanja pokazuju da na procese razmene u suštini utiču nivo turbulencije i brzina strujanja na ulazu [1, 2, 3]. Poznate su promenljive koje zavise od prostorije, kao što su geometrija prostorije, prirodna konvekcija i temperaturna slojevitost [4, 5]. Da bi se stvorili najbolji uslovi za korisnika, proizvođač ne samo što mora da optimizuje proces turbulentnog mešanja, nego i da osigura alate za izračunavanje odgovarajućeg korišćenja prostorijom uslovljenih uticaja na projektante ventilacionih sistema.

Iskusni tehničari za ventilaciju pokušavaju da koriste pojave specijalnog strujanja kao što je Koandin efekat, za poboljšanje stanja strujanja u ventilisanoj prostoriji. Koandin efekat je baziran na činjenici da vazduh ulazi na granici mlaza usled turbulentnih procesa mešanja. Ako se ne može uvesti dovoljno vazduha, npr. zbog tavanice, potpritisak raste i mlaz skreće ka tavanici. Taj efekat može biti izazvan ometanjem bočnih ulaza vazduha kroz duge ulazne otvore. Iz toga razloga, ulazne i mlazne linije se sve više koriste. Uprkos korišćenju Koandinog efekta, u slučajevima hlađenje dolazi do hladnih talasa. Ako se ovo dešava u naseljenim zonama, to može dovesti do promaje i toplotne neugodnosti. Taj neželjeni efekat je proizveden po Arhimedovom principu i zavisi od temperaturne razlike između vazduha u prostoriji i jezgra mlaza. Iz toga razloga, tehničari za ventilaciju nastoje da smanje temperaturnu razliku što je brže moguće.

U ovom članku biće analizirani parametri turbulencije na ulaznim linijama mlaza i ulaznim otvorima i razmatran njihov uticaj na brzinu i raspodelu temperature. Da bi se ostvario bilo kakav periodični prekid mogućih ulaznih linija mlaza, istraživanja su bila zasnovana na sistemu UnoDuct, firme “Lufttechnik J. Pichler GmbH”. Istraživanja sistema sa ulaznim otvorima su bazirana na konvencionalnom dovodnom sistemu.

Metod ispitivanja

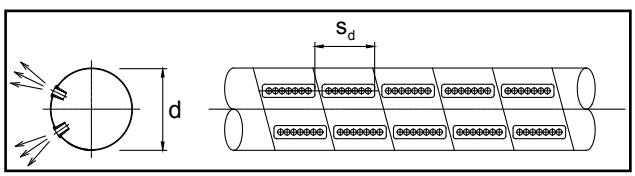
Klasični kao i numerički eksperimenti, npr. numerička dinamika fluida – CFD, mogu se koristiti da bi se dobili neophodni parametri. Iako obe metode imaju različitu izražajnost, one su u bliskoj vezi i uzajamno se dopunjuju. Prednost numeričkog eksperimenta kojim se dobijaju sve informacije o suštinskim fizičkim vrednostima, međutim, ide na račun opšte validnosti. Kvalitet rezultata zavisi od fizičkog modela i

korišćenih numeričkih metoda. Zato je neophodno ocenjivati numeričke rezultate eksperimentalnim nalazima.

Da bi se ispunili ovi zahtevi, obavljeno je ekstenzivno verifikovanje [6, 7]. Za izračunavanje je korišćen komercijalni CFD kod FLUENT 5.5 [9].

Analizirani sistemi za snabdevanje vazduhom

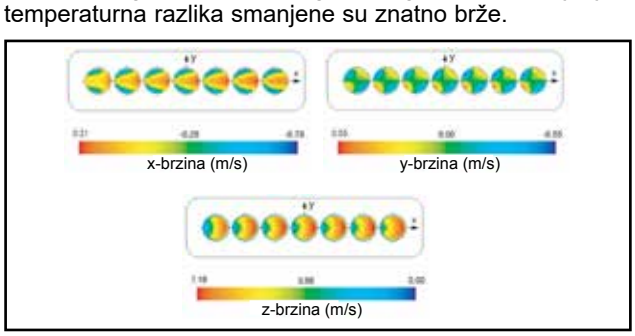
Analizirana su dva sistema za ulaz vazduha koji omogućuju dovod vazduha celom širinom prostorije. Ocenjeni su i interpretirani najvažniji parametri strujanja kroz ulazne otvore i ulazni sistem UnoDuct. Pomoću ulaznog sistema UnoDuct dovodni vazduh je sproveden tzv. "mlazničnim kanalom".



Slika 1. Detalj – element mlaznice i sistem za snabdevanje vazduhom UnoDuct

To je jedan spiralno zavijen kanal sa mlazničkim elementima zatvorenog oblika. Šema elemenata mlaznice može se aranžirati na željeni način. Zbog stabilnosti, mora se zadržati razmak između elemenata mlaznice u aksijalnom pravcu ($s_d \geq 89$ mm) i tangencijalnom pravcu ($s_t \geq 30$ mm). Svaki element mlaznice sastoji se od sedam otvora prečnika oko 8,6 mm. Tako se dobija modularan sistem koji dopušta veliki broj kombinacija koje se mogu lako prilagoditi lokalnim potrebama.

Istovremena upotreba spiralno zavijenog kanala kao nosača i dovodnog sistema čini mogućom raspodelu dovodnog vazduha u svim pravcima (difuzno). Nastajanje malih pojedinačnih mlazeva povećava celokupnu količinu ulaznog sekundarnog vazduha. Iz toga razloga, brzina strujanja i temperaturna razlika smanjene su znatno brže.



Slika 2. Crtež konture dvostrukog vrtloga – sistema UnoDuct (p_{stat} = 20 Pa, u_{duct} = 4 m/s)

Istraživanje o kojem je reč u ovom članku ograničeno je na mlazničke elemente montirane u jednom redu. Prema distanci s_d promena uvlačenja vazduha, sniženje temperature i smanjenje brzine strujanja su očekivani. Da bi se ispitao uticaj pojedinačnih mlazeva na širenje mlaza, napravljena su dva simulaciona modela sa različitim ulaznim graničnim uslovima.

Simulacioni modeli

Rezultati simulacije u suštini zavise od ulaznih graničnih uslova, tj. od parametara strujanja odnosno snabdevanja vazduhom. Zato su obavljena numerička i eksperimentalna istraživanja, da bi se odredili ulazni granični uslovi za mlaznički sistem UnoDuct.

Može se pokazati da se simulirana, vremenski uprosečena brzina isticanja, pravac isticanja i jačina turbulencije dobro slažu sa eksperimentalnim podacima. Osim toga, kao rezultat skretanja vazduha, primećen je dvostruki vrtlog (sličan pojavi pri prolasku vazduha kroz koleno cevi). Slika 2 prikazuje crtež konture u ulaznoj ravni brzinskih komponenata.

Iz ovih autarkičnih numeričkih istraživanja, nastali su neophodni ulazni granični uslovi. Zbog dobrog slaganja između podataka dobijenih merenjem i simulacijom, nastalo je i određivanje graničnih uslova za sistem ulaznih otvora preko numeričkih istraživanja. Zbog toga je osigurano slaganje sa jednačinama modela.

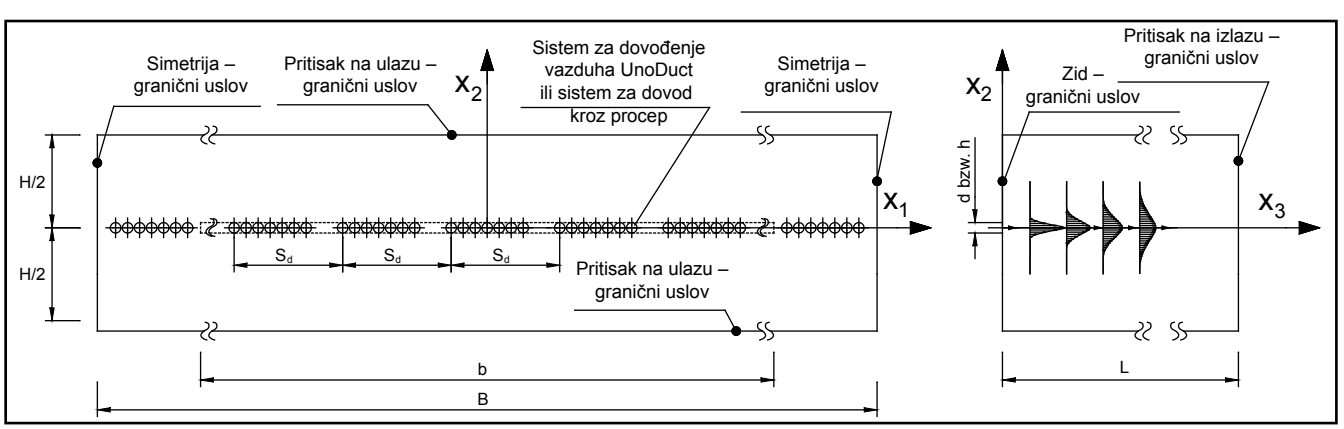
Slika 3 pokazuje projekat korišćenog simulacionog modela. Ulaz se sastoji od 11 mlazničkih elemenata sa sedam otvora na svakom i procepa po širini b = 520 mm. Prečnici otvora su d = 8,6 mm i visina procepa je h = 8,6 mm. Razmere simulacionog domena bile su određene na 3,6 x 0,979 x 2,5 m^3.

Definicije izabranih geometrija ulaza osiguravaju identične flukseve, tj. oba sistema za dovod vazduha imaju istu masu, količinu kretanja i energetske flukseve u ulaznoj ravni. Tako se ispunjavaju osnovni zahtevi za objektivnim poređenjem sistema.

Razmatranje rezultata

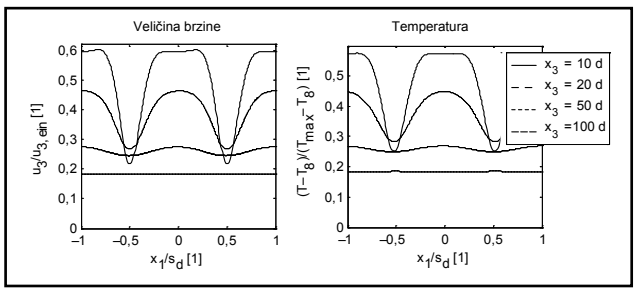
Karakteristične vrednosti su predstavljene bezdimenziono da bi rezultati olakšali pristup opštoj interpretaciji. Zbog trodimenzionalnog strujanja, razmatrane su ravni $x_1 = 0$ i $x_2 = 0$ (sl. 3). Kao osnova proračuna korišćen je razmak između elemenata mlaznice s_d = 89 mm i dužina sa procepom B = 979 mm.

Mlaz spolja ulazi u ambijentni vazduh sa vrha, dna i bočno. Zbog izabranog uređenja modela vazduh ne može da ulazi preko simetričnih površina. Iz toga razloga kvaziravan



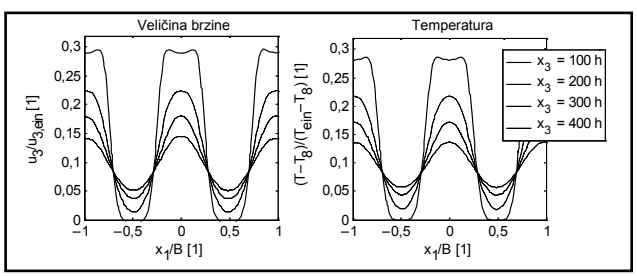
Slika 3. Granični uslovi simulacionih modela

mlaz je razvijen nizvodno. Brzina prelaza sa multimlaza na jednopovršinski mlaz zavisi od prostora između elemenata dovodnog vazduha i procesa turbulentnog mešanja. Slike 4 i 5 pokazuju bezdimenzionalno vremenski uprosečenu brzinu i temperaturu na površini $x_2 = 0$.



Slika 4. Uprosečena brzina i temperatura – sistem za dovod vazduha UnoDuct

Na dužini $x_3 < 100$ d gradijenti brzine na sl. 4 mogu se jasno opaziti. Oni proizvode dodatnu, turbulentnu količinu kretanja i prenos toplote poprečno u odnosu na glavni pravac strujanja.



Slika 5. Uprosečena temperatura i sistem temperatura–dovod vazduha UnoDuct

Sistemom za dovođenje vazduha kroz otvor turbulentni transverzalni pokreti unutar ravni $x_2 = 0$ takođe su opaženi. Zbog velikog prostora između ulaznih elemenata, maksimumi brzine su sporije reducirani. To ponašanje na prelazu između više mlazeva i pojedinačnog mlaza bilo je očekivano.

Da bi se mogli analizirati globalni efekti različitih procesa turbulentnog prenosa, sl. 6 pokazuje odnos između zapreminskog protoka na ulazu i zapreminskog protoka koji je povučen sa mlazom.

Parametar α je određen kako sledi:

$$\alpha = \frac{\dot{V}_{\text{UnoDuct}}(x_3)}{\dot{V}_{\text{Schlitzauslass}}(x_3)}$$

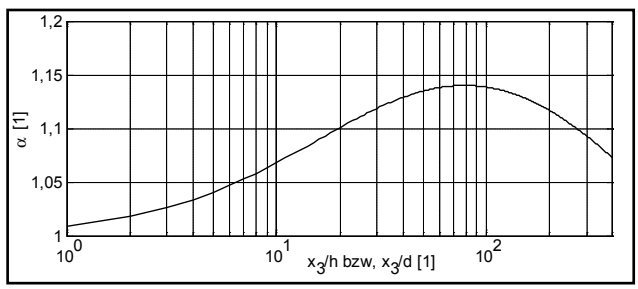
Može se lako dokazati da u zoni koja nas zanima (dužina mlaza oko 100 do 400 d), pomoću sistema za dovod vazduha UnoDuct ulazi do 15% više ambijentnog vazduha.

Sa većim distancama razmena α postaje manja i asimptotski se približava vrednosti 1. To se može objasniti činjenicom da se nakon određene dužine mlaza, razvija kvaziravan mlaz pomoću sistema za dovod vazduha kroz otvor.

Zbog većeg ulaza ambijentnog vazduha i bržeg obrazovanja kvaziravnog mlaza, dozvoljene su veće brzine i sniženje temperature. Prema sl. 7 može se očekivati oko 25% manja vrednost za uprosečenu brzinu i temperaturu u osi mlaza unutar mlaza od 100 do 400 d.

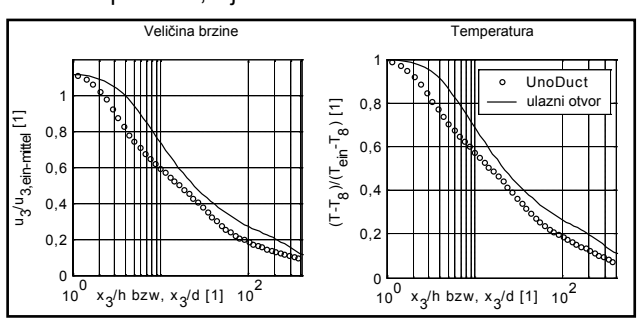
Rezime

Metode snabdevanja vazduhom imaju veliki uticaj na toplotnu ugodnost korisnika. Da bi se ispunili zahtevi korisnika, na raspolaganju su različiti sistemi za snabdevanje vazduhom koji se nude projektantima. U slučaju rashladnih sistema, koriste se često oni koji pružaju prednosti Koandinog efekta. Osim sistema za dovod vazduha kroz otvor, često se koriste elememti mlaznice smešteni u nizu. Zbog lake konstrukcije ti elementi mlaznice mogu se direktno povezati sa spiralno zavijenim kanalima.



Slika 6. Odnos zapreminskih protoka

Nasuprot sistemima sa ulaznim otvorom, ulazni vazduh se dovodi pomoću velikog broja malih otvora koji su integrisani sa elementima mlaznice. Nakon uvođenja vazduha, razvijaju se mali pojedinačni mlazevi. Elementi mlaznice su aranžirani jedan do drugog, sa malim zazorima između njih. Ti geometrijski uslovi odmah dovode do velikih gradijenata brzine i temperature, čiji su efekti bili analizirani.



Slika 7. Uprosečene brzina i temperatura na srednjoj osi mlaza

U istraživanju su korišćene numeričke metode potvrđene u drugim istraživanjima. Izvršena su uporedna istraživanja konvencionalnog sistema sa dovodom vazduha kroz otvor i opisanog sistema UnoDuct iz "Lufttechnik J. Pichler GmbH". Pretpostavljeno je da se masa, količina kretanja i energetski fluksevi oba sistema slažu. Da bi se isključio uticaj geometrije prostorije, pretpostavljeni su granični uslovi slobodnog mlaza. Pored toga, efekti potiska bili su zanemareni.

Zahvaljujući manjem prostoru između ulaznih elemenata, sistem za snabdevanje vazduhom mlaznicama UnoDuct dopušta znatno brži prelaz na kvaziravan mlaz nego sa fluksno odgovarajućim (ista masa, ista količina kretanja i isti energetski fluks) višestrukim mlazom. Isto tako, primećeni su znatno veći procesi turbulentnog mešanja unutar područja od interesa (dužina mlaza približno 100 do 400 d). Moglo bi se pokazati da brži prelaz na kvazi ravan mlaz i količine intenzivne turbulencije dovode do boljeg mešanja.

Pod opisanim graničnim uslovima, uvučeni zapreminski protok je do 15% veći od onoga sa sistemom UnoDuct. Smanjenje vremenski uprosečenih brzine i temperature u osi mlaza je oko 25% veće. Naročito u slučaju hlađenja, to olakšava saglašavanje sa termičkim zahtevima za kvalitet unutrašnjeg vazduha.

Nomenklatura

b – širina otvora, m
B – širina domena proračuna, m
d – prečnik rupe, prečnik kanala, m
p_{stat} – statički pritisak, Pa
s_d – prostor između dva elementa mlaznice, m
t – vreme, s
T – temperatura, K
T_{ein} – prosečna temperatura na ulazu, K
T_{max} – maksimalna temperatura na posmatranoj ravni, K
T_∞ – temperatura sredine, K
u_i – uprosečena brzina u pravcima x, y i z (i = 1, 2 odnosno 3), m/s
$u_{i,ein}$ – uprosečena brzina na ulazu, m/s
$u_{i,max}$ – maks. brzina na posmatranoj ravni, m/s
x_i – geometrijski pravci x, y i z (i = 1, 2 odnosno 3),
α – parametar – zapreminski protok, L.

Literatura

[1] **Hanel, B.,** *Beitrag zur Berechnung von Freistrahlen mit erhoehter Anfangsturbulenz*. Luft– und Kältetechnik (1977), 63–67.

[2] **Hanel, B., E. Richter,** *Das Verhalten von Freistrahlen in verschie– denen Reynolds-Zahlenbereichen,* Luft– und Kältetechnik (1979), 12–17.

[3] **Regenscheit, B.,** *Einfluss der Reynoldszahl auf die Gescheindig-keitsabnahme turbulenter Freistrahlen*, HLH 27 (1976), 122–126.

[4] **Peng, S.,** *Modelling of Turbulent Flow and Heat Transfer for Building Ventilation,* PhD-Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 1998.

[5] **Zhang, G., S. Morsing, B. Bjerg, K. Sviidt,** *A Study on the characteristics of airflow in a full scale room with a slot wall inlet beneath the ceiling,* Processings of Room-Vent 2000 (2000), 199–204.

[6] **Heschl, H., M. Fesharaki,** *Raumluftströmungssimulation,* Internationaler Kongress e.nova. 2001, Pinkafeld, 2001.

[7] **Hanel, B.,** *Die Berechnung der Mischungszone eines axialsymmetrischen turbulenten Freistrahls,* Luft- und Kältetechnik (1976), 193–197.

[8] **Heschl, H., M. Fesharaki, M. Steinkellner,** *Validation der CFD-Analyse von Raumluftströmungen mittels Messungen,* Fluent Anwenderkonferenz, Frankenthal, 2002.

[9] *** *Fluent, Fluent 5.0 User's Guide,* Fluent Inc. Centerra Resource Park, Lebanon, 1998.

kgh