

APPLICATION OF THERMO-ANEMOMETER AT PHYSICAL MODELLING OF POLLUTANT DIFFUSION IN ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

K. Bezpalcová*, Z. Jaňour*, P. Jonáš*, O. Mazur*, V. Uruba*

Summary: *The essence of the problem is the use of the simultaneous measurement of both instantaneous stream velocity and concentration of a tracer gas from a point source in the model of the city-type atmospheric boundary layer build in a wind channel. Simultaneous measurement of concentration and flow velocity by means of a thermo-anemometer will cause data on individual and mutual statistical characteristics of these quantities, namely coefficients of turbulent diffusion inside the atmospheric boundary layer.*

1. Úvod

Doposud je při studiu difúze pasivní příměsi v mezní vrstvě atmosféry pomocí metody fyzikálního modelování převážně užívána plamenová ionizační (FID) nebo optoakustická metoda detekce. Tyto metody však umožňují měření pouze středních hodnot koncentrací, výjimečně i časový průběh s vysokým rozlišením, ale bez souběžného měření proudových turbulentních charakteristik. Pro objasnění turbulentního přenosu pasivní příměsi je nutná znalost smíšených momentů $\overline{w'c'}$, které umožňuje měřit metoda termo-anemometrická.

Metodika současného měření koncentrace a rychlosti proudění binární směsi plynů pomocí anemometru se dvěma paralelními žhavenými drátky byla zdokonalena v Ústavu termomechaniky Akademie věd ČR (viz. Jonáš, P. et al., 2002, Jonáš, P. et al., 2003, Mazur, O. et al., 2002, Mazur, O. et al., 2003, Uruba, V. et al. 2003). V rámci tohoto zdokonalení byly vyrobeny speciální sondy se dvěma paralelními žhavenými drátky (Moryń-Kucharczyk, E. et al. 2003). Kalibrace sondy se dvěma žhavenými čidly byla prováděna v malé víceúčelové uzavřené aerodynamické trati, ve které je možno kontinuálně měnit velikosti rychlosti proudění, koncentrace vzorkovacího plynu a samozřejmě i teploty žhavení sondy. Kalibrace byla provedena pro případ směsi vzduchu a oxidu uhličitého při různých koncentracích. Metodika byla aplikována při studiu kouřové vlečky z komínu umístěného v městské atmosférické mezní vrstvě. Měření bylo prováděno v ekologickém aerodynamickém tunelu Ústavu termomechaniky. Byl změřen vertikální profil turbulentních charakteristik nabíhající mezní vrstvy atmosféry. Dále byly v kouřové vlečce zaznamenány časové průběhy výstupních signálů, ze kterých byly vyhodnoceny statistické i okamžité hodnoty rychlosti proudění a koncentrace pasivní příměsi.

* Mgr. Klára Bezpalcová, Doc. RNDr. Zbyněk Jaňour, DrSc., RNDr. Pavel Jonáš, DrSc., Prom. fyz. Oton Mazur, Ing. Václav Uruba, CSc.: Ústav termomechaniky Akademie věd ČR; Dolejškova 5; 182 00, Praha 8; tel.: +420.266 053 203, fax: +420.286 584 695; e-mail: bezpalcova@it.cas.cz

2. Ochlazování žhavených elementů ve směsi dvou plynů

Prisuzuje se Corrsinovi (1949) myšlenka použít žhavený drátek pro měření koncentrace i rychlosti ve směsi dvou plynů. Corrsin odvodil, že jediný drátek žhavený na několik teplot nebo několik drátků válcových čidel postačí pro taková měření. Při tom platí obecně, že měření sondou s jedním žhaveným drátkem může dát pouze statistické momenty pole rychlosti a koncentrace nikoliv však okamžité hodnoty těchto veličin. K tomu je třeba sonda s minimálně dvěma žhavenými elementy, jejichž vzájemné uspořádání může být různé a které mohou být žhaveny na různé teploty.

Následující úvahy se budou týkat především použití termo-anemometrické sondy se dvěma paralelními žhavenými elementy, z nichž jeden tvoří platino-rhodiový drátek o průměru $d_1 = 10 \mu\text{m}$ a délce $l_1 = 2,2 \text{ mm}$; druhý wolframový drátek o průměru $d_2 = 5 \mu\text{m}$ a délce $l_2 = 2,2 \text{ mm}$. Žhavené elementy byly uspořádány rovnoběžně v malé vzájemné vzdálenosti $\Delta = 1 \text{ mm}$, kterou považujeme za zanedbatelnou a tudíž měření můžeme interpretovat jako bodová. Sonda byla umístěna v proudu tak, že oba elementy jsou kolmé na vektor střední rychlosti proudění, přičemž obě vlákna jsou rovnoběžná s podlahou aerodynamického tunelu. Jsou-li pak oba elementy žhaveny na konstantní, avšak výrazně rozdílnou teplotu, vzniká tím měřicí zařízení, které po náležité kalibraci je schopno měřit současně okamžité hodnoty podélné složky rychlosti proudění směsi dvou plynů a jejich koncentrace. Digitálním záznamem těchto hodnot a jejich numerickým zpracováním můžeme pak získat časové průběhy okamžitých hodnot i střední hodnoty, rozptyly, kovarianci, případně i centrální momenty vyšších řádů zmíněných veličin.

Základem teorie měření termo-anemometrem je dobrá znalost ochlazovacího zákona žhaveného elementu ofukovaného proudem plynu. Popis ochlazování žhavených elementů válcového tvaru, který má vždy konečnou délku, vychází nejčastěji z ochlazovacího zákona nekonečně dlouhého válečku, obtékaného kolmo homogenním proudem plynu. (Dále budeme pro zjednodušení připojovat k veličinám, které se vztahují k válečku, index w , za který pak budeme dosazovat buď index 1, půjde-li o platino-rhodiový drátek, nebo index 2, půjde-li o wolframový drátek.) V současné době se pro popis ochlazování nekonečně dlouhého žhaveného válečku o průměru d ofukovaného kolmo homogenním proudem o rychlosti W používá nejčastěji formule, kterou v kritériálním tvaru sestavili Collis a Williams (1959)

$$Nu_{\infty} \left(\frac{T_m}{T} \right)^m = a + b(\text{Re})^n \quad (1)$$

zde je použita symbolika původní práce Collise a Williamse (1959), tzn. Nu_{∞} značí Nusseltovo číslo žhaveného válečku nekonečné délky, které je vyjádřeno pomocí součinitele přestupu tepla h_c , průměru válečku d_w a součinitele tepelné vodivosti λ_w jako $Nu_{\infty} = h_w d_w / \lambda_w$. Součinitel přestupu tepla h_c je definován jako podíl tepelného toku H z jednotky plochy povrchu válečku k rozdílu teploty T_s plynu proudícího bezprostředně po povrchu válečku a teploty plynu daleko od válečku T . Teplota T_s je nižší, než teplota povrchu samotného válečku T_w . Na základě vztahu, který pro skok teploty $(T_w - T_s)$ našel Kennard (1938), odvodili Collis a Williams (1959) přepočtovou formuli

$$\frac{1}{Nu_{\infty}} - \frac{1}{(Nu_{\infty})_c} = 2 \text{Kn}, \quad (2)$$

v níž na pravé straně figuruje Knudsenovo číslo $Kn = l/d_w$, kde l je střední volná dráha molekul. Nusseltovo číslo Nu_∞ vznikne z tzv. měřeného Nusseltova čísla Nu_m určitou korekcí, která bere v úvahu nerovnoměrnost v rozložení teploty podél drátku, přičemž Nu_m je utvořeno se součinitelem přestupu tepla definovaným jako $h = H/(T_w - T)$.

Výpočet pomocí vzorců (1) a (2) je implicitně značně složitý. Koch a Gartshore (1972) si však všimli, že měřené hodnoty Nusseltova čísla drátku konečné délky lze aproximovat regresní funkcí podobného tvaru jako v rovnici (1), tj. (pro drátky z různých materiálů nabývají koeficienty A , B , M , N různých hodnot)

$$(Nc)_k \equiv Nu_k \left(\frac{T_{mk}}{T} \right)^{M_k} = A_k + B_k Re_k^{N_k}; \quad k = 1 (\text{PtRh}), 2 (\text{W}), \quad (3)$$

kde Nc značí takzvané Nusseltovo kontinuální číslo.

Konstanty A , B závisí na Prandtlově čísle tekutiny, které je zde definované jako $Pr = c_p \mu / \lambda$, kde c_p je specifické teplo při konstantním tlaku, λ je koeficient tepelné vodivosti a μ je koeficient dynamické vazkosti plynu. Jelikož všechny veličiny vystupující v definici Prandtlova čísla závisí u binární směsi plynů na koncentraci C vybrané složky (koncentrace druhé složky je pak rovna $1-C$), plyne odtud, že konstanty A , B budou v tomto případě funkcemi této veličiny. Naše měření dvoučidlovou sondou ve směsi vzduchu a oxidu uhličitého ukázala, že také exponenty M a N se zdatelně mění s koncentrací oxidu uhličitého.

Vezmeme-li tyto skutečnosti v úvahu, můžeme vyslovit hypotézu, že ochlazování žhavených drátků lze vyjádřit rovnicí (3), v níž všechny čtyři parametry A , B , M , N jsou při ofukování daného čidla binární směsí plynů funkcí molární koncentrace C vybrané složky (C by však mohlo značit obecně i jiný druh koncentrace binární směsi, např. objemovou či hmotností koncentraci apod.), tedy

$$A=A(C); \quad B=B(C); \quad M=M(C); \quad N=N(C) \quad (4)$$

Z měření vyplývá, že průběhy všech těchto veličin lze pro směs vzduchu a oxidu uhličitého dostatečně přesně aproximovat polynomy 4. stupně v C , tedy

$$A = \sum_{n=0}^4 a_n C^n; \quad B = \sum_{n=0}^4 b_n C^n; \quad M = \sum_{n=0}^4 m_n C^n; \quad N = \sum_{n=0}^4 n_n C^n. \quad (5)$$

Výše popsaná sonda s označením 55P711 – 1 byla připojena k aparatuře StreamLine (SL), jejíž parametry byly následující:

Pt&Rh-čidlo: kanál č. 1: $R(\text{kabel}) = 0,22 \Omega$; $R(\text{suport}) = 0,407 \Omega$; $R(\text{elektrody}) = 0,90 \Omega$.
W-čidlo: kanál č. 2: $R(\text{kabel}) = 0,22 \Omega$; $R(\text{suport}) = 0,405 \Omega$; $R(\text{elektrody}) = 0,90 \Omega$.

Čidlo	PtRh	W
Kanál č.	1	2
R_s [Ω]	1.527	1.525
R_{20} [Ω]	4.807	6.112
α_{20} [K^{-1}]	0.0016	0.0036

kde R_{20} je odpor drátku při teplotě 20°C a α_{20} je koeficient teplotní závislosti elektrického odporu. Odpor „dekády“ R_d dle SL je $20xR_{d1}$ nebo $20xR_{d2}$

$$R_w = R_{20} (1 + \alpha_{20} (T_w - 293.2)) = R_d - R_s, \quad (6)$$

kde R_w je odpor drátku a T_w je teplota žhavení drátku. Pro výkon žhavicího proudu Q_w můžeme psát (E je výstupní napětí na drátku)

$$Q_w = \frac{R_w E^2}{(20 + R_w + R_s)^2}. \quad (7)$$

Nusseltovo a Reynoldsovo číslo pro drátkové sondy je definováno vztahem

$$Nu = \frac{Q}{\pi l_w \lambda (T_m) (T_w - T)}; \quad Re = \frac{d_w \rho (p, T_m) W}{\mu (T_m)}; \quad T_m = \frac{T_w + T}{2}, \quad (8)$$

kde T_m je efektivní teplota a W je rychlost ofukování.

Fyzikální vlastnosti jako jsou hustota ρ , koeficient tepelné vodivosti λ a koeficient dynamické vazkosti plynu μ při koncentraci C ($\equiv C_2$) příměsi v nosném plynu (vzduch, index 1, C_1) se vypočtou podle vzorců

$$\rho(C, p, T_m) = C_1 \rho_1(p, T_m) + C_2 \rho_2(p, T_m) = (1 - C) \rho_1 + C \rho_2 \quad (9)$$

$$\lambda(C, T_m) = \frac{\lambda_1}{1 + 1,065 \frac{C_2}{C_1} \left[1 + \left(\frac{\lambda_1^0}{\lambda_2^0} \right)^{1/2} \left(\frac{m_1}{m_2} \right)^{1/4} \right]^2} + \frac{\lambda_2}{1 + 1,065 \frac{C_1}{C_2} \left[1 + \left(\frac{\lambda_2^0}{\lambda_1^0} \right)^{1/2} \left(\frac{m_2}{m_1} \right)^{1/4} \right]^2}, \quad (10)$$

$$2\sqrt{2} \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right)^{1/2} \quad 2\sqrt{2} \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right)^{1/2}$$

$$\lambda_j^0 = \frac{\lambda_j(T_m)_j}{0.115 + 0.354 \frac{\gamma_j}{\gamma_j - 1}}; \quad j = 1 (\text{vzduch}), 2 (\text{příměs}), \quad (11)$$

$$\mu(C, T_m) = \frac{\mu_1}{1 + \frac{C_2}{C_1} \left[1 + (\mu_1/\mu_2)^{1/2} (m_2/m_1)^{1/4} \right]^2} + \frac{\mu_2}{1 + \frac{C_1}{C_2} \left[1 + (\mu_2/\mu_1)^{1/2} (m_1/m_2)^{1/4} \right]^2}. \quad (12)$$

$$4\sqrt{2} \left[1 + (m_1/m_2) \right]^{1/2} \quad 4\sqrt{2} \left[1 + (m_2/m_1) \right]^{1/2}$$

V těchto formulích jsou m_1 a m_2 molární hmotnosti složek směsi plynů a závislosti fyzikálních vlastností plynů na tlaku a teplotě se předpokládají ve tvaru

$$\rho_j = (k_\rho)_j p/T_m; \quad \lambda_j = (k_\lambda)_j T_m^{(n_\lambda)_j}; \quad \mu_j = (k_\mu)_j T_m^{(n_\mu)_j}, \quad (13)$$

Zanedbáme-li malé deformace rychlostního a teplotního pole v okolí obou žhavených elementů kombinované sondy způsobené jejich vzájemným ovlivňováním, jsou společnými veličinami pro oba žhavené elementy teplota směsi daleko od obou elementů T a rychlost ofukování W .

Kombinací výše uvedených rovnic můžeme dostat dvě rovnice, ve kterých jako neznámé budou vystupovat rychlost ofukování a koncentrace pasivní příměsi (v našem případě oxidu uhličitého). Koncentrace C je bohužel obsažena ve všech veličinách popisujících fyzikální vlastnosti binární směsi plynů a navíc v koeficientech A , B , M , N v ochlazovacím zákoně (3),

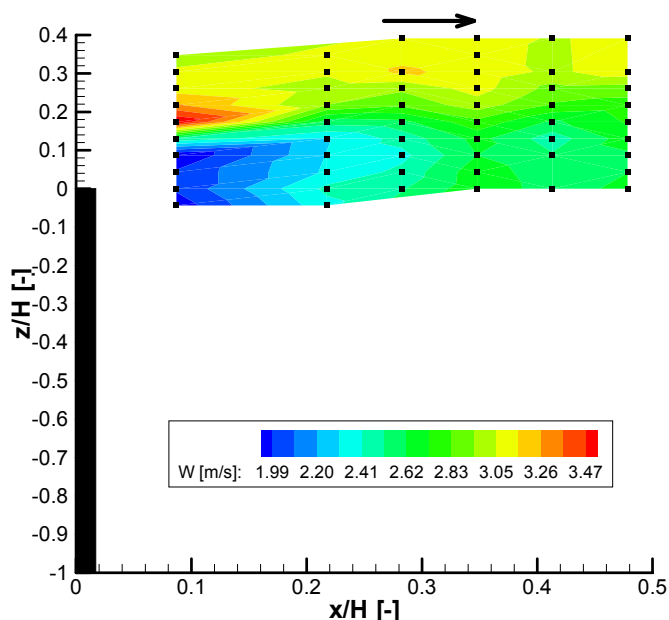
Tabulka 2: Koeficienty závislosti parametrů A, B, M, N na C pro wolframový drátek.

Koeficienty pro Wolfram-HW	A (C)	B (C)	M (C)	N (C)
A0	0.29233	0.58856	0.3053	0.433
A1	0.19488	1.4395	0.05762	
A2	-0.82384	-0.28853	0.47789	
A3	2.15055	-0.48311	-0.90496	
A4	-2.02651	0.70844	0.44809	
r	0.97976	0.999965	0.981249	

3. Uspořádání experimentu a výsledky

Měření probíhalo v ekologickém aerodynamickém tunelu Ústavu termomechaniky AV ČR v Novém Kníně. Zde byla pomocí generátorů turbulence a drsných elementů vyvinuta mezní vrstva, která v měřítku 1:200 odpovídá atmosférické mezní vrstvě nad městskou zástavbou viz. Snyder (1981). Mezní vrstva měla výšku $\delta = 800$ mm, logaritmický vertikální profil střední rychlosti proudění s parametry (přepočteno do plného měřítka): frikční rychlost $u^* = 0,25$ m/s; parametr drsnosti $z_0 = 1,14$ m; pošinovací tloušťka $\delta_0 = 0,2$ m a exponent v mocninovém zákoně $\alpha = 0,28$.

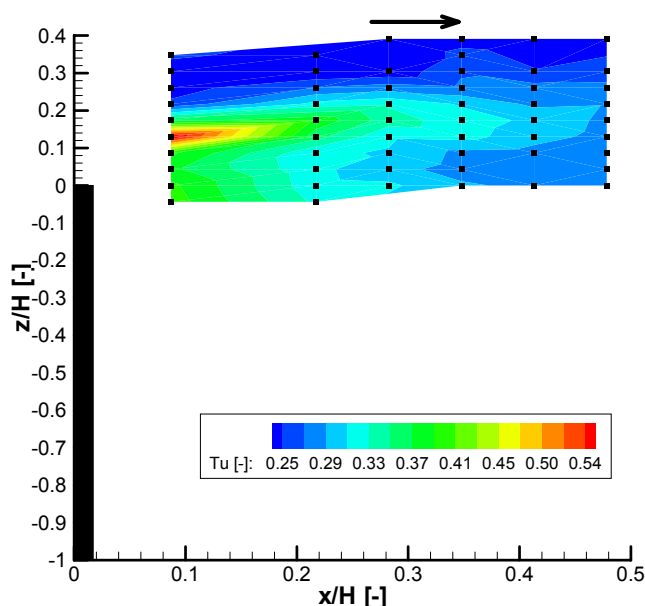
Do této mezní vrstvy byl umístěn komín o výšce $H = 230$ mm (46 m v plném měřítku) a vnitřním průměru 8 mm (1,6 m v plném měřítku), z něhož byl vypouštěn oxid uhličitý v množství $Q = 17$ l/min což odpovídá výtokové rychlosti $v = 5,6$ m/s. Byla proměřena vlečka od tohoto komínu při nabíhajícímu proudě o rychlosti $W_{\text{ref}} = 4$ m/s ve výšce 750 mm.



Obrázek 2: Pole střední rychlosti.

V každém bodě bylo provedeno měření pro několika různých žhavení obou drátků kvůli korekcím na teplotu. Pro měření byly použity dva kanály anemometrického systému DISA typ M v režimu CTA, signál byl dále filtrován dolnoproustným filtrem a vzorkován A/D převodníkem firmy UEI PD2-MFS-4-800/14. Na převodníku byla nastavena rychlost vzorkování 25 kHz, vzorkovaly se dva kanály simultánně s rozlišením 14 bitů. Dolnoproustný filtr byl nastaven na frekvenci 10 kHz. Záznamy signálů byly ukládány na disk počítače. Sonda byla polohována pomocí tří-komponentního traverzeru. Ovládací software byl vytvořen ve vývojovém prostředí LabVIEW. Z časových záznamů okamžitých napětí na drátkách byly vyhodnoceny okamžité hodnoty rychlosti proudění a koncentrace oxidu uhličitého. Všechny body, ve kterých měření probíhalo, jsou na obr. 2-5 znázorněny černými body. Proměřena byla rovina určená směrem hlavního proudu a osou komínu.

Na obr. 2 je znázorněno pole středních rychlostí v rovině komínu. Je zřejmé, že přítomnost komínu ovlivňuje proudění a to nejen díky své přítomnosti, ale i kvůli nemalé výtokové rychlosti oxidu uhličitého z něj. Vidíme výrazné snížení rychlosti až do výšky 0,1. Naopak nad touto hladinou pozorujeme výrazné zvýšení rychlosti proudění zapříčiněné výtokem CO₂.



Obrázek 3: Pole intenzity turbulence pro podélnou složku proudění.

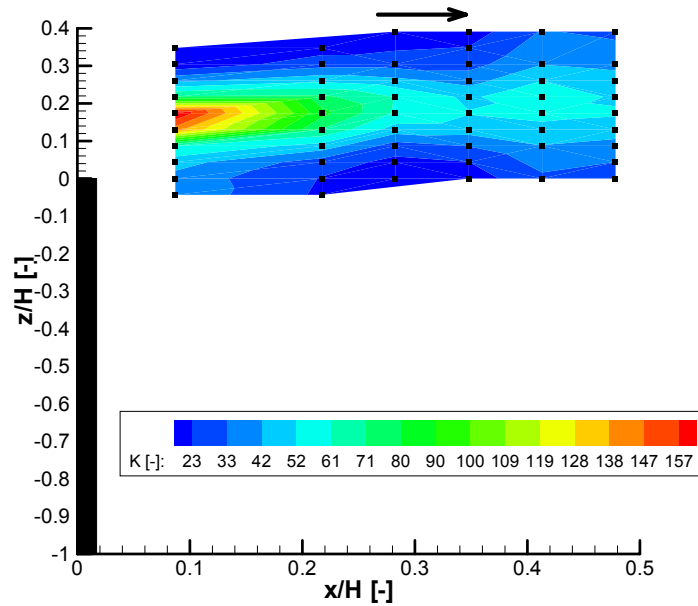
Obr. 3 ukazuje pole intenzity turbulence pro podélnou složku proudění. Zde opět vidíme že komín i vytékající CO₂ narušuje proudění i tím, že do něj vnáší další turbulenci.

V rámci fyzikálního modelování mezní vrstvy atmosféry a rozptylu znečištění v ní používáme bezrozměrné tvary fyzikálních veličin viz. Bezpalcová (2002). Pro výpočet bezrozměrných koncentrací K od bodového zdroje používáme vzorec

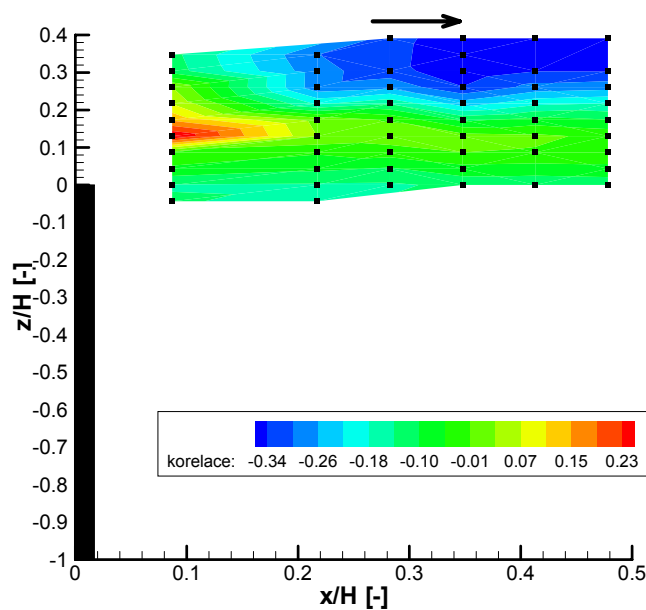
$$K = \frac{C W H^2}{Q}, \quad (14)$$

kde C je molární koncentrace, W je střední rychlost proudění, H je charakteristický délkový rozměr (v našem případě výška komína) a Q je objemová vydatnost zdroje. Pole bezrozměrné koncentrace je zobrazeno na obr. 4.

Na obr. 5 vidíme pole korelačních členů mezi okamžitými hodnotami rychlosti proudění hlavního proudu w a koncentrace c . Kovariance $\overline{w'c'}$ je součinem odchylek okamžitých hodnot w a c od středních hodnot (značena pruhem) $w' = w - \overline{w}$. Korelační koeficient r byl vypočten podle vzorce



Obrázek 4: Pole středních hodnot bezrozměrných koncentrací.



Obrázek 5: Pole korelačních koeficientů r .

$$r = \frac{\overline{w' c'}}{\sigma_w \sigma_c}, \quad (15)$$

kde σ_w , resp. σ_c , je směrodatná odchylka souboru okamžitých rychlostí, resp. koncentrací. V jádru vlečky pozorujeme kladnou hodnotu korelačního koeficientu což dobře souhlasí s blízkostí relativně vydatného zdroje oxidu uhličitého. Kladná hodnota r v jádru vlečky lze interpretovat tak, že silnější proudění zde souvisí s výtokovou rychlostí CO_2 z komínu. Záporné hodnoty naopak pozorujeme v horní části kouřové vlečky, kde dochází k míšení s čistým vzduchem. Zde naopak čím vyšší rychlost (a tím pádem větší množství čistého vzduchu), tím nižší naměřená koncentrace.

4. Závěr

V rámci této práce byla poprvé experimentálně ověřena metoda současného měření rychlosti proudění a koncentrace pasivní příměsi termo-anemometrickou metodou. Na poli fyzikálního modelování jde o ojedinělý počín.

Studium kouřové vlečky v městské zástavbě bylo realizováno v ekologickém aerodynamickém tunelu umístěném v aerodynamické laboratoři ÚT AV ČR v Novém Kníně. Městská atmosférická mezní vrstva byla vytvořena v měřítku 1:200 pomocí vhodné konfigurace generátorů turbulence a elementů drsnosti. Výška komína na modelu byla 23 cm, což znamená 46 m v plném měřítku. Byly změřeny časové průběhy okamžitých hodnot rychlosti proudění hlavního proudu a koncentrace oxidu uhličitého, který byl vypouštěn z komína. Na základě těchto časových řad byli vypočteny střední hodnoty rychlosti proudění a koncentrace, ale i intenzita turbulence a korelační koeficient r mezi hodnotami koncentrace a rychlosti proudění. Dosažené výsledky potvrzují očekávání a jsou smysluplné. Bohužel měření bylo možno provést pouze pro podélnou složku proudění, ve které převažuje přenos pasivní příměsi advekcí nad přenos turbulentní difúzí. Daleko přínosnější pro modelování šíření znečištění v atmosféře by byly koeficienty turbulentní difúze pro příčné složky proudění, ale to vyžaduje sondu se třemi, resp. čtyřmi, drátky pro současné měření koncentrace a rychlosti proudění ve dvou, resp. třech, směrech. Výroba a testování takovéto sondy je naším dalším cílem.

5. Poděkování

Tato práce vznikla v rámci výzkumného programu č. K2076106 a grantu GAAV ČR A3040101.

6. Literatura

Bezpalcová, K. (2002): Odhad rozložení koncentrací od liniového zdroje v kaňonu ulice metodou fyzikálního modelování, Diplomová práce, Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy v Praze

- Collis, D.C. & Williams, M.J. (1959) Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers. *J.Fluid Mech.*, 6, pp.357-384.
- Corrsin, S. (1949) Extended Applications of the Hot Wire Anemometer. *NACA TN, No. 1864*.
- Jonáš, P., Mazur O., Šarboch, J. & Uruba, V. (2002) Citlivost sondy se dvěma žhavenými čidly ke koncentraci příměsi helia do vzdušného proudu in: *Proc. Seminar Topical Problems of Fluid Mechanics 2002* (Příhoda, J. & Kozel, K. eds), Praha, Ústav termomechaniky AV ČR, str. 39-44.
- Jonáš, P., Mazur O. & Uruba, V. (2003) Simultaneous measurement of velocity and molar concentration in a gas-mixture turbulent flow using a dual heated sensors probe; part II: Probe calibration in the helium/air mixture, in: *Symposium on anemometry /18./*. (Chára, Z. & Klabocho, L. eds), Praha, Ústav pro Hydrodynamiku AV ČR, str. 100-107.
- Kennard, E.H. (1938) *Kinetic Theory of Gases*. McGraw-Hill.
- Koch, F.A. & Gartshore, J.S. (1972) Temperature effects on hot-wire anemometer calibrations. *J.Phys.E: Sci.Instrum.*, 5, pp.58-61.
- Mazur, O., Jonáš, P., Šarboch, J. & Uruba, V. (2002) Zdokonalená metoda kalibrace sond se dvěma žhavenými čidly pro současné měření rychlosti a koncentrace v proudu směsi dvou plynů, in: *Colloquium fluid dynamics 2002 : proceedings*. (Jonáš, P. & Uruba, V. eds), Praha, Ústav termomechaniky AV ČR, str. 121-124.
- Mazur, O., Uruba, V. & Jonáš, P. (2003) Simultaneous measurement of velocity and molar concentration in a gas-mixture turbulent flow using a dual heated sensors probe; part I: principle of measuring method. in: *Symposium on anemometry /18./*. (Chára, Z. & Klabocho, L. eds), Praha, Ústav pro Hydrodynamiku AV ČR, str. 92-99.
- Mazur, O., Jonáš, P., Šarboch, J. & Uruba, V. (2003) Measurement of velocity and concentration in a stream of a helium-air mixture by hot-wire/film anemometry. *PAMM - Proc. Appl. Math. Mech* 2, pp. 336-337.
- Moryń-Kucharczyk, E., Jonáš, P., Mazur, O. & Uruba, V. (2003) Preliminary investigation of the features of a probe with a hot wires pair at measurement in an air/CO₂ mixture stream, in: *Colloquium fluid dynamics 2003 : proceedings*. (Jonáš, P. & Uruba, V. eds), Praha, Ústav termomechaniky AV ČR, str. 89-92.
- Snyder W. H. (1981): Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion, Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, Report No. 600/8-81-009
- Uruba, V., Jonáš, P. & Mazur, O. (2003) Simultaneous measurement of velocity and molar concentration in a gas-mixture turbulent flow using a dual heated sensors probe; part III: method of measurement and evaluation of results. in: *Symposium on anemometry /18./*. (Chára, Z. & Klabocho, L. eds), Praha, Ústav pro Hydrodynamiku AV ČR, str. 108-115.