

## PROPERTIES OF THE HOT-WIRE PROBES FOR SIMULTANEOUS MEASUREMENT OF THE VELOCITY AND THE BINARY-MIXTURE CONCENTRATION

P. Antoř, P. Jonáš, O. Mazur, V. Uruba\*

**Summary:** *The diffusion of the fluid particles is one of the most important fundamental problems of the research of transitional and turbulent flows. Investigating the diffusion it is very useful to let some gas stream into the main airflow to visualise the flow pattern or to imitate the action of the Archimedes force. The simultaneous measurement of the mean values, the standard deviations and the covariance of velocity and concentration of the gas mixture is possible by means of a CTA. The special hot-wire probes were manufactured for such applications. Their directional properties are the subject of the paper.*

### 1. Úvod

Při modelovém studiu ekologických problémů a v dalších aplikacích je vhodné do proudu hlavního plynu (nejčastěji vzduchu) připouštět druhý plyn (např. Ar, CO<sub>2</sub>, He apod.) v roli stopovací látky. Pro sledování šíření druhého plynu v proudu základní složky směsi je potřebné měřit ve vyšetřované oblasti proudového pole jak rychlost proudění směsi, tak i koncentraci obou jejích složek a také intenzitu fluktuací těchto veličin a složky vektoru turbulentního přenosu koncentrace.

Metoda současného měření rychlosti a koncentrace v proudu směsi dvou plynů pomocí anemometru využívá kombinovanou sondu minimálně se dvěma žhavenými čidly, která mají buď výrazně rozdílnou tloušťku nebo jsou žhavena na výrazně rozdílné teploty. Základním předpokladem pro vyhodnocení koncentrace je rovnost efektivních rychlostí ochlazování u obou rovnoběžných čidel. Proto se zaměříme na směrové charakteristiky sond.

### 2. Porovnávané typy sond

Sonda, v níž žhavené elementy jsou na sebe kolmé poprvé použili Way a Libby (1970) ve směsi vzduch-helium. Pro měření ve směsi vzduch-CO<sub>2</sub> použili Sakai aj. (2001) sondu se dvěma paralelními žhavenými drátky.

Podobné sondy byly vyrobeny v laboratoři D1 ÚT AVČR. Jejich fotografie jsou na obr. 1. U všech typů vyrobených sond byla záměrně nastavena poměrně značná vzájemná vzdálenost obou čidel ve srovnání s jejich příčnými rozměry ( $\Delta \gg d_1, d_2$ ).

---

\* Ing. Pavel Antoř, Ph.D., RNDr. Pavel Jonáš DrSc., Oton Mazur, prom. fyz., doc. Ing. Václav Uruba, CSc.: Institute of Thermomechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Dolejškova 5, CZ-18200 Prague 8, Czech Republic.

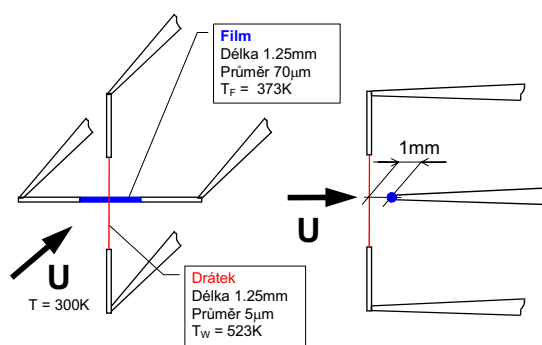
Důvodem pro to byla snaha minimalizovat vzájemnou interferenci teplotních polí obou žhavených čidel. Pak je pro popis jejich ochlazování možné použít běžný tvar ochlazovacího zákona, který se používá pro osamocené žhavené čidlo.



Obr. 1. Zkoumané žhavené sondy: (A); (B); (C).

#### - Sonda A se zkříženými čidly

Sonda A (UT R521) byla vyrobena modifikací komerčně dostupné sondy DANTEC typ 55R52 se dvěma čidly, která tvoří válcová křemíková vlákna o průměru  $d_f=7e-5$  m a délce  $3e-3$  m, na něž jsou vakuovým napařováním naneseny tenké niklové filmy, které jsou v koncových částech pokryty vrstvou zlata o tloušťce  $(1,0e-5 - 1,5e-5)$  m. Pozlacené konce vymezují délku střední aktivní části čidla, která je  $l_f=1,25e-3$  m a také tvoří poslední část přívodu napájecího proudu k této jeho aktivní části.



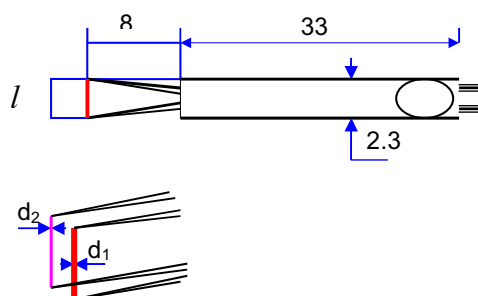
Obr. 2. Sonda se zkříženými žhavenými čidly

Sonda A je schématicky znázorněna na obr.1. Žhavicí teploty čidel byly při tom nastaveny na hodnoty  $T_1=100$  °C a  $T_2=200$  °C.

#### - Sonda B s rovnoběžnými drátky

Oproti předchozímu typu má taková sonda dva rovnoběžné žhavené drátky, které jsou zároveň kolmé na její podélnou osu. U této sondy svírají obě čidla se směrem vektoru rychlosti proudění v každém okamžiku stejný úhel. Teoreticky by tedy v tomto uspořádání čidel měla vzniknout žádoucí situace, kdy (v určitém rozsahu úhlů sklonu sondy k vektoru rychlosti proudění) budou efektivní rychlosti ochlazování u obou čidel stejné, což pak umožňuje sestavit rovnici pro určení koncentrace binární směsi plynů, kterou lze řešit numericky.

Sonda B se dvěma žhavenými drátky (UT R711) byla zhotovena úpravou komerční sondy DANTEC typ 55P71, a je schématicky znázorněna na obr. 3.

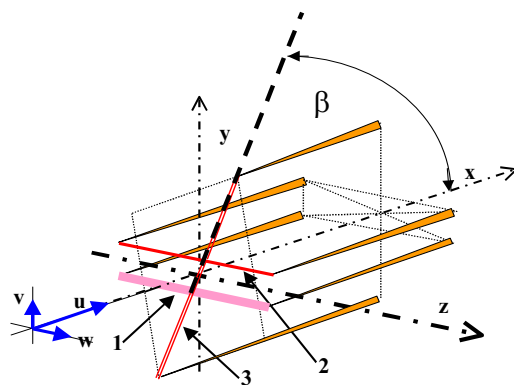


**Obr. 3.** Sonda se dvěma rovnoběžnými drátky

Jeden drátek (W1) je ze slitiny platiny (90%) a rhodia (10%), má průměr  $1e-5$  m a byl žhaven na teplotu  $560$  °C Druhý je wolframový poplatinovaný drátek, má průměr  $5e-6$  m a byl žhaven na teplotu  $200$  °C.. Oba drátky mají shodnou délku  $1,82e-3$  m a vzdálenost mezi nimi je  $0,5e-3$  m. Schéma sondy je na obr. 1.

#### - Sonda C s dvěma rovnoběžnými a jedním šikmým drátkem

Sonda C má tři žhavená čidla. Tato sonda umožňuje současné měření dvou složek rychlosti a koncentrace v proudu binární směsi plynů, jehož rychlostní pole je alespoň ve středních hodnotách dvourozměrné nebo osově symetrické. Uspořádání elektrod sondy je schématicky znázorněno na obr. 1. Fotografie třídrátkové sondy při cejchování je na obr. 4.



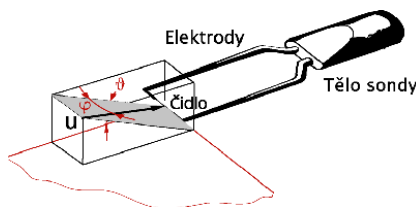
**Obr. 4.** Sonda se třemi drátky

Tato sonda obsahuje dva rovnoběžné drátky, které leží v rovině kolmé na podélnou osu sondy (shodně se sondou B). Jeden drátek z této dvojice je ze slitiny platiny (90 %) a rhodia (10%), má průměr  $1e-5$  m a délku  $1,28e-3$  m (je označen W1). Druhý drátek (W2) je z wolframu, má průměr  $2,5e-6$  m a délku  $1,15e-3$  m. Dále je zde šikmý drátek (W3), ležící v rovině, která obsahuje osu sondy a je kolmá na dvojici rovnoběžných drátků. Je vyroben z poplatinovaného wolframového drátku o tloušťce  $5e-6$  m, má délku  $1,56e-3$  m a prochází středem mezery mezi rovnoběžnými drátky; jeho sklon k ose sondy je  $\beta=48^\circ$ .

### 3. Směrová kalibrace

Ochlazování čidla šikmo ofukovaného rychlostí o velikosti  $u_\infty$  je stejné jako ochlazování kolmo ofukovaného čidla rychlostí efektivní  $u_e$ . Úhel, který svírá vektor rychlosti s normálou

drátku označme  $\alpha$ . Pro dvojici rovnoběžných drátků, které jsou podle předpokladu ofukovány při kalibraci kolmo, je velikost rychlosti  $u_e$  přímo rovna jejich efektivní rychlosti ochlazování  $u_{e1,2} = u(\alpha = 0) = u_\infty$ .



Obr. 5. Šikmo ofukovaný drátek při směrové kalibraci

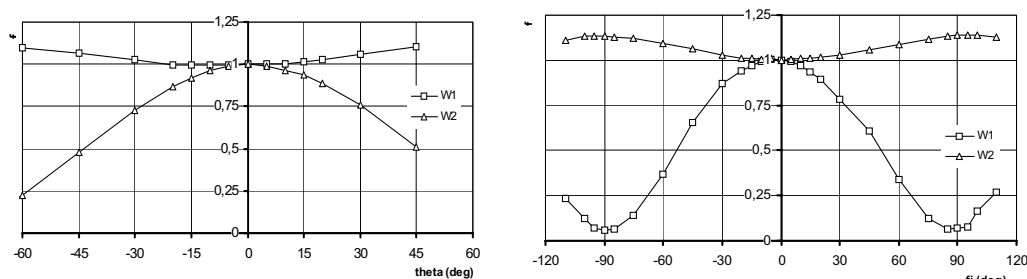
Se šikmým drátkem ( $i=3$ ) svírá vektor rychlosti nabíhajícího proudu úhel  $\alpha = \pi/2 - \beta$ . Směrovou funkci  $f(\alpha)$  definujeme.

$$f_i(\alpha) = \left[ \frac{u_{ei}(\alpha)}{u_\infty} \right]^2. \quad (1)$$

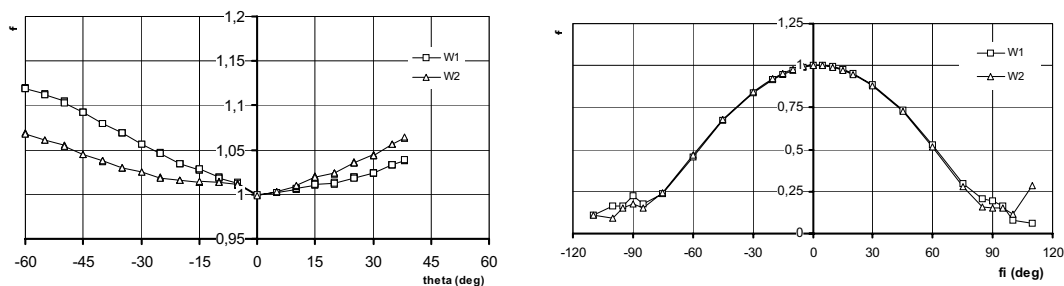
Při měření byly drátky připojeny na tři kanály anemometru Dantec Streamline. Zaznamenávala se výstupní napětí  $E_1, E_2, E_3$ . Teplota vzduchu vyfukovaného z trysky se měřila platinovým teploměrem Pt100. Tlakový spád na měrné dýze proti barometrickému tlaku, pomocí něhož se vypočítávala rychlost  $u_\infty$  v ústí trysky, byl měřen tlakovým převodníkem Baratron.

#### 4. Směrové charakteristiky

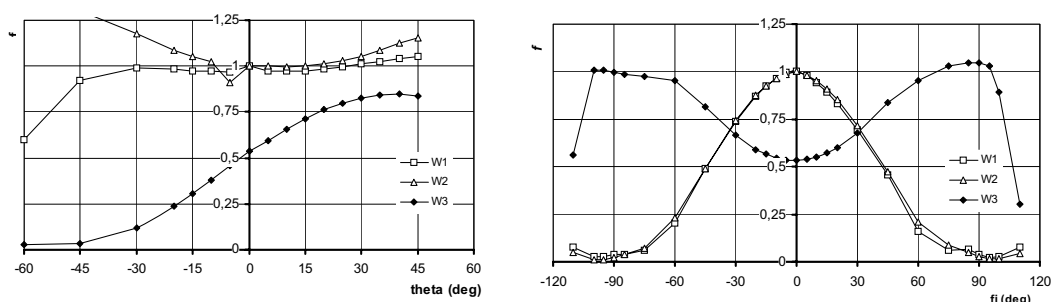
Výsledky směrových kalibrací jsou pro jednotlivé sondy vidět na grafech 1, 2 a 3. jako funkce  $f(\varphi)$ , resp.  $f(\vartheta)$ , analogicky s definicí (1). V prvním případě se u rovnoběžných drátků jedná přímo o směrové funkce  $f(\alpha)$ , neboť  $\alpha_{1,2} = \varphi_{1,2}$ .



Graf 1a a 1b. Průběh funkcí  $f(\vartheta)$ , resp.  $f(\varphi)$  drátků sondy A při natáčení v rovině  $xy$ , resp.  $xz$ .



Graf 2a a 2b. Průběh funkcí  $f(\vartheta)$ , resp.  $f(\varphi)$  drátků sondy B při natáčení v rovině  $xy$ , resp.  $xz$ .



**Graf 3a a 3b.** Průběh funkcí  $f(\vartheta)$ , resp.  $f(\varphi)$  drátků sondy C při natáčení v rovině  $xy$ , resp.  $xz$ .

Z grafů je vidět, u sondy se dvěma zkříženými žhavenými čidly je rovnost jejich efektivních rychlostí ochlazování značně narušena již při malých úhlech v obou rovinách. U sondy s rovnoběžnými čidly při natáčení sondy v rovině  $xz$  platí shoda směrových funkcí, tedy i efektivních rychlostí ochlazování, obou drátků v širokém rozmezí úhlů  $\varphi$ ; v intervalu  $(-50^\circ; 50^\circ)$ . Při natáčení sondy v rovině  $xy$  je však přijatelná shoda jen v úzkém intervalu úhlů  $\vartheta$ ; zhruba  $(-10^\circ; 10^\circ)$ .

## 5. Závěr

Z provedených měření, která jsou znázorněna ve formě srovnání směrových funkcí jednotlivých čidel vyplývá:

- 1) u sondy se dvěma zkříženými žhavenými čidly je rovnost jejich efektivních rychlostí ochlazování značně narušena již při malých úhlech (řádu stupňů v každém směru), které svírá vektor rychlosti s osou sondy. Tato sonda je tedy nejméně vhodná pro měření v prouděch s neznámým směrem střední rychlosti a také při velké intenzitě turbulence.
- 2) Lepší vlastnosti má vykazuje sonda se dvěma rovnoběžnými čidly, která jsou zároveň kolmá na podélnou osu sondy. Tato konfigurace čidel umožňuje dostatečně přesné určení koncentrace a poté i rychlosti proudění pokud průmět vektoru rychlosti do roviny procházející osou sondy a rovnoběžnou s čidly svírá s osou sondy úhel z intervalu  $\pm 60^\circ$  - avšak složka rychlosti kolmá k této rovině nesmí svírat s osou sondy úhel větší než  $\pm 10^\circ$ .
- 3) Sonda se třemi čidly má z hlediska přesnosti určení koncentrace směsi přibližně stejné vlastnosti jako sonda se dvěma paralelními čidly, neboť takovou dvojici čidel obsahuje. Zlepšit směrové vlastnosti je pravděpodobně možné jen zvětšením rozteče elektrod každého čidla, čímž se omezí deformace proudového pole těmito elektrodami v místě aktivních částí čidel.

Tato práce byla vykonána s cílem experimentálně zjistit směrové vlastnosti sond s více čidly. Byly popsány tři typy sond se dvěma žhavenými čidly, které byly zhotoveny v Ústavu termomechaniky AVČR pro současné měření rychlosti a koncentrace v proudě směsi dvou plynů a je také uvedeno porovnání jejich základních vlastností.

## 6. Poděkování

Tato práce byla vykonána v rámci řešení projektu GA MŠMT ČR OC 114-COST 732.

## 7. Literatura

- Way, J., Libby, P.A. (1970): *Hot-Wire Probes for Measuring Velocity and Concentration in Helium-Air Mixtures*. AIAA Journal, 8, 5, pp.976-978.
- Sakai, Y., Watanabe, T., Kamohara, S., Kushida, T., Nakanuta, I. (2001): *Simultaneous measurements of concentration and velocity in a CO<sub>2</sub> jet issuing into a grid turbulence by two-sensor hot-wire probe*. Int. J. of Heat and Fluid Flow, 22, pp.227-236.
- Mazur, O., Jonáš, P., Uruba, V. (2008): *Problematika měření koncentrace a dvou složek rychlosti v proudu směsi dvou plynů*. Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2008. ISBN 978-80-8070-826-9. pp. 17-22.