



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**DVĚ METODY MĚŘENÍ RYCHLOSTI A KONCENTRACE V PROUDU SMĚSI
DVOU PLYNŮ**

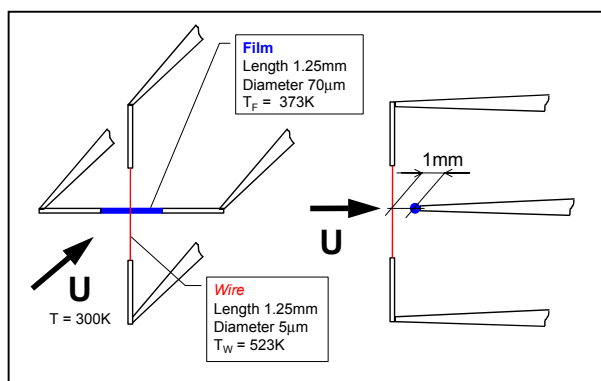
Mazur O., Jonáš P., Šarboch J., Uruba V.*

Summary: The small aerodynamic facility with variable gas density, concentration of the air-helium mixture and flow velocity is described. Next the procedure of mixing the preselected concentration of mixture is characterized. Then two methods of measurement velocity and concentration of a mixture flow are presented. The first one make use of a two heated sensors probe and allows us to draw instant values of velocity and concentration from the outputs of a thermoanemometer. A single hot-wire probe is applied at measurement by the second method. Then only time averaged values and statistical characteristics are gained from measurement.

Key words: flow of air-helium mixture, hot-wire anemometry for gas mixture flows, aerodynamic facility with variable gas density

Ověřování výpočtových modelů šíření emisí v mezní vrstvě atmosféry se provádí fyzikálním modelováním v aerodynamickém tunelu, kde se emise simulují vhodným plynem vypouštěným z vhodně umístěné trysky do vzdušného proudu. Při tom je třeba mapovat jak pole rychlosti proudění, tak pole koncentrace plynu simulujícího emise ve sledované oblasti. Měření těchto veličin se často provádí pomocí anemometru se žhavenými elementy a za pomoci speciálních postupů pro sběr a zpracování dat.

Pro současné měření rychlosti proudění a molární koncentrace v proudě směsi dvou plynů známých fyzikálních vlastností byla zhotovena kombinovaná sonda se dvěma žhavenými elementy. Jeden z nich tvoří poplatinovaný wolframový drátek o průměru 0,005 mm, jehož aktivní délka je 1.25 mm. Druhý element tvoří tenká niklová vrstvička napařena na povrch křemíkového vlákna o průměru 0.07 mm, jejíž aktivní délka je rovněž 1.25 mm. Tyto žhavené elementy jsou



Obr. 1: Sonda se dvěma žhavenými čidly

* RNDr. Pavel Jonáš, DrSc., Oton Mazur, promováný fyzik, Ing. Jaroslav Šarboch, , Ing. Václav Uruba, CSc., všichni Ústav termomechaniky AV ČR, Dolejškova 5, 182 00 Praha 8, e-mail: jonas@it.cas.cz, mazur@it.cas.cz, uruba@it.cas.cz.

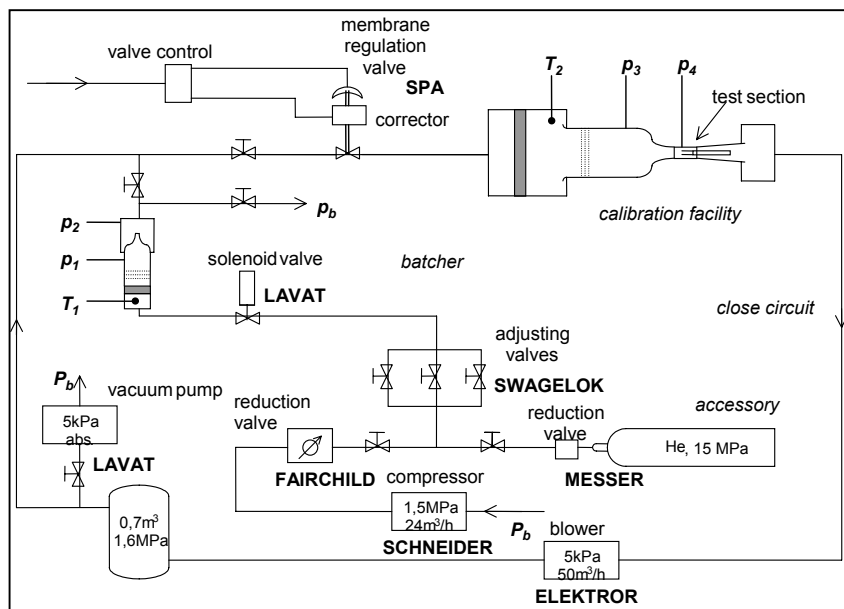
připevněny k soustavě čtyř rovnoběžných přívodních jehel tak, že jsou kolmé jak k sobě navzájem, tak k podélné ose sondy, přičemž vzdálenost mezi nimi je zhruba 1 mm. Tato sonda vznikla přestavbou komerčně dostupné sondy DANTEC typ 55R52, která spočívala v tom, že byl odstraněn návětrný element se žhaveným filmem a nahrazen drátkem z taktéž komerčně dostupného zásobníku náhradních drátků s pozlacenými konci. Při měření byla osa sondy nastavována rovnoběžně s vektorem střední rychlosti proudění. Schématický náčrt této sondy je na Obr.1.

Kalibrace

popsané sondy byla prováděna ve speciálně k tomuto účelu postaveném malém cirkulačním hermeticky uzavřeném aerodynamickém tunelu s válcovým měřicím prostorem o průměru 14 mm, kterému předchází uklidňovací komora s řadou 6-ti sítí a dýza s plošnou kontrakcí cca 18,4.

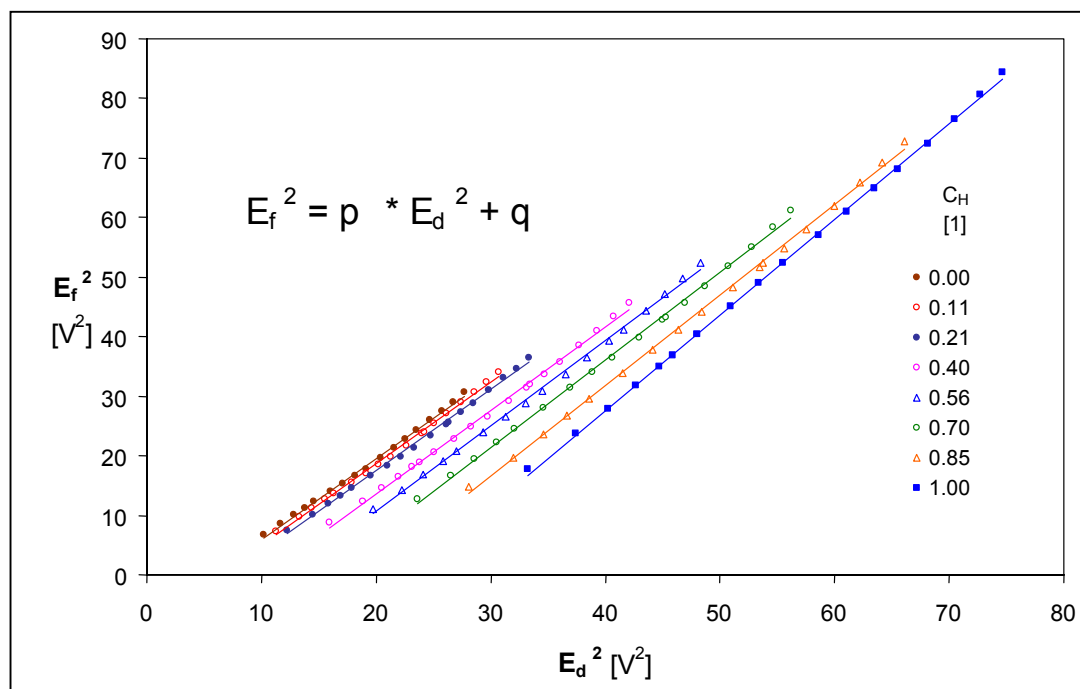
Podrobný popis celé kalibrační trati je v práci [1] a její zjednodušené schéma je uvedeno na Obr.2. V této trati byla vytvářena směs vzduchu a helia, jehož požadované hodnoty molární koncentrace C_H bylo dosahováno vpouštěním do tunelu předem určeného hmotnostního množství helia z tlakové láhve nebo vzduchu z tlakové nádoby přes dávkovací zařízení vybavené měrnou dýzou. Tento postup je popsán v práci [2]. Pohyb směsi v tunelu vyvolává v něm zabudované dmychadlo s bočním kanálem, které je poháněno elektromotorem, jehož otáčky jsou řízeny frekvenčním měničem ovládaném buď ručně nebo počítačem. Tímto uspořádáním bylo dosaženo dostatečně jemné regulace rychlosti proudění v měřicím prostoru a její stálosti během odečítání měřených veličin.

Kalibrace kombinované sondy probíhala tak, že při každé hodnotě ze zvolené řady molárních koncentrací helia C_H byla provedena rychlostní kalibrace obou žhavených čidel sondy současně v jistém intervalu malých rychlostí proudění směsi, při které návětrný žhavený drátek byl žhaven na teplotu 523 K a závětrný žhavený film na teplotu 373 K. Při třech vybraných hodnotách rychlosti z daného intervalu byla ještě u každého čidla zvlášť provedena teplotní kalibrace, která spočívala v tom, že se u daného čidla nastavovala teplota žhavení postupně na několik hodnot okolo příslušné pracovní teploty, přičemž žhavicí teplota druhého čidla zůstávala rovna jeho výše vyznačené pracovní teplotě. Při těchto kalibracích byla měřena výstupní napětí obou kanálů anemometru E_d a E_f , z nichž první byl připojen ke žhavenému drátku a druhý ke žhavenému filmu. Zároveň byly měřeny veličiny, z nichž bylo možno určit stavové veličiny směsi v měřicím prostoru p_s a T_s a tlakový spád na měrné dýze p_D . Z tohoto souboru veličin byly postupně vypočteny hodnoty rychlosti proudění směsi U_s v měřicím prostoru a kvadráty výstupních napětí E_d^2 a E_f^2 obou anemometrů. Vedle



Obr. 2: Schéma kalibrační trati.

toho byly pak při každé koncentraci helia C_H vypočteny hodnoty součinitele dynamické vazkosti μ_s podle práce [3] součinitele její tepelné vodivosti λ_s podle práce [4] a specifické teplo při stálém tlaku c_p podle hmotnostní koncentrace helia, která je však funkcí jeho molární koncentrace. Tyto fyzikální charakteristiky umožnily pak výpočet Nusseltova čísla Nu_s a Reynoldsova čísla Re_s drátku a Prandtlova čísla směsi Pr_s .



Obr. 3: Kalibrace kombinované sondy ve směsi vzduchu a helia.

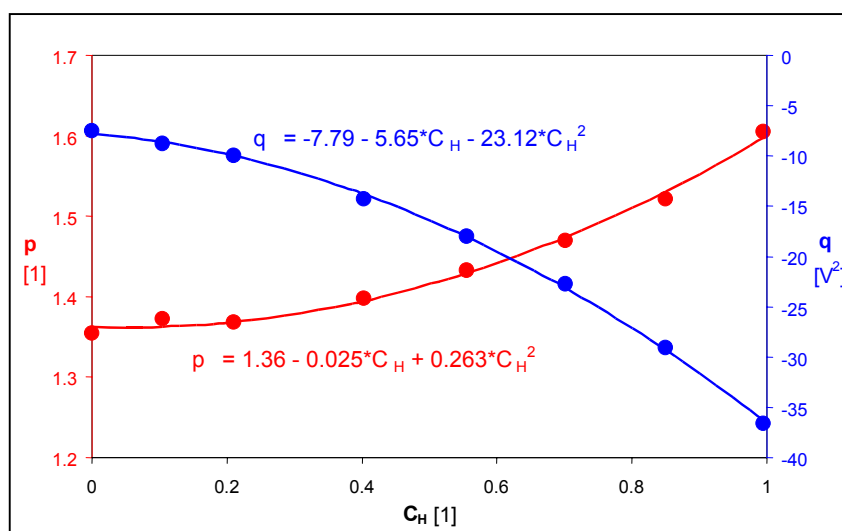
Z uvedených veličin byly pro metodiku měření kombinovanou sondou sestaveny dvě kalibrační mapy. V první, která je znázorněna na Obr 3, byly vyneseny závislosti E_f^2 na E_d^2 vždy pro danou hodnotu C_H , které vytvořily soustavu přímek

$$E_f^2 = p E_d^2 + q$$

ve shodě s prací [5], které se ve zvoleném intervalu rychlostí vzájemně neprotínají.

Směrnice p těchto přímek stejně tak jako jejich volný člen q závisí však na molární koncentraci helia, tedy $p = p(C_H)$ a také $q = q(C_H)$. Ukázalo se opět ve shodě s prací [5], že veličiny p a q lze aproximovat dostatečně přesně polynomy druhého stupně v C_H , tedy

$$p = p_0 + p_1 C_H + p_2 C_H^2, \\ q = q_0 + q_1 C_H + q_2 C_H^2.$$



Obr. 4: Aproximace koeficientů p, q polynomy druhého stupně.

Tato skutečnost je dokumentována na Obr.4.

Rovnice přímkové závislosti mezi kvadráty výstupních napětí obou termoanemometrů může pak být upravena na tvar

$$(p_2 E_d^2 + q_2) C_H^2 + (p_1 E_d^2 + q_1) C_H + p_0 E_d^2 - E_f^2 = 0,$$

kteřá má tvar kvadratické rovnice pro molární koncentraci C_H . Změříme-li pak v proudě směsi vzduchu a helia s neznámou koncentrací výstupní napětí termoanemometrů E_d a E_f , můžeme s touto kvadratickou rovnicí určit hledanou molární koncentraci, přičemž bereme ten její kořen, který leží v intervalu $<0,1>$.

Druhá kalibrační mapa byla vytvořena vynesemím ochlazovacího zákona žhaveného drátku jakožto závislosti Nusseltova čísla na jeho Reynoldsově číslu pro každou hodnotu koncentrace helia. Opět shodně s prací [5] a také s rozбором provedeným v práci [6] bylo zjištěno, že Nusseltovo číslo drátku je při dané koncentraci helia a dané teplotě směsi lineární funkcí určité mocniny N Reynoldsova čísla Re_s , která nezávisí na koncentraci C_H . Na této veličině však závisí parametry A a B zmíněného lineárního vztahu

$$Nu_s = A + B(Re_s)^N,$$

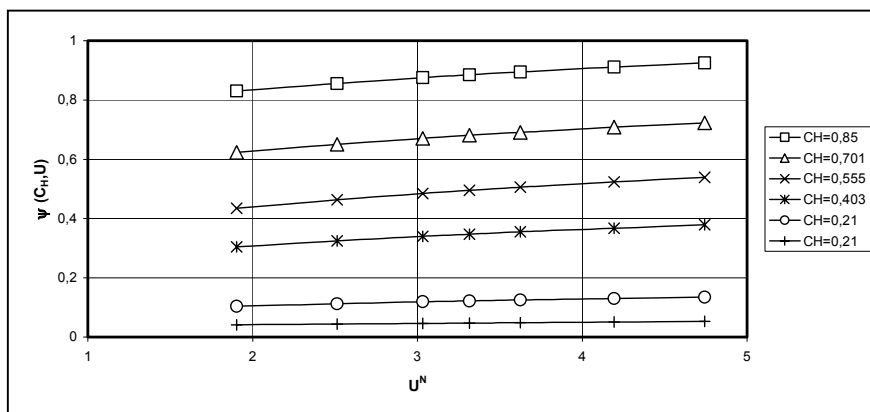
kteřé lze však vypočítat spolu s konstantou N numerickým zpracováním při kalibraci zjištěných průběhů závislosti Nu_s na Re_s pro různé hodnoty C_H . Aproximujeme-li opět takto získané průběhy parametrů $A(C_H)$ a $B(C_H)$ vhodnými polynomy, můžeme pak určit hodnoty těchto parametrů pro libovolné C_H a tím získat ochlazovací zákon žhaveného drátku platný při dané molární koncentraci helia. Určení rychlosti proudění směsi je pak již nasnadě.

Provedeme-li rychlou digitalizaci všech potřebných veličin při měření kombinovanou termoanemometrickou sondou v proudě směsi vzduchu a helia a zaznamene-li je na paměťová média, můžeme následně shora popsáním způsobem určit okamžité hodnoty jak podélné složky rychlosti proudění směsi, tak molární koncentrace helia v místě sondy a obvyklými statistickými postupy pak dále vypočítat potřebné momenty těchto veličin.

Druhý způsob měření vyžaduje pouze anemometr s jediným žhaveným elementem, kterým je zpravidla žhavený drátek. Při měření je nutné postupně provést sérii pozorování výstupního elektrického napětí anemometru při různých teplotách žhavení čidla. Odtud plyne, že tato metoda je použitelná jen při experimentech ve statisticky stacionárních podmínkách a skýtá pouze časově střední hodnoty charakteristik rychlosti a koncentrace - jednoduchých i smíšených momentů rozdělení pravděpodobnosti. V našem případě bylo měření metodou stupňovitě žhaveného drátku provedeno s využitím návětrného drátku kombinované sondy. Byla testována platnost předpokladů se kterými je metoda v úpravě autorů [8] teoreticky odvozená. Pro směs vzduchu a helia byly experimentálně ověřeny základní předpoklady teorie měření středních hodnot a jednoduchých i smíšených momentů pravděpodobnosti rychlosti a koncentrace směsi plynů pomocí anemometru se žhaveným drátkem (CTA). Oprávněnost učiněných předpokladů byla potvrzena s výjimkou předpokladu o vztahu mezi kvadráty elektrického napětí na žhaveném drátku ve vzduchu, heliu a jejich směsi

$$\psi = \frac{E_S^2 - E_A^2}{E_H^2 - E_A^2}$$

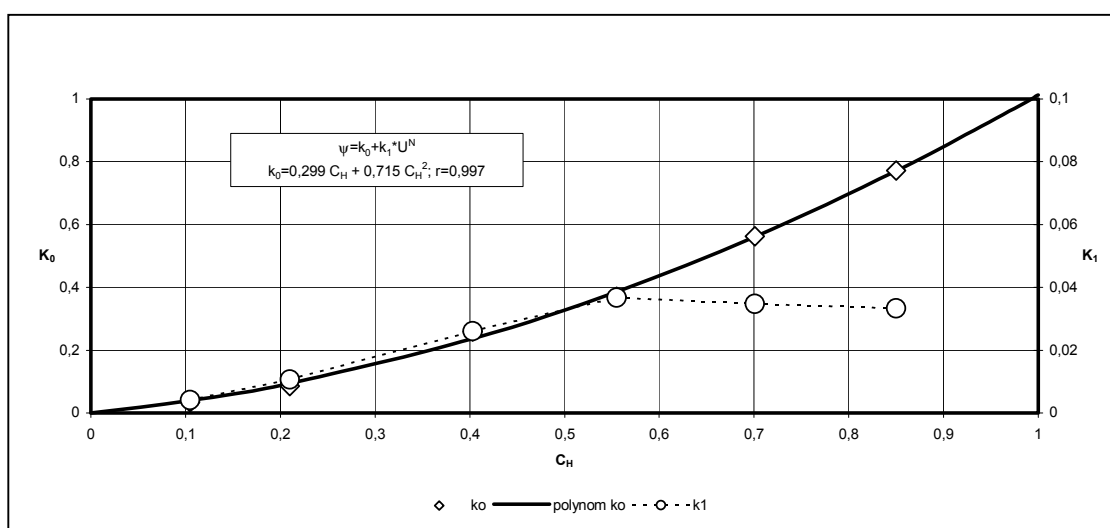
kde indexy S, A a H označují výstupní napětí na drátku při ofukování proudem směsi, vzduchu a helia při dané rychlosti, teplotě a tlaku proudící tekutiny. Podle literatury, např. McQuaid a



Obr. 5: Závislost funkce ψ na rychlosti a koncentraci směsi.

Wright [7] by měla být funkce ψ závislá pouze na koncentraci. Byla ovšem zjištěna i jistá závislost na rychlosti proudění, což je znázorněno na Obr.5, kde jsou vyneseny průběhy funkce ψ v závislosti na mocnině N rychlosti proudění. Je zřejmé, že je nutné uvažovat funkci ψ jako funkci dvou proměnných-koncentrace C_H a rychlosti U -ve tvaru

$$\psi = K_0 + K_1 U^N.$$



Obr. 6: Parametry empirické formule pro funkci ψ .

Na Obr.6 jsou znázorněny průběhy parametrů této formule vypočtené pomocí lineární regrese (vesměs byl korelační koeficient $r=0.995$). Koeficient K_0 roste parabolicky s koncentrací helia. Vysvětlení podivného průběhu koeficientu K_1 bude nutno dále hledat. Z rozborů údajů znázorněných na posledních dvou obrázcích plyne, že tvar funkce ψ je možno z kalibrace žhaveného drátku odvodit i když je složitější, než se původně podle dostupných literárních pramenů předpokládalo. Navržený postup bude proto jen poněkud složitější ve výpočtech střední rychlosti a střední koncentrace.

Závěr

Byla odzkoušena metodika současného měření rychlosti a koncentrace v proudě směsi vzduchu a helia pomocí anemometru s kombinovanou sondou se dvěma

žhavenými elementy, z nichž jedním je wolframový drátek o průměru 0,005 mm a druhý tvoří tenký niklový film napařený na křemíkové vlákno o průměru 0,07 mm. Byla zvládnuta technologie výroby těchto sond a bylo vybudováno sofistikované zařízení pro jejich cejchování nejen ve vzduchu či heliu nebo jejich směsi s libovolnou koncentrací ale v libovolném neagresivním plynu nebo směsi takových plynů při velmi malé jejich spotřebě. Byly též vypracovány speciální postupy měření, sběru a zpracování dat při takovýchto měřeních. Získané výsledky při řešení této problematiky jsou plně v souladu s výsledky jiných autorů, kteří se zabývali podobnou tematikou.

Pro směs vzduchu a helia byly též experimentálně ověřeny základní předpoklady teorie měření [8] středních hodnot a jednoduchých i smíšených statistických momentů rychlosti a koncentrace helia ve směsi pomocí anemometru s jedním žhaveným drátkem. Oprávněnost učiněných předpokladů byla potvrzena s výjimkou předpokladu o vztahu mezi kvadráty výstupního elektrického napětí termoanemometru ve vzduchu, heliu a jejich směsi. Navržený postup bude proto jen poněkud složitější ve výpočtech středních hodnot rychlosti a koncentrace helia.

Poděkování

Tato studie se uskutečnila v rámci Pilotního projektu Ústavu termomechaniky AV ČR č.:50177 a s využitím některých výsledků řešení projektu č.:A2076903 podporovaného Grantovou agenturou Akademie věd České republiky.

Literatura:

- [1] Mazur O., Řehák V.: Small aerodynamic facility with variable gas density. Proc. Int. Conf. „Engineering Mechanics 2001“, May 14-17, 2001 Svratka, 331-332.
- [2] Mazur O., Řehák V., Šarboch J., Uruba V.: Tvorba směsi vzduchu a helia a určování jejich koncentrace v hermeticky uzavřené kalibrační trati. Proc. Colloquium FLUID DYNAMICS 2001, Institute of Thermomechanics AS CR Prague (2001), 59-62.
- [3] Wilke C.R.: A viscosity equation for gas mixtures. J. Chem. Physics 18, 4 (1950) 517-519.
- [4] Mason E.A., Saxena S.C.: Approximate formula for the thermal conductivity of gas mixtures. Phys. Fluids 1, 5 (1958) 361-369.
- [5] Harion J.L., Favre-Marinet M., Camano B.: An improved method for measuring velocity and concentration by thermo-anemometry in turbulent helium-air mixtures. Experiments in Fluids 22 (1996), 174-182.
- [6] Mazur O.: The behavior of hot-wire and hot-film anemometers in gas mixtures. Proc. Int. Conf. „Engineering Mechanics 2000“, May 15-18, 2000 Svratka, Vol.4, 179-184.
- [7] McQuaid J., Wright W.: The response of hot-wire anemometer in flows of gas mixtures. Int. J. Heat Mass Transfer 16 (1973), 819-828.
- [8] Jonáš P., Mazur O.: Contribution to hot-wire measurement in gas mixtures flow. ZAMM- Z. Angew. Math. Mech. 81 (2001) S2,S421-S422.