
**""EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE
""TEMPERATURE SENSITIVITY OF THE HOT-WIRE/FILM
""PROBES AND TEMPERATURE CORRECTION**

P. Antoš *

Summary: *The paper deals with the fluid temperature effect on the hot-wire anemometer output signal. There is described a correction method which compensate for fluid temperature drift in a constant-temperature anemometer operation. A calibration rig for the sensitivity determination has been manufactured.*

1. Úvod

Žhavené anemometrické sondy se používají zejména k měření středních a flukтуаčních složek rychlosti nebo teploty. Citlivá část sondy je tvořena kovovým tělískem (drátem malého průměru nebo kovovým povlakem), které je ohříváno průchodem elektrického proudu (Jouleovým teplem) a ochlazováno účinkem okolního proudícího média. Ochlazování při nucené konvekci ovlivňuje zejména hmotnostní tok a teplota proudu tekutiny. Z elektrického příkonu (resp. napětí na můstku, který je vyvažován zesilovačem při režimu anemometru CTA) senzoru se usuzuje na velikost veličin proudění. Tepelná bilance ve stacionárním stavu:

$$Q_J = Q_C + Q_p \quad (1)$$

Q_J je Jouleovo teplo, Q_C je teplo odváděné konvekci a Q_p teplo odváděné kondukcí do držáku drátku (těla elementu v případě filmu). V anemometrické praxi se Q_p zanedbává, ačkoliv je pro sondy s malou štíhlostí významné. Celkový tepelný tok do tekutiny můžeme formálně zapsat:

$$Q_J \equiv Q_C = Q = Q(d_w, l_w, T_w, u, T_f, \rho_f, \mu_f, k_f, c_{pf}) \quad (2)$$

nebo v bezrozměrném tvaru:

$$\frac{Q}{\pi l_w k_f (T_w - T_f)} = Nu = \overline{Nu}_f \left(Re_f, Pr_f, \frac{T_w - T_f}{T_f}, \frac{d_w}{l_w} \right) \quad (3)$$

* Ing. Pavel Antoš, Ústav termomechaniky AVČR, Dolejškova 5, 166 07 Praha 9, tel. +420 265 053 313, p.an@post.cz

Ve vztahu (3) vystupuje teplota tekutiny T_f jednak přímo a jednak nepřímo v čísle Reynoldsově a Prandtlově, kde jsou vlastnosti tekutiny na T_f závislé.

$$\text{Re}_f = \frac{\rho_f \mathbf{u} d_w}{\mu_f}, \text{Pr}_f = \frac{c_{pf} \mu_f}{k_f} \quad (4)$$

V definici Re (vztaženému k průměru drátku) se objevuje dynamická viskozita a hustota tekutiny. Dynamická viskozita závisí výhradně na teplotě a hustota na teplotě i tlaku.

2. Teplotní korekce kalibrační závislosti

Při měření anemometrem v režimu CTA je mírou rychlosti tekutiny u napětí E . Pro danou tekutinu při konstantním tlaku ρ_f a daném nastavení anemometru, které ovlivňuje žhavení (tj. T_w), je výstupní napětí:

$$E = E(u, T_f) \quad (5)$$

V praxi velmi často nastává situace, kdy se měření odehrává při jiné teplotě, než proces kalibrace. Kromě toho se může teplota měnit i během samotného měření. Z předchozího odstavce je zřejmé, že výstupní napětí je na teplotě tekutiny závislé. Chceme-li údaje z provedené kalibrace použít pro vyhodnocení rychlosti, je nutné oddělit vliv změny teploty. Pro malé výchylky rychlosti Δu a teploty ΔT_f lze výchylku napětí vyjádřit (např. podle [2]):

$$\Delta E = S_u \Delta u + S_T \Delta T_f \quad (6)$$

S_u a S_T jsou citlivosti výstupního napětí na změny rychlosti a teploty. Jsou definovány:

$$S_u = S_u(u) = \frac{\partial E(u)}{\partial u} \quad (7)$$

$$S_T = S_T(u) = \frac{\partial E(u)}{\partial T_f}$$

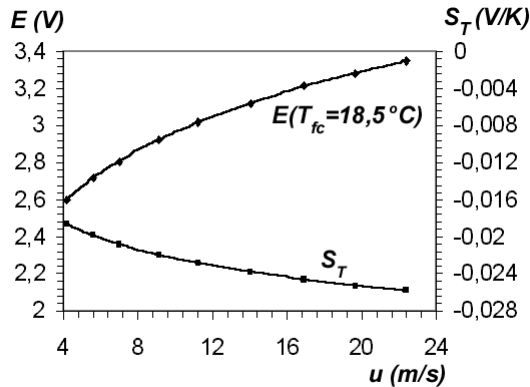
Při znalosti teplotní citlivosti S_T je možné z kalibrační závislosti platné pro T_{fc} zkonstruovat kalibrační závislost pro blízkou teplotu T_f :

$$E(u)|_{T_f} = E(u)|_{T_{fc}} + S_T(u) (T_f - T_{fc}) \quad (8)$$

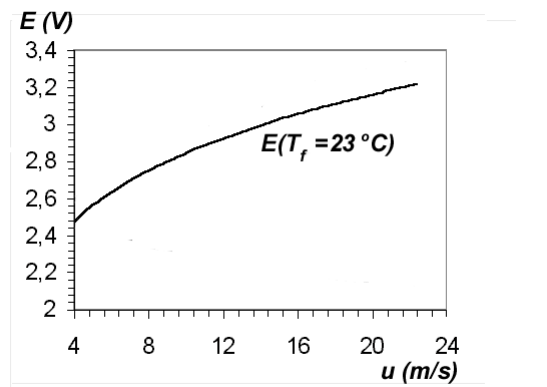
Výsledkem kalibrační procedury jsou dvě závislosti: $E = E(u)|_{T_{fc}}$, $S_T = S_T(u)$. Praktické určení teplotní citlivosti probíhá při zapnutém ohříváči kalibračního tunelu, který zvýší teplotu na $T_{fc} + \Delta T_f$. Teplotní citlivost se vypočte ze vztahu:

$$S_T(u) \cong \frac{E(u)|_{T_{fc} + \Delta T_f} - E(u)|_{T_{fc}}}{\Delta T_f} \quad (9)$$

kde ovšem ΔT_f nemusí být stejná pro všechny hodnoty rychlosti u .



Obr. 1 Naměřené kalibrační závislosti

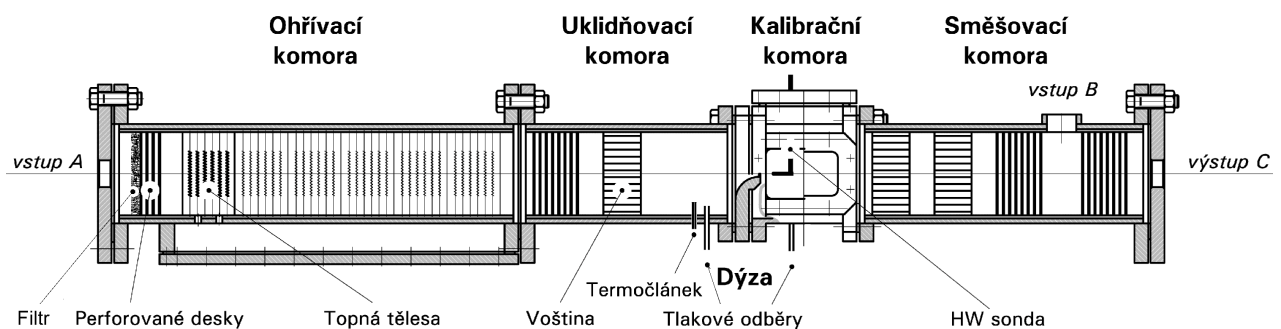


Obr. 2 Vypočtená závislost pro T_f

Příklad provedené kalibrace sondy $T_{fc} = 291,7 \text{ K}$ je na Obr.1 a zkonstruovaná závislost dle (8) pro $T_f = 296,2 \text{ K}$ je na Obr.2.

3. Kalibrační tunel

Ke zjišťování kalibračních závislostí se používá kalibrační tunel, jehož schéma je na Obr. 3. Byl navržen tak, aby při dané teplotě a tlaku umožnil nastavit rychlost proudu. Kalibrační tunel je složen z pěti základních částí. Vedle dýzy je to ohřívací, uklidňovací, kalibrační a směšovací komora. Díly jsou navzájem spojeny šrouby a s krajními přírubami tvoří kompaktní tlakovou nádobu. Vstupy A a B s výstupem C jsou osazeny dvojicí ventilů: kulovým – uzavíracím a sedlovým – regulačním. Průtok vzduchu v tunelu je zajišťován tlakovým spádem mezi vstupem a výstupem. Tunel je připojen k tlakové nádobě o objemu 16 m^3 . Lze ji plnit pomocí kompresorové stanice ústavu pro dílenský rozvod tlakového vzduchu na maximální hodnotu $7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Mezi nádobou a vstupem kalibračního tunelu je pro usnadnění regulace vřazen redukční ventil s rozsahem výstupního tlaku $0,5 \cdot 10^5 - 2,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.



Obr. 3 Konstrukce kalibračního tunelu

Na vstupu do ohřívací komory je umístěno několik vrstev filtrační tkaniny pro separaci tuhých částic, které prošly hrubým filtrem na sání kompresoru a nebo se uvolnily ze stěn potrubí a tlakové nádoby. Za filtrem je vložena soustava perforovaných desek, které vyrovnávají tlak po celém průřezu komory. Ohříváč vzduchu je tvořen soustavou šesti

topných těles řazených za sebou. Jednotlivá topná tělesa mohou být napájena buď napětím 400 V nebo 230 V z třífázové sítě. Příkon jednoho tělesa je 3,8 kW @ 400 V. Hrubá regulace ohřevu spočívá v postupném připojování jednotlivých topných těles. Zařazením regulačního transformátoru mezi pár topných těles a napájecí síť je provedena jemná plynulá regulace. Takto je možno nastavit libovolně velký příkon ohřivače - od nulového až do maximálního (cca 20 kW). Komora má z vnější strany integrovanou skříň pro elektroinstalaci. Uklidňovací komora navazuje na ohřivací a slouží k dokonalému usměrnění proudu. Na jejím začátku jsou umístěny jsou perforované desky. Jak v ohřivací, tak i v uklidňovací komoře je pro zmenšení přestupu tepla do stěn komory vložena isolační výstelka, vyrobená z azbestopolymerní desky. Mezi uklidňovací a kalibrační komorou se nachází dýza. Dýza je rotačně symetrická, s výstupním průměrem je 10,2 mm a plošnou kontrakcí 170. Kalibrační komora má dvě průhledová skla po stranách a víko v horní stěně, kterým prochází sonda. Směšovací komora je poslední částí tunelu. Na začátku komory jsou umístěny voštiny a za nimi perforované desky, poté je z boku přiveden regulovaný proud tekutiny vstupu B. Mezi ním a výstupem se nachází opět soustava perforovaných desek.

Teplota tekutiny je měřena termočlánkem NiCr-Ni, jehož studený konec je na svorkovnici měřicí karty, vybavené měřením vlastní teploty. Rychlost proudu v dýze se určuje z tlakového spádu při uvažování isoetropického stacionárního proudění.

Přetlak v kalibrační komoře stejně jako tlakový spád je měřen tlakovým převodníkem Honeywell ST3000-Smart Transmitter s programovatelným rozsahem.

Všechna data jsou sbírána 16-ti bitovou měřicí kartou National Instruments AT-M10-16XE-50. Ovládací panel měření je vytvořen v programu LabView. Změřené hodnoty jsou ukládány do textového souboru, z něhož se data vyhodnocují v Matlabu pomocí skriptových souborů.



Obr. 4 Kalibrační tunel

4. Závěr

V příspěvku je popsána metoda teplotní korekce kalibrační závislosti výstupního napětí anemometru na rychlosti tekutiny. Tato korekce je vhodná pro malé změny teploty tekutiny. Určení teplotní citlivosti vyžaduje měření při dvou rozdílných teplotách. K tomuto účelu byl navržen a postaven kalibrační tunel pro výzkum vlastností termoanemometrických sond.

5. Literatura

[1] Brunn, H. H.: *Hot-wire anemometry*. Oxford University Press, Oxford, 1995.

[2] Koch, F. A., Gartshore, I. S.: *Temperature effect on hot-wire calibration*, J. Phys. E: Sci. Instrum. 5, 58-61, 1972.

Poděkování projektu GAČR č.101/05/0675 financovanému z rozpočtu ČR.