

## Technická měření v bezpečnostním inženýrství

Čís. úlohy:

3

Název úlohy:

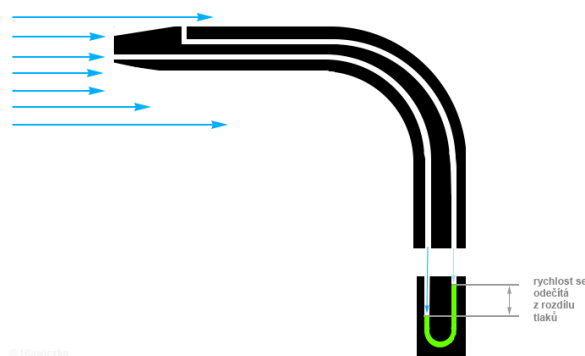
Měření rychlostního profilu aerodynamického tunelu

### Úkol měření

Proveďte měření rychlostního profilu volného proudu v potrubí kruhového průřezu, nakreslete rychlostní profil, vypočítejte objemový a hmotnostní průtok a střední rychlost.

### Obecná část

Prandtl navrhl trubici, u níž je odběr celkového i statického tlaku soustředěn v jednom měřidle (obr. 1). Prandtlova trubice je tvořena válcovým tělesem s parabolickým nebo půlkulovým ukončením. V ose trubice je otvor pro odběr celkového tlaku  $p_c$ , který je vyveden vnitřní trubící. Statický tlak  $p_s$  se snímá v drážce nebo otvoru na plášti vnější trubice a je vyveden druhou trubící. Aby tlak  $p_s$  byl roven tlaku nerozrušeného proudu, je odběr statického tlaku umístěn ve vzdálenosti rovnající se minimálně třem průměrům trubice od jejího ústí.



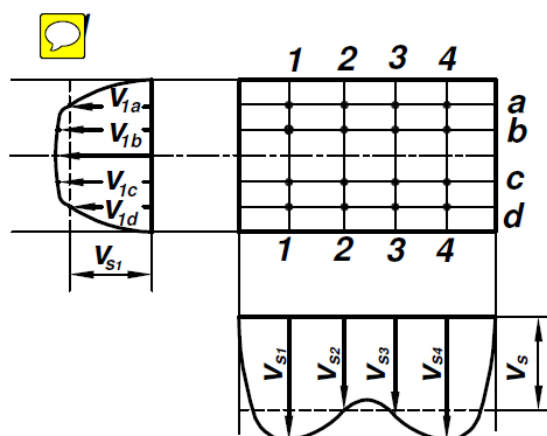
Obr. 1 Prandtlova trubice

Při jednorozměrném proudění, např. v uzavřených kanálech nebo potrubích, při obtékání těles skutečná tekutina na stěně lpí a následkem viskozity je rychlost na stěně nulová. V ostatním průřezu je rychlost nerovnoměrně rozložena po průtočném průřezu. Prandtlovou trubicí se určuje rychlost v místě, v němž je čelo trubice. Posouváním trubice se změní rychlosti, které jsou závislé na souřadnicích. Grafické znázornění průběhu rychlostí po průtočném průřezu se nazývá rychlostní profil.

Má-li se z naměřeného rychlostního profilu vypočítat střední rychlost, zvolí se v průtočném průřezu vhodný počet bodů, ve kterých se změní rychlost (viz obr. 2). Střední rychlost se pak stanoví integrací přes celý průtočný průřez:

$$v_s = \frac{1}{S} \int_S v \, ds$$

Volba počtu bodů nebo rovin je závislá na konkrétních podmínkách. Je-li rychlostní profil nesymetrický, případně vzniká-li zpětné proudění, volí se počet bodů obvykle větší.



Obr. 2 Určení střední rychlosti z rychlostního profilu

Celkový objemový průtok je dán vztahem  $Q_v = S \cdot v_s$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Hmotnostní průtok je hmotnostní množství tekutiny, které proteče daným průtočným průřezem potrubí za jednotku času. Pro hmotnostní průtok pak platí vztah  $Q_m = \frac{m}{t}$  [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Z definice hustoty získáme závislost mezi hmotnostním a objemovým průtokem

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\frac{m}{t}}{\frac{V}{t}} = \frac{Q_m}{Q_v} \Rightarrow Q_m = Q_v \cdot \rho.$$

Po úpravě hmotnostní průtok tekutiny je  $Q_m = S \cdot \rho \cdot v_s$ , kde  $S$  [ $\text{m}^2$ ] je průtočná plocha,  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] je hustota tekutiny a  $v_s$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je střední rychlost proudění tekutiny potrubím.

Hustota plynu se odvodí ze stavové rovnice:

$$pV = nRT, \text{ kde}$$

$p$  je tlak měřeného plynu v potrubí [Pa],

$t$  je teplota měřeného plynu v potrubí [K],

$$M = 28,95 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1},$$

$$R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

### Použité přístroje

Aerodynamický tunel s frekvenčně řízeným ventilátorem, lopatkový anemometr AIRFLOW TA460, Prandtlůva trubice, diferenční tlakoměr ALMEMO k Prandtlově trubici, ocelové měřítko

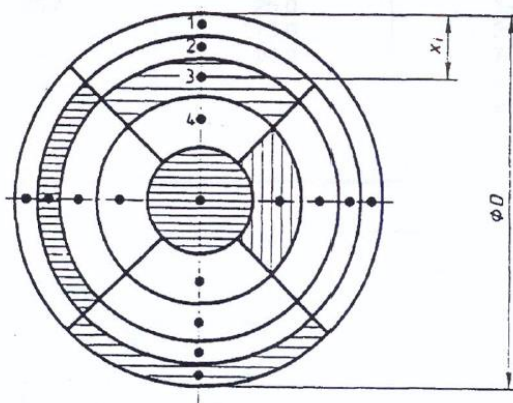
### Postup práce

1. Vnitřní průměr tunelu je 380 mm, vypočtete plochu rychlostního profilu. Načrtněte průřez potrubí, určete počet a polohu vzorkovacích bodů. Minimální počet vzorkovacích (měřicích) bodů je určen rozměry měřicího profilu. Obecně tento počet stoupá s rostoucí plochou průřezu potrubí. Nejmenší počet potřebných vzorkovacích bodů je dán v tabulce 1.

Tabulka 1 Nejmenší počet měřících (vzorkovacích) bodů pro potrubí kruhového průřezu o ploše  $\geq 0,07 \text{ m}^2$ .

Plocha měřícího profilu $\text{m}^2$	Průměr potrubí $\text{m}$	Nejmenší počet měřících přímk (průměrů)	Nejmenší počet měřících bodů na průměr střední bod		Nejmenší počet měřících bodů na průřez střední bod	
			včetně	bez	včetně	bez
0,07 až 0,38	0,3 až 0,7	2	3	2	5	4
0,38 až 0,79	0,7 až 1	2	5	4	9	8
0,79 až 3,14	1 až 2	2	7	6	13	12
> 3,14	> 2	2	9	8	17	16

Plocha měřícího profilu musí být rozdělena na rovnoploché části a měření musí být provedeno ve středu každé části (viz obr. 3). Žádný ze vzorkovacích bodů však nesmí ležet ve vzdálenosti menší než 2 cm od stěny potrubí. Pokud se tento případ vyskytne, musí být Prandtlůva trubice umístěna 2 cm od stěny potrubí. Vzdálenost vzorkovacích bodů od stěny potrubí je uvedena v tabulce 2.



Poznámka – Šrafované části mají stejnou plochu;  $D > 2 \text{ m}$

Obr. 3 Rozmístění vzorkovacích (měřících) bodů v potrubí kruhového průřezu - Základní rozdělení

Tabulka 2 vzdálenost vzorkovacích (měřících) bodů (v procentech průměru  $D$ ) od stěny potrubí, základní rozdělení

Počet měřících bodů $i$	% $D$			
	Počet měřících bodů, $n_i$ , na jeden průměr			
	3	5	7	9
1	11,3	5,9	4,0	3,0
2	50,0	21,1	13,3	9,8
3	88,7	50,0	26,0	17,8
4		78,9	50,0	29,0
5		94,1	74,0	50,0
6			86,7	71,0
7			96,0	82,2
8				90,2
9				97,0

- Nastavte ústí Prandtlůvy trubice pohybem po posuvném zařízení do 1. měřícího bodu (nejlépe střední bod). Při nastavování polohy prvního bodu použijte značek nakreslených na svislém a vodorovném měřítku. Ústí Prandtlůvy trubice musí ležet rovnoběžně s osou měřeného tunelu.

3. Odečtete polohu prvního bodu na vodorovném a svislém měřítku umístěném na posuvném zařízení a stanovte hodnoty na svislém a vodorovném měřítku pro zbývající vzorkovací (měřicí) body.
4. Zapněte lopatkový anemometr a diferenční manometr ALMEMO. Diferenční manometr ALMEMO na displeji zobrazuje kromě diferenčního tlaku také přímo rychlost proudění odpovídající změřenému diferenčnímu tlaku. Zobrazení rychlosti proudění proveďte přepínáním měřených veličin pomocí šipek nahoru a dolů. Před dalším postupem proveďte vynulování měřené rychlosti krátkým stisknutím tlačítka „PROG“ (černě se podbarví údaj o rychlosti a na levé spodní části displeje se zobrazí text „ADJ“) a následným delším stiskem tlačítka přiřazeného k „ADJ“ zobrazenému na spodním okraji displeje. Tento postup je obvykle potřeba několikrát zopakovat, až je na displeji zobrazena nulová rychlost.
5. Přivolejte pedagoga a pod jeho dohledem zapněte ventilátor přepnutím spínače do polohy „I“. Na regulátoru otáček nastavte hodnotu doporučenou pedagogem a vyčkejte ustálení rychlosti proudění v tunelu.
6. Prandtlovou trubicí změřte postupně rychlost proudění ve všech vzorkovacích bodech profilu potrubí. Hodnoty rychlosti zaznamenejte.
7. Po změření proudění ve všech vzorkovacích bodech zaznamenejte také rychlost změřenou lopatkovým anemometrem a odpovídající objemový průtok. Zaznamenejte taktéž teplotu a barometrický tlak vzduchu v potrubí (uvedeno na přístroji AIRFLOW TA460) pro výpočet hmotnostního průtoku.
8. Postup podle bodu 6 a 7 zopakujte 3x při stále stejně nastavené rychlosti proudění – pro výpočet průměrné rychlosti v jednotlivých bodech.
9. Na regulátoru otáček snižte rychlost o 10 a poté o 20 % z původně nastavené hodnoty a opakujte postup měření dle bodu 6 - 8.
10. Vypněte ventilátor otočením spínače do polohy „0“, vypněte jednotku ALMEMO stisknutím a podržením tlačítka „ON“ a lopatkový anemometr AIRFLOW vytažením ze zásuvky.
11. Vypočtete průměrné rychlosti v jednotlivých vzorkovacích bodech pro daná procenta otáček a vykreslete rychlostní profily do grafu.
12. Vypočtete střední rychlost proudění profilu, objemový průtok; vypočtete hustotu proudícího plynu a hmotnostní průtok. Porovnejte vypočtené údaje s hodnotami zapsanými z přístroje AIRFLOW s lopatkovým anemometrem. Okomentujte výsledky.

### **Výsledky - tabulky naměřených hodnot**