

Malý aerodynamický tunel

Bc. Erik Flídr

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc., doc. Ing. Zdeněk Trávníček, CSc., Ing. Zuzana Broučková

Abstrakt:

Tato experimentální práce popisuje malý aerodynamický tunel vhodný pro vizualizaci proudového pole. Byla vyhodnocena rychlost proudění uvnitř měřicí oblasti několika metodami: anemometr se žhaveným drátkem, Prandtlova sonda, Pitotova sonda a videozáznam zviditelněného proudění. Kromě toho je ukázáno použití tunelu pro vizualizaci příčně obtékaného válce v režimu Kármánovy vírové řady.

Klíčová slova:

Malý aerodynamický tunel, vizualizace proudění pole

1. Úvod

Vizualizační tunely vyráběné firmou Feinmechanik, Max Kohl, Aktienges. Chemnitz, byly používány již během druhé světové války při výcviku pilotů válečného letectva. Po válce byly využívány k výuce na českých vysokých školách technického zaměření [1]. Původní uspořádání tunelu popisuje např. Řezníček [2].

Hlavní cíle této práce jsou:

- Popsat malý aerodynamický tunel a kvantifikovat jeho parametry.
- Na případu obtékaného kruhového válce prokázat možnost vizualizace proudového pole.

Při vyhodnocování rychlosti proudění byly použity dvě metody bodového měření:

- Pneumometrická měření – byla použita Prandtlova a Pitotova sonda, přičemž tlaky byly měřeny elektronickými tlakoměry.
- Anemometr se žhaveným drátkem v režimu konstantní teploty drátka (v angličtině "Constant Temperature Anemometry", CTA).

2. Použité metody měření rychlosti proudění

2.1 Pneumometrické metody

Pneumometrické metody jsou založeny na zákonu zachování energie, popsaném Bernoulliho rovnicí. Z Bernoulliho rovnice lze odvodit vztah pro určení rychlosti proudění při známém statickém p_s a celkovém p_c tlaku (viz Noskievič a kol. [3]) ve tvaru:

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (1)$$

kde $\Delta p = p_c - p_s$ je rozdíl celkového a statického tlaku (tlak kinetický) a ρ je hustota vzduchu. Hustota vzduchu se určí ze stavové rovnice ideálního plynu:

$$\rho = \frac{p_b}{rT}, \quad (2)$$

kde p_b je barometrický tlak, T je termodynamická teplota a r je měrná plynová konstanta ($r = 288 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, kde je zohledněna vlhkost vzduchu za běžných podmínek laboratoře).

a) Prandtlova sonda

Prandtlova sonda měla průměr $d = 2 \text{ mm}$. Otvory pro odběry statického tlaku byly umístěny ve vzdálenosti $3d$ od čela sondy, tedy 6 mm (což je vzdálenost, kterou původně navrhl Ludwig Prandtl). Na tlakové převodníky byla sonda připojena dvěma silikonovými hadičkami o vnějším průměru $5,85 \text{ mm}$ a světlosti $4,5 \text{ mm}$.

b) Pitotova sonda

Pitotova sonda byla kolmo zabroušená trubka o vnějším průměru 2 mm a světlosti $1,5 \text{ mm}$. Hadička použitá k připojení sondy na tlakový převodník má vnější průměr $5,85 \text{ mm}$ a světlost $4,5 \text{ mm}$.

2.2 Anemometr se žhaveným drátkem

Určení rychlosti proudění z měření anemometrem je založeno na změně elektrického odporu drátku v závislosti na změně jeho teploty. Tuto změnu způsobuje proudící tekutina, která drátek ochlazuje. Sonda je zapojena do jedné větve Wheatstoneova můstku, kde se měří jeho rozvážení - viz Jørgensen [4].

V této práci byl použit anemometr MiniCTA 54T30 DANTEC, s jednodrátkovou sondou 55P16.

Anemometr pracuje v režimu konstantní teploty drátku (v angličtině "Constant Temperature Anemometry", CTA). Sonda je propojena kabelem A1863 s anemometrem. Výstup anemometru je napojen na svorkovnici CB-68LP, z té je signál veden na kartu NI PCI-6023E. Na kartě dochází ke vzorkování a měření.

Vzorkovací frekvence byla 10 kHz a počet vzorků byl 32768 . Doba jednoho měření tedy byla zhruba $3,3 \text{ s}$. Anemometr byl kalibrován pro rychlosti $0,2 - 43,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2.3 Měření stavových veličin

Stavové veličiny měřené v této práci byly teplota a tlak.

Barometrický tlak byl měřen staničním barometrem Fischer.

Při měření tlaků sondami byl použit tlakový převodník GMSD 2,5MR. Z tlakového převodníku byl signál veden na elektronický manometr GMH 3156.

Teplota byla měřena teploměrem THERM 2280-3. Jako snímač teploty byl použit termistor NTC.

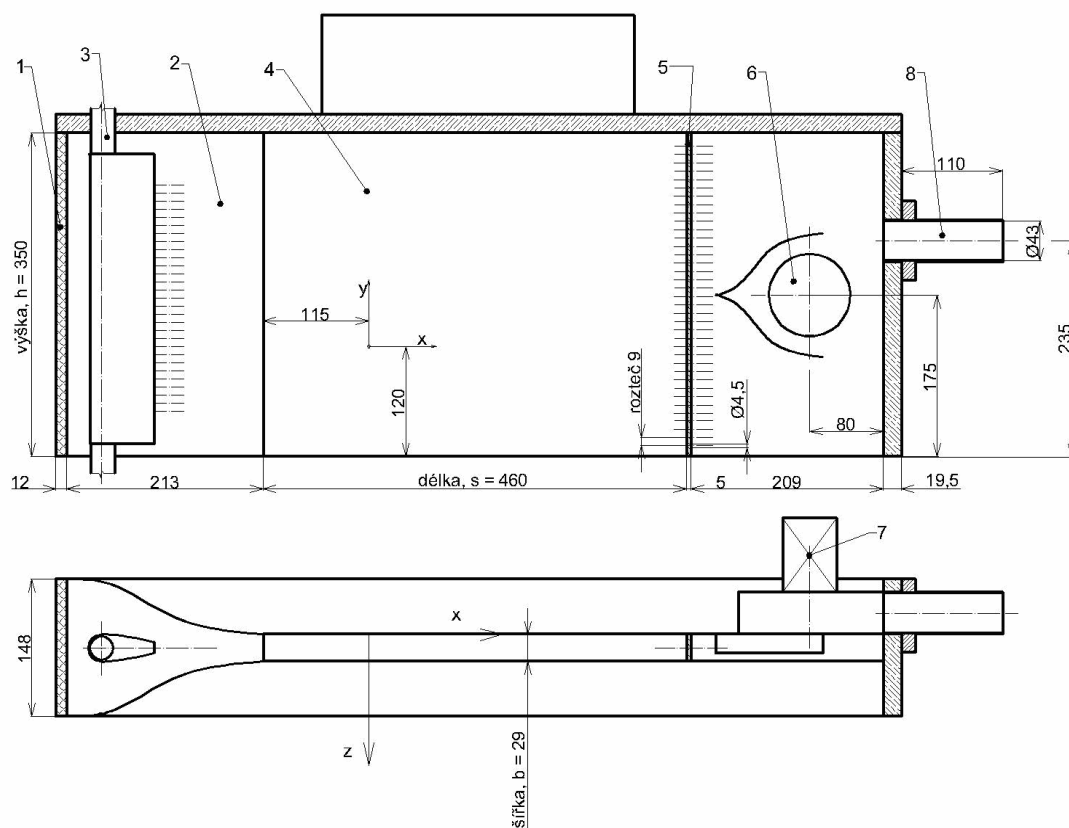
3. Malý aerodynamický tunel

3.1 Popis zařízení

Proudové pole bylo realizováno v malém aerodynamickém tunelu. Jako vizualizační médium byla zvolena vodní mlha tvořená ultrazvukovým generátorem. Osvětlení bylo kontinuální s možností přepnutí do stroboskopického režimu. K záznamu byl použit digitální fotoaparát.

3.1.1 Průtok vzduchu tunelem

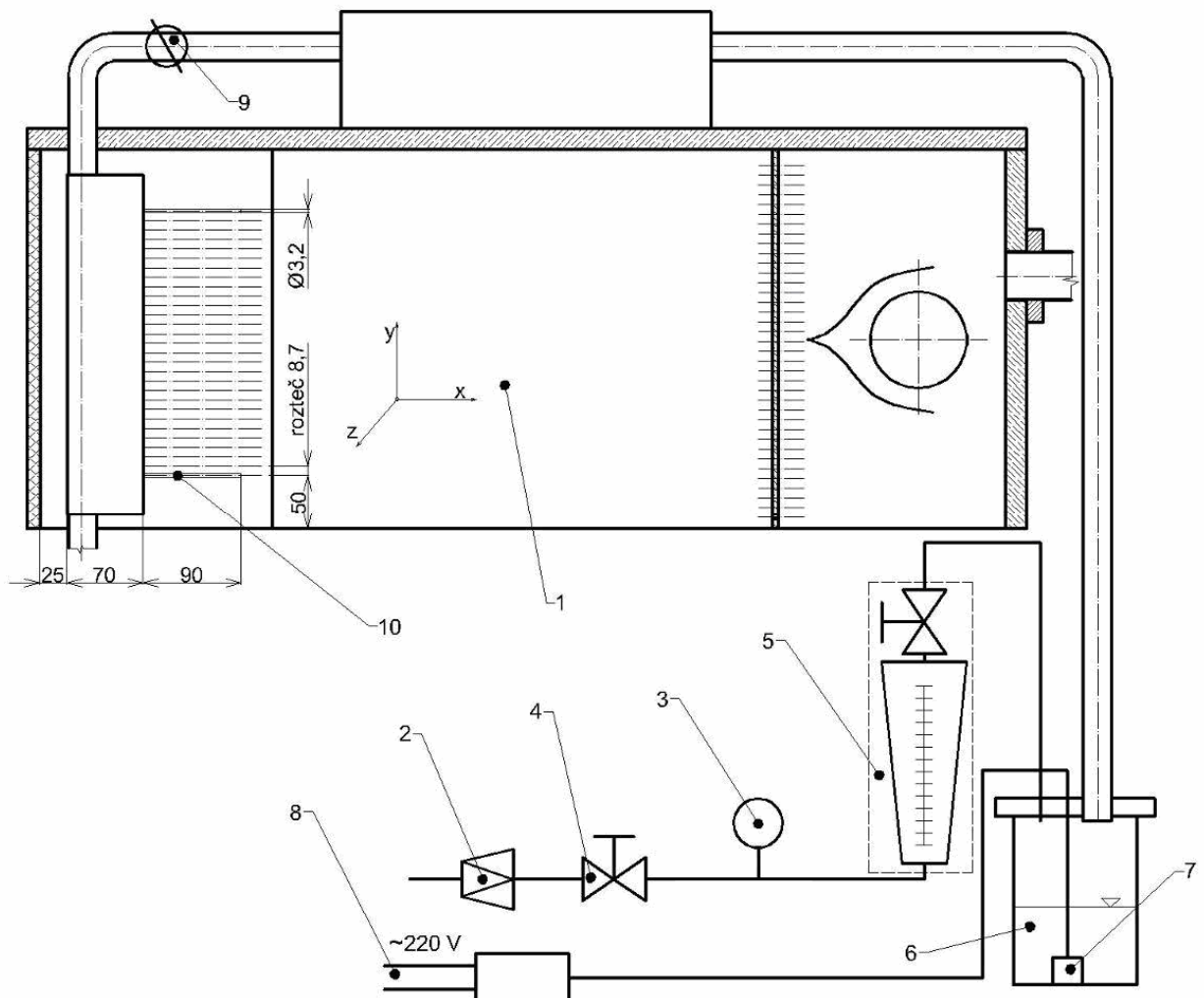
Malý aerodynamický tunel je otevřeného typu, kdy vzduch je nasáván z laboratoře, prochází měřicím prostorem, následně je odsáván ventilátorem a vytlačován ven. Uspořádání tunelu je na Obr. 1. Vstup do tunelu je opatřen dvěma laminarizačními sítmi (1), které snižují flukтуаční složku rychlosti. Za sítě je umístěna tryska (2), která na délce 213 mm plynule zužuje prostor z rozměru 350×148 mm (výška \times šířka) na rozměr 350×29 mm. Uvnitř trysky je na osu tunelu umístěn letecký profil (3), v němž je zabudována trubice pro přívod vizualizačního média. Z trubice je po celé výšce tunelu rovnoměrně rozmístěno 29 rozváděcích trubic. Následuje samotný vizualizační prostor (4) o rozměrech $350 \times 460 \times 29$ mm (výška \times délka \times šířka). Pro docílení co možná nejrovnoměrnějšího proudění je měřicí prostor zakončen přepážkou (5) s 39 otvory rozmístěnými rovnoměrně po celé výšce tunelu. Proudění tunelem je vyvoláno ventilátorem (6), který pohání čtyřpólový synchronní elektromotor (7). U elektromotoru lze snížit otáčky z $n_1 = 25,0 \text{ s}^{-1}$ sériovým předřazením odporu na otáčky $n_2 = 22,7 \text{ s}^{-1}$, a tím dosáhnout nižší rychlosti proudění uvnitř tunelu. Tunel je zakončen výstupní trubicí (8).



Obr. 1 Schéma malého vizualizačního tunelu: 1 – laminarizační síta, 2 – tryska, 3 – přívod mlhy, 4 – měřicí prostor, 5 – přepážka, 6 – ventilátor, 7 – elektromotor, 8 – výstupní trubice.

3.1.2 Vodní mlha

Původním vizualizačním médiem byly kapičky zkondenzovaného oleje odpařované z topného tělesa ohříváného elektrickým proudem [2]. V současnosti je pro vizualizaci využívána vodní mlha. Schéma přívodu mlhy je na Obr. 2. Tlakový vzduch byl přiváděn z rozvodu budovy, dále pokračuje přes redukční ventil (2), manometr (3), regulační ventil (4) k rotametri (5). Z rotametru byl vzduch veden do sklenice (6) skrz otvor v jejím víku. Sklenice byla z části naplněna deionizovanou vodou. V ní byl umístěn ultrazvukový generátor vodní mlhy Mini Nebler (7). Zde byla tvořena mlha. Ta byla ze sklenice odváděna druhým otvorem ve víku a přiváděna hadicí a trubicemi přes klapku (9) k rozváděcím trubicím (10) uvnitř tunelu.



Obr. 2 Schéma přívodu mlhy: 1 – malý vizualizační tunel, 2 – redukční ventil, 3 – manometr, 4 – regulační ventil, 5 – rotametr, 6 – sklenice s vodou, 7 – ultrazvukový generátor vodní mlhy Mini Nebler, 8 – napájení střídavým elektrickým proudem, 9 – klapka, 10 – rozváděcí trubice.

3.1.3 Digitální záznam

Pro záznam obrazu byl použit digitální fotoaparát Canon PowerShot G7, který byl ovládán pomocí PC. Pro tuto práci byla nastavena záznamová frekvence 30 snímků za vteřinu a rozlišení 640×480 pixelů.

Podrobnosti o uspořádání tunelu, včetně jeho osvětlení, a popis použitých měřicích metod lze nalézt ve zprávě [5].

3.2 Proudění v měřicím prostoru

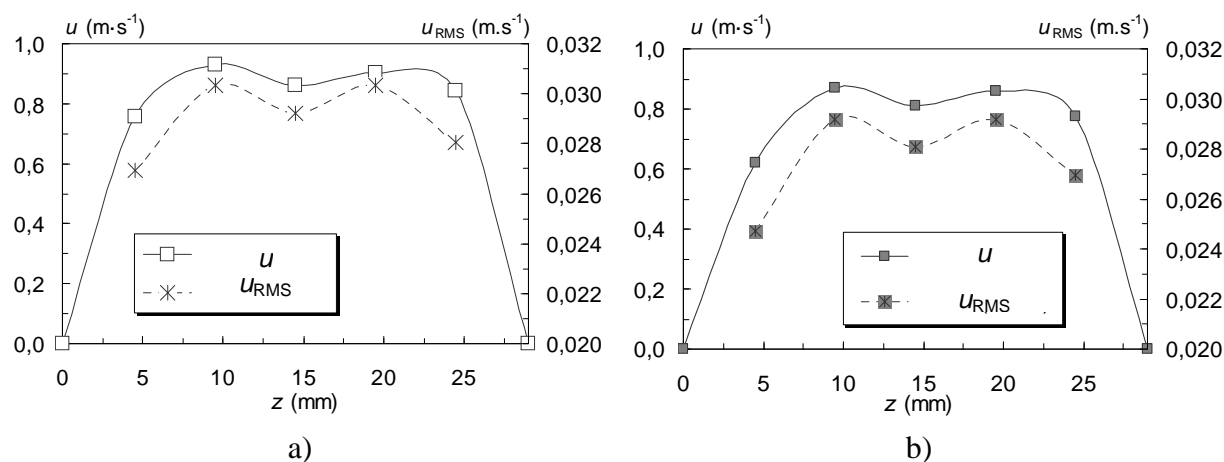
Rychlost proudění byla vyhodnocována třemi metodami:

- anemometrem se žhaveným drátkem umístěným v měřicím prostoru,
- vyhodnocení rychlosti proudění z videozáznamu zviditelněného proudění,
- Prandtlovou sondou nebo anemometrem, umístěnými na výstupu z tunelu.

3.2.1 Měření rychlosti anemometrem

Sonda byla umístěna uvnitř měřicího prostoru otvorem v zadní stěně tunelu v počátku souřadného systému dle Obr. 1. Uvnitř tunelu byly v pěti bodech, definovaných souřadnicemi $x = y = 0$ a $z = (4,5; 9,5; 14,5; 19,5; 24,5)$ mm, změřeny rychlosti proudění.

Takto byly změřeny rychlostní profily proudění při otáčkách n_1 a n_2 . Pro oboje otáčky byly vyhodnoceny i flukтуаční složky rychlosti - viz Obr. 3a) a b).



Obr. 3 Měření CTA: rychlostní profily a flukтуаční složky rychlosti v měřicím prostoru
a) při $n_1 = 25,0 \text{ s}^{-1}$ a b) při $n_2 = 22,7 \text{ s}^{-1}$.

Za předpokladu rovnoměrného profilu po celé výšce měřicího prostoru lze integrací rychlostních profilů získat objemové toky (Q) vztahem:

$$Q = h \int_0^b u dz, \quad (3)$$

kde $h = 350$ mm je výška měřicího prostoru, $b = 29$ mm je šířka měřicího prostoru – viz Obr. 1

Střední rychlost proudu U je pak určena následujícím vztahem:

$$U = \frac{Q}{bh} = \frac{1}{b} \int_0^b u dz. \quad (4)$$

Integrací rychlostních profilů byly určeny střední rychlosti proudění U :

- Pro otáčky ventilátoru n_1 byl průtok $Q = 0,0075 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a tomu odpovídající střední rychlost $U = 0,74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Pro otáčky n_2 byl průtok $Q = 0,0069 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a střední rychlost $U = 0,68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.2.2 Vyhodnocení z videozáznamu

Fotoaparát byly zaznamenávány poruchy vyvolané manipulací klapkou na přívodu mlhy do měřicího prostoru.

Pro pět poruch procházejících měřicí oblastí při otáčkách n_1 i n_2 byl změřen čas. Z těchto časů byl určen průměrný čas průchodu poruchy skrz měřicí prostor pro oboje otáčky ventilátoru. Otáčkám n_1 odpovídal průměrný čas $\tau_1 = 0,688$ s a otáčkám n_2 odpovídal průměrný čas $\tau_2 = 0,816$ s. Ze vztahu pro rovnoměrný přímočarý pohyb byly vyhodnoceny rychlosti proudění:

$$U = \frac{s}{\tau}, \quad (5)$$

kde τ je průměrný čas průchodu poruchy oblastí.

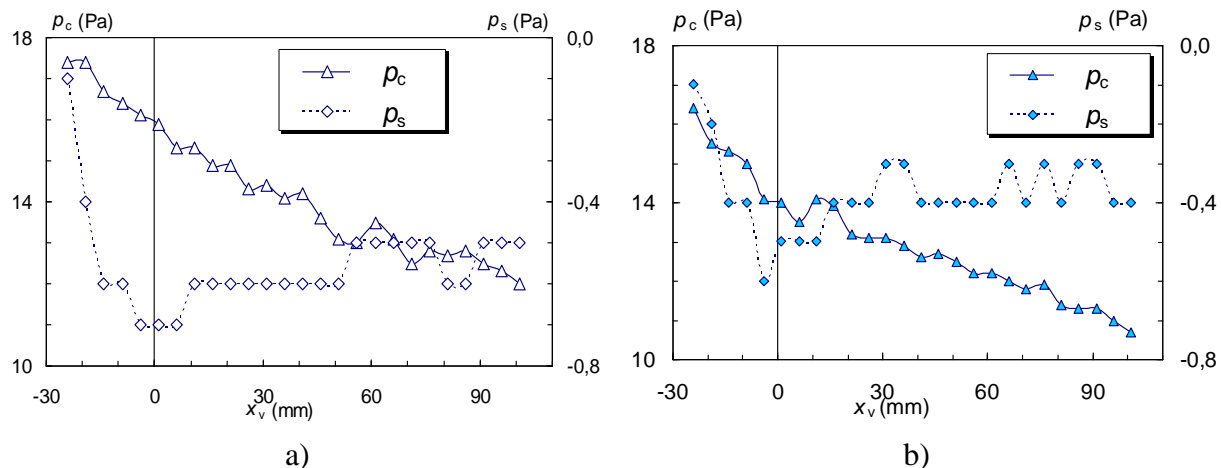
Střední rychlosti proudění pak při otáčkách n_1 byla $U = 0,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a při otáčkách n_2 byla $U = 0,56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Při otáčkách n_1 byl rozdíl od měření anemometrem 13%, při n_2 pak 20%, což je v dobré shodě.

3.2.3 Vyhodnocení z měření na výtoku

a) Prandtlůva sonda

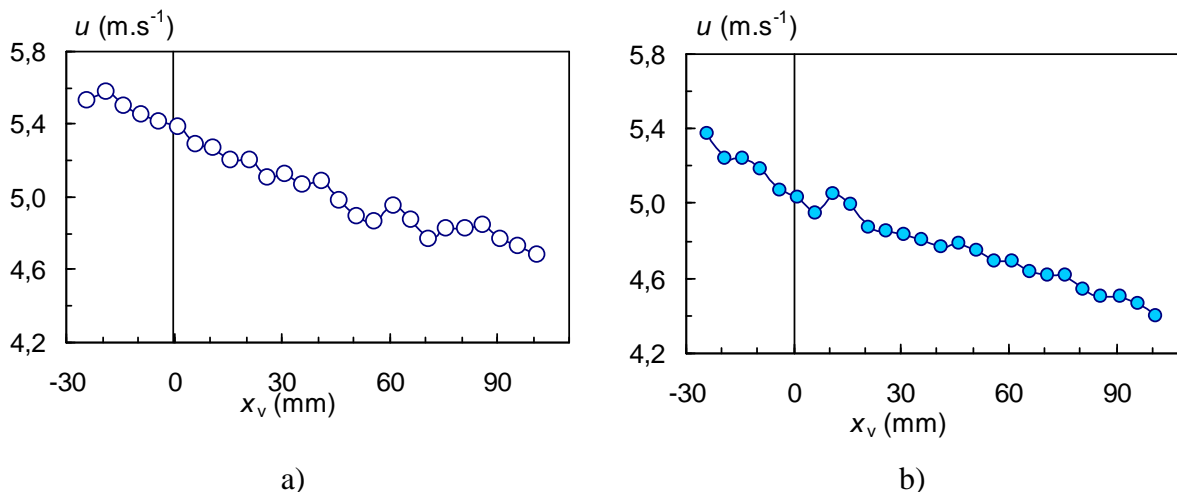
Měření sondou bylo prováděno na konci výstupní trubice (Obr. 1) pro oboje otáčky ventilátoru n_1 a n_2 . Souřadný systém byl zvolen tak, že osa x_v je shodná s osou trubice. Osa r_{A-B} , je zavedena ve vodorovném směru, osa r_{C-D} , potom ve směru svislém.

Nejprve byly měřeny tlakové profily podél osy trubice pro otáčky ventilátoru n_1 a n_2 . Sondou byl měřen celkový a statický tlak, které jsou vidět na Obr. 4a) pro n_1 a na Obr. 4b) pro n_2 .



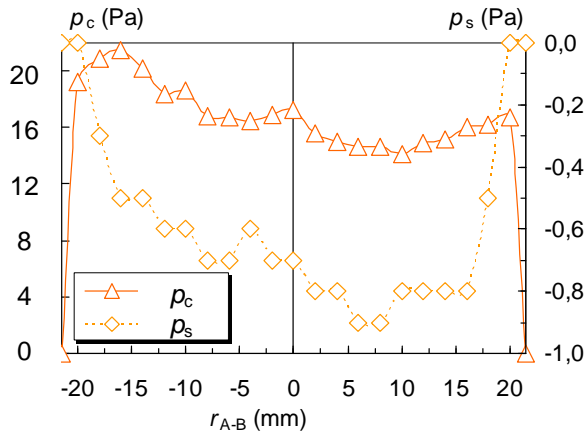
Obr. 4 Průběhy celkových a statických tlaků podél osy x_v a) při $n_1 = 25,0 \text{ s}^{-1}$, b) při $n_2 = 22,7 \text{ s}^{-1}$; měřeno Prandtlovou sondou.

Z těchto tlaků byly následně vztahem (1) vyhodnoceny rychlosti proudění, viz Obr. 5a) a b). Rozsah měření byl $x_v = -24 \text{ mm}$ až 101 mm , s krokem traverzace 5 mm .

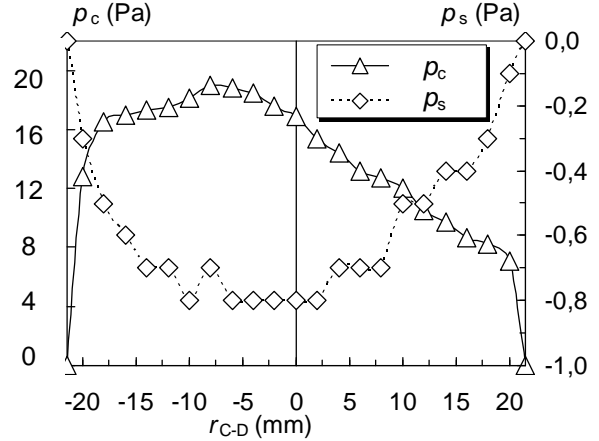


Obr. 5 Průběhy rychlostí podél osy x_v a) při $n_1 = 25,0 \text{ s}^{-1}$, b) při $n_2 = 22,7 \text{ s}^{-1}$ (vyhodnoceno z měření Prandtlovou sondou).

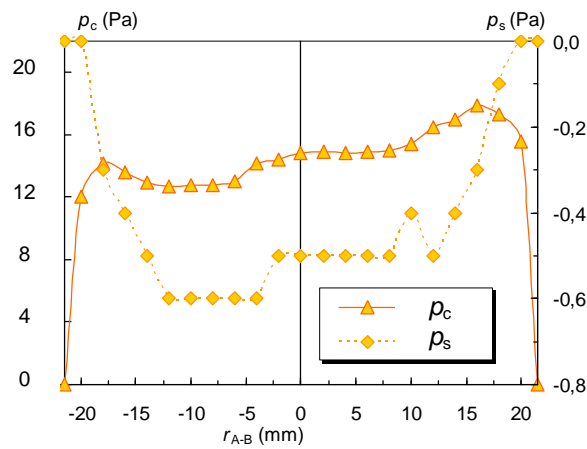
Následně byly změřeny tlakové profily v osách r_{A-B} a r_{C-D} pro $x_v = 1 \text{ mm}$. Rozsah traverzace byl $r_A = -20 \text{ mm}$ až $r_B = 20 \text{ mm}$ a $r_C = -20 \text{ mm}$ až $r_D = 20 \text{ mm}$ (tj. až $1,5 \text{ mm}$ od hrany trubice). Krok traverzace byl 2 mm . Naměřené profily celkového a statického tlaku jsou na Obr. 6a) a b) pro otáčky n_1 , na obr. 6c) a d) pak totéž pro otáčky n_2 . Rozsah teplot byl od $23,1$ do $23,8 \text{ }^\circ\text{C}$.



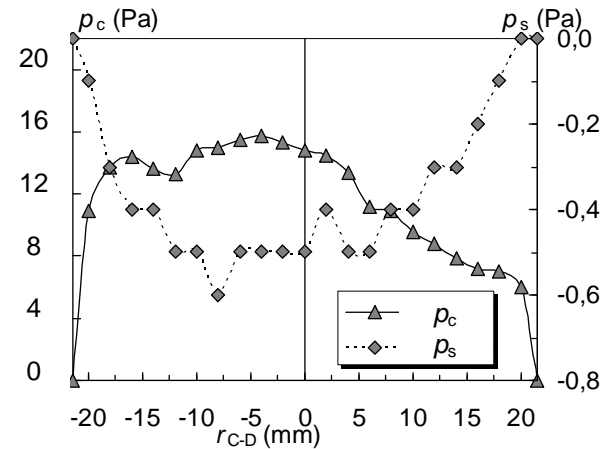
a)



b)



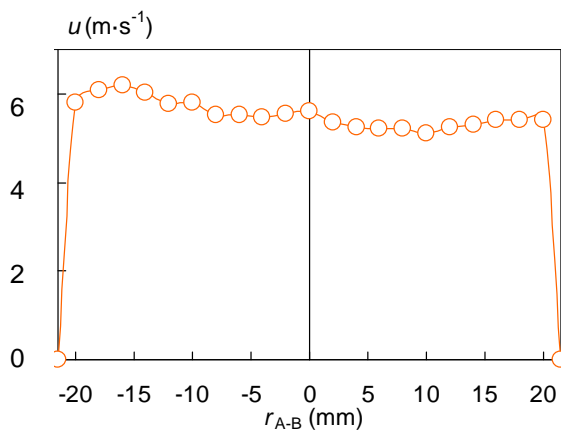
c)



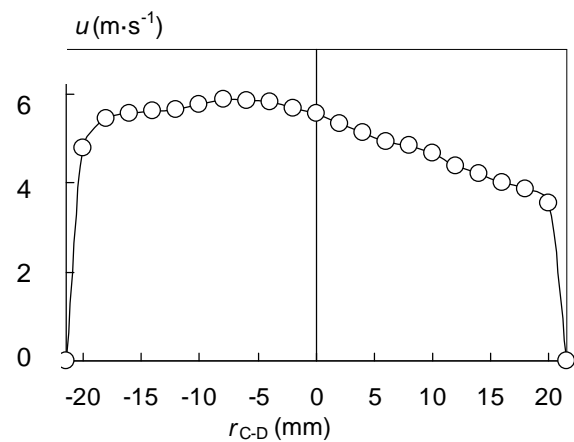
d)

Obr. 6 Tlakové profily v ústí výstupní trubice ($x_v = 1$ mm) a) v ose r_{A-B} při n_1 , b) v ose r_{C-D} při n_1 , c) v ose r_{A-B} při n_2 a d) v ose r_{C-D} při n_2 ; měřeno Prandtlůvou sondou.

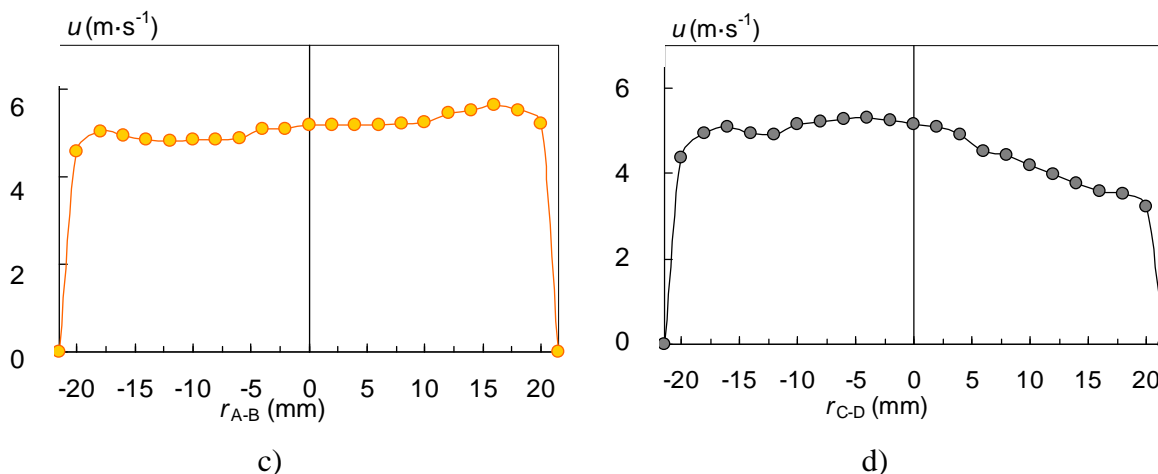
Z naměřených hodnot byly opět vztahem (1) určeny rychlostní profily v ústí výstupní trubice. Obr. 7a) a b) pro otáčky n_1 . Na Obr. 7c) a 7d) pro otáčky n_2 .



a)



b)



Obr. 7 Rychlostní profily v ústí výstupní trubice a) v ose r_{A-B} při n_1 , b) v ose r_{C-D} při n_1 , c) v ose r_{A-B} při n_2 a d) v ose r_{C-D} při n_2 (vyhodnoceno z měření Prandtlou sondou, Obr. 6).

Integrací rychlostních profilů pro otáčky ventilátoru n_1 a n_2 lze získat objemový tok z trubice vztahem:

$$Q_v = 2\pi \int_0^{\frac{D_v}{2}} ur dr, \quad (6)$$

kde D_v je průměr trubice.

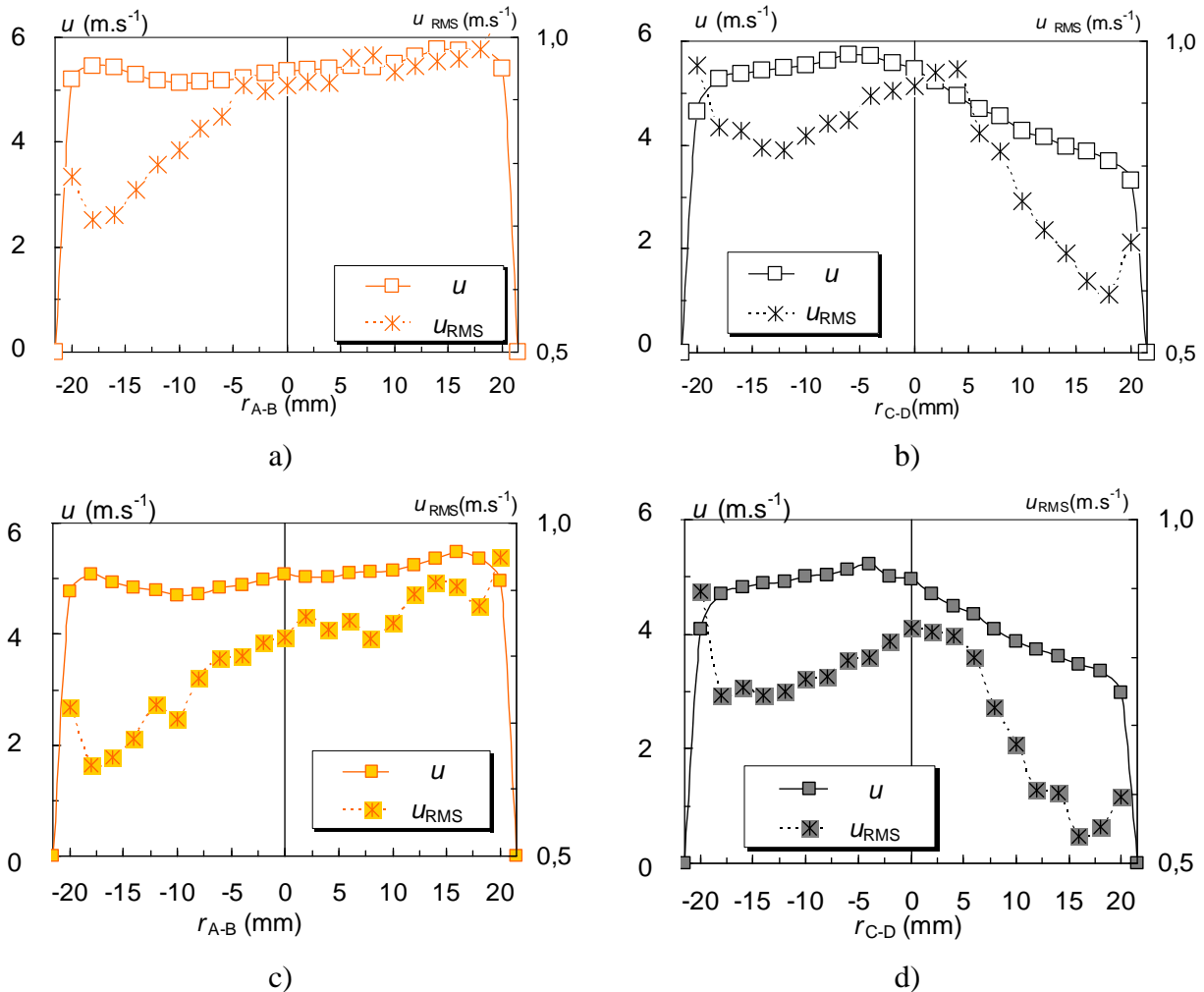
Střední rychlost proudu je potom dána vztahem:

$$U_v = \frac{Q_v}{\pi \frac{D_v^2}{4}} = \frac{8}{D_v^2} \int_0^{\frac{D_v}{2}} ur dr. \quad (7)$$

Integrací rychlostních profilů byly získány střední rychlosti proudění. Pro otáčky n_1 byl objemový tok $Q_v = 0,0072 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a rychlost $U_v = 4,98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, pro otáčky n_2 vyjde $Q_v = 0,0066 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a rychlost $U_v = 4,53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b) Anemometr se žhaveným drátkem

V ústí výstupní trubice byla rychlost měřena rovněž anemometrem. Měření probíhalo obdobně jako v případě Prandtlou sondy. Sonda byla umístěna ve vzdálenosti $x_v = 5 \text{ mm}$. Rozsah i krok traverzace potom byl stejný jako u měření Prandtlou sondou. Změřené rychlostní profily a flukтуаční složky rychlosti jsou na Obr. 8. Obr. 8a, b) ukazují měření při otáčkách n_1 , Obr. 8c, d) měření při n_2 .



Obr. 8 Měření CTA: rychlostní profily a flukuační složky rychlosti v ústí výstupní trubice ($x_v = 5$ mm) a) v ose r_{A-B} při n_1 , b) v ose r_{C-D} při n_1 , c) v ose r_{A-B} při n_2 a d) v ose r_{C-D} při n_2 .

Stejně jako v případě měření Prandtlovou sondou byla integrací dle vztahu (6) a (7) určen objemový tok a střední rychlost proudění. Při n_1 $Q_v = 0,0070$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, rychlost $U_v = 4,81$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ a při n_2 je $Q_v = 0,0064$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $U_v = 4,39$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.2.4 Referenční Pitotova sonda

Pro rychlou kontrolu byla do osy výstupní trubice umístěna Pitotova sonda. Její čelo je umístěno ve vzdálenosti $x_v = -10$ mm.

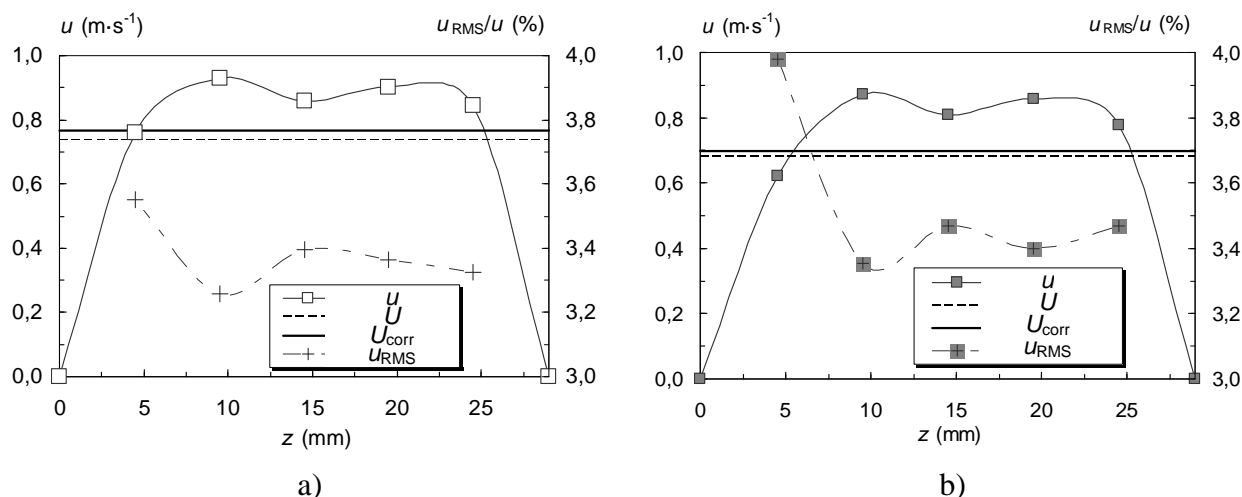
Vzhledem k malé hodnotě naměřeného statického tlaku $p_s = 0,5$ Pa lze považovat statický tlak roven barometrickému. Pro otáčky byl celkový tlak $p_c = 18,5$ Pa ($\pm 0,5$ Pa), čemuž odpovídá rychlost $u = 5,67$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, pro n_2 pak byl celkový tlak $p_c = 15,7$ Pa ($\pm 0,4$ Pa) s odpovídající rychlostí $u = 5,23$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tyto hodnoty jsou ve velmi dobré shodě s měřením Prandtlovou sondou (viz Obr. 4). Při otáčkách n_1 jsou hodnoty získané Pitotovou sondou o 4% vyšší, v případě otáček n_2 dokonce jen o 0,8% vyšší než výsledky získané z měření Prandtlovou sondou.

3.3 Diskuze výsledků

a) Měřicí prostor

Obr. 9a) ukazuje rychlostní profil uvnitř měřicího prostoru při n_1 . Z obrázku je vidět dobrá symetrie a rovněž relativně plochá prostřední část profilu, což je vhodné pro vizualizační experimenty. Tloušťka mezních vrstev na obou stěnách tunelu je přibližně 5 mm. V obrázku je vidět i střední rychlost proudění získaná numerickou integrací a rovněž střední rychlost proudění korigovaná teplotní korekcí dle [4]. Teplotní korekcí se hodnota střední rychlosti zvýšila z $0,74 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na $0,77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tedy o 4,1%.

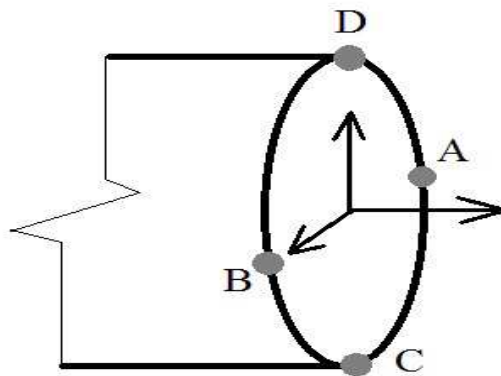
Obr. 9b) ukazuje obdobné výsledky pro otáčky n_2 , kdy teplotní korekce zvýšila hodnotu střední rychlosti proudění z $0,68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ o 2,9% na $0,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



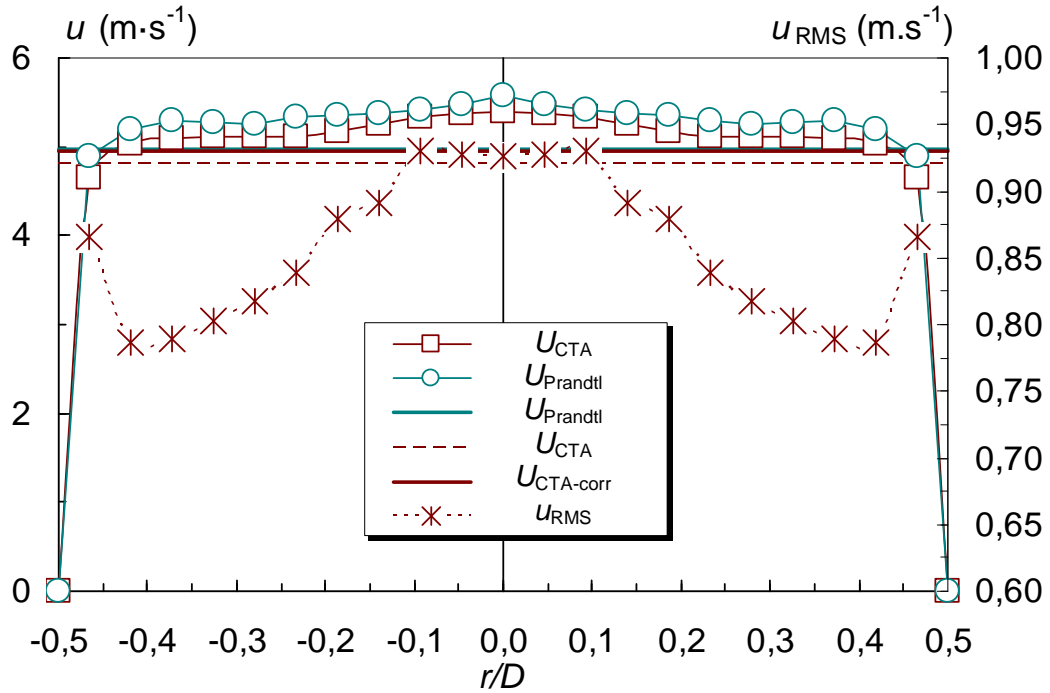
Obr. 9 Rychlostní profil v měřicím prostoru se střední rychlostí proudu
a) při $n_1 = 25,0 \text{ s}^{-1}$, b) při $n_2 = 22,7 \text{ s}^{-1}$.

b) Výstup z tunelu

Obr. 10 ukazuje volbu souřadného systému v ústí výstupní trubice. Na Obr. 11 jsou rychlostní profily $u(r/D)$ získané z měření anemometrem a Prandtlovou sondou v ústí výstupní trubice při n_1 . Tyto profily byly vytvořeny průměrováním 4 naměřených hodnot: $u(r_{A-B} > 0)$, $u(r_{A-B} < 0)$, $u(r_{C-D} > 0)$ a $u(r_{C-D} < 0)$.

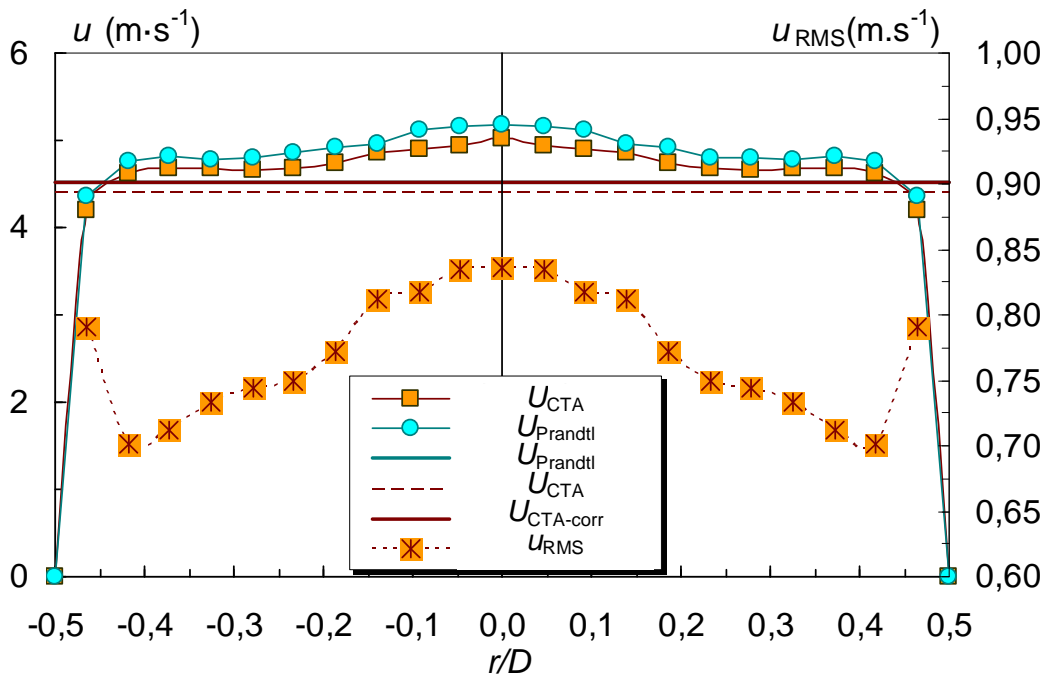


Obr. 10 Souřadný systém ve výstupní trubici.



Obr. 11 Výsledné rychlostní profily s vnesenými středními rychlostmi proudění v ústí trubice pro otáčky ventilátoru $n_1 = 25,0 \text{ s}^{-1}$.

Stejným způsobem byly získány profily pro otáčky n_2 viz – Obr. 12.



Obr. 12 Výsledné rychlostní profily s vnesenými středními rychlostmi proudění v ústí trubice pro otáčky ventilátoru $n_2 = 22,7 \text{ s}^{-1}$.

Pro názornější porovnání výsledků byly určeny převodní konstanty tunelu (viz např. [6]) pro převod výstupní rychlosti na střední rychlost proudění uvnitř měřicího prostoru.

Měření anemometrem byla korigována teplotní korekcí dle [4]. Po přepočtení rychlostí byla střední rychlost proudu pro n_1 $0,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, po teplotní korekci se výsledná hodnota zvýšila

na $0,77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tedy o 2,7%. V případě n_2 byla nekorigovaná rychlost $0,68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, po teplotní korekci se hodnota zvýšila o 2,9% na $0,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Výsledky shrnuje Tabulka 1.

Tabulka 1: Porovnání výsledků: jako referenční hodnoty jsou brána měření anemometrem (CTA ref.) korigované dle [7].

	Použitá metoda	$n_1 = 25,00 \text{ s}^{-1}$		$n_2 = 22,70 \text{ s}^{-1}$	
		$U \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta \text{ (%)}$	$U \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta \text{ (%)}$
Měření uvnitř tunelu	CTA ref.	0,77	-	0,70	-
	Videozáznam	0,67	13,0	0,56	20,0
Měření na výstupu z tunelu	CTA	0,77	0,0	0,70	0,0
	Prandtlova sonda	0,77	0,0	0,70	0,0

3.3.1 Turbulence proudění

V obrázcích 9, 11, 12 jsou rovněž vyneseny flukтуаční složky rychlosti. Pro popis turbulence se obvykle zavádí bezrozměrná hodnota fluktuací, která se nazývá intenzita turbulence (např. Jørgensen [4]) a která je dána vztahem:

$$Tu = \frac{u_{RMS}}{u}, \quad (8)$$

kde u_{RMS} je flukтуаční složka rychlosti a u je časově střední hodnota rychlosti měřená v témže bodě.

Tímto vztahem byly určeny intenzity turbulence pro proudění uvnitř měřicí oblasti i na výstupu z tunelu. V měřicí oblasti byla intenzita turbulence v rozmezí $Tu = 0,033 - 0,040$ pro oboje otáčky ventilátoru. Na výstupu z tunelu pak intenzita turbulence byla v rozmezí $Tu = 0,126 - 0,220$ pro n_1 i n_2 .

4. Vizualizace příčně obtékaného válce

Obtékáním válce se zabývá mnoho autorů. Podrobně se jí věnuje např. Zdravkovich [7]. Z literatury je dobře známo, že úplav za válcem prochází několika režimy se vzrůstajícím Reynoldsovým číslem. Reynoldsovo číslo Re je dáno vztahem:

$$Re = \frac{Ud}{\nu}, \quad (9)$$

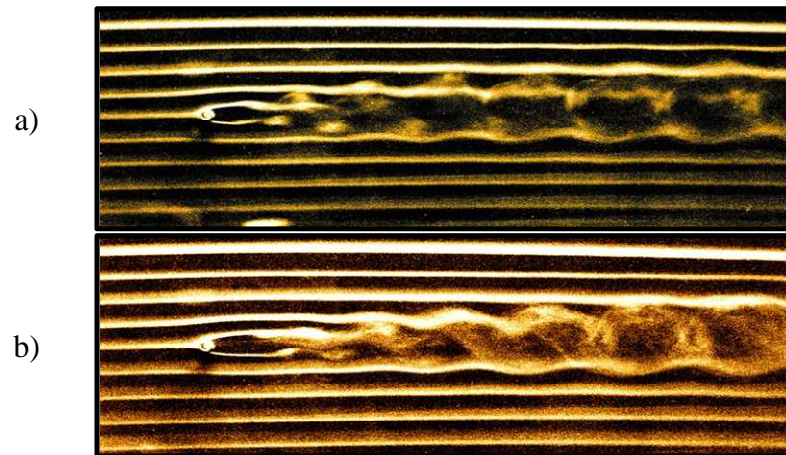
kde d je průměr válce a ν je kinematická viskozita.

Při laminárním obtékání válce s hodnotou Re v rozmezí $(Re_c) < (Re) < (180 - 200)$ dochází k periodickému odplouvání vírů, k tzv. Kármánově vírové řadě. Hodnotu Re_c např. Zdravkovich [7] udává v rozmezí $Re = (40 - 49)$.

Pro vizualizaci proudového pole byla použita vodní mlha. Měřicí prostor byl osvětlen stroboskopickým světlem. Délka expozice během fotografování byla nastavena na 1s.

Gravitační síla působící na vodní kapky zapříčinila odklon od vodorovného směru o 1° , proto jsou zde uvedené fotografie o patřičný úhel natočeny.

Na Obr. 13 je vizualizace obtékání válce o průměru $d = 4$ mm a délce $l = 29$ mm. Obr. 13a) ukazuje obtékání válce při otáčkách n_1 (rychlost proudu $U = 0,77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) tedy $Re = 194$ a Obr. 13b) při otáčkách n_2 (rychlost proudu $U = 0,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) tedy $Re = 177$. Oboje hodnoty Re leží v oblasti existence Kármánovy vírové řady.



Obr. 13 Vizualizace Kármánovy vírové řady za válcem o průměru $D = 4$ mm a) při $n_1 = 25,0 \text{ s}^{-1}$, b) při $n_2 = 22,7 \text{ s}^{-1}$.

5. Závěr

Tato experimentální práce se zabývala malým aerodynamickým tunelem a kvantifikuje jeho parametry. Byly řešeny tyto úlohy:

Byla vyhodnocena rychlost proudění těmito experimentálními metodami:

- Anemometr se žhaveným drátkem,
- Videozáznam proudění.
- Měření v ústí výstupní trubice anemometrem se žhaveným drátkem.
- Měření v ústí výstupní trubice Prandtlovou sondou.
- Průběžné měření rychlosti na výstupu z tunelu Pitotovou sondou.

Jako referenční hodnoty byly použity výsledky měření pomocí anemometru se žhaveným drátkem uvnitř tunelu. Všechny ostatní metody byly s tímto měřením porovnány a bylo ukázáno, že jsou v dobré shodě.

Tunel lze použít ve dvou režimech. Při otáčkách ventilátoru $n_1 = 25,0 \text{ s}^{-1}$ kterým odpovídá střední rychlost proudění $U = 0,77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a při otáčkách $n_2 = 22,7 \text{ s}^{-1}$ při $U = 0,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Možnost použití tunelu pro vizualizaci byla demonstrována na příkladu příčně obtékaného válce v režimu Kármánovy vírové řady. Reynoldsovo číslo v případě otáček n_1 bylo $Re = 197$ a v případě n_2 $Re = 177$.

Tato práce vznikla při řešení projektu GA ČR (14-08888S), s podporou na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace RVO:61388998 a s podporou projektu TAČR – Centra kompetence „Pokročilé technologie pro výrobu tepla a elektřiny“, kód projektu TE01020036.

6. Seznam symbolů

b	Šířka měřicí oblasti tunelu	(mm)
CTA	Anemometr v režimu konstantní teploty drátku	
d	Průměr válce	(mm)
D_V	Průměr výstupní trubice	(mm)
h	Výška měřicí oblasti tunelu	(mm)
l	Délka válce	(mm)
n	Otáčky ventilátoru	(s ⁻¹)
p_b	Barometrický tlak	(Pa)
p_c	Celkový tlak	(Pa)
p_s	Statický tlak	(Pa)
Q	Objemový tok měřicím prostorem	(m ³ ·s ⁻¹)
Q_V	Objemový tok výstupní trubicí	(m ³ ·s ⁻¹)
r	Měrná plynová konstanta	(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
s	Délka měřicí oblasti tunelu	(mm)
t	Teplota	(°C)
T	Termodynamická teplota	(K)
u	Lokální rychlost	(m·s ⁻¹)
u_{RMS}	Flukтуаční složka rychlosti	(m·s ⁻¹)
U	Střední rychlost proudu v měřicí oblasti	(m·s ⁻¹)
U_V	Střední rychlost proudu v ústí výstupní trubice	(m·s ⁻¹)
x,y,z	Kartézské souřadnice	(m)
ρ	Hustota vzduchu	(kg·m ³)
τ	Čas	(s)
ν	Kinematická viskozita	(m ² ·s ⁻¹)
Re	Reynoldsovo číslo dle rovnice (9)	(-)

7. Literatura

- [1] J. Ježek, Malý aerodynamický tunel pro vizualizaci proudového pole a jeho používání ve výuce. Nепublikované sdělení, 2014.
- [2] R. Řezníček, Visualizace proudění. ACADEMIA, Praha, 1972.
- [3] J. Noskivič a kol., Mechanika tekutin. SNTL, Praha, 1987.
- [4] F.J. Jørgensen, How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a practical guide. DANTEC Dynamics, 2002.
- [5] E. Flídr, Z. Broučková, M. Pavelka, Z. Trávníček, Malý aerodynamický tunel pro vizualizaci proudového pole. Výzkumná zpráva ÚT AV ČR, Praha, Z1520/15, 2015.
- [6] R. D. Mehta, P. Bradshaw, Design rules for small low speed wind tunnel. Aeronautical Journal, November 1979, pp. 443–449.
- [7] M.M. Zdravkovich, Flow around circular cylinders. Vol. 1: Fundamentals, Oxford University Press, 1997.