

Rychlostní profily syntetizovaných a kontinuálních proudů

Ing. Jozef Kordík, Ing. Zdeněk Trávníček, CSc., Prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc.

1. Úvod

Syntetizované proudy jsou tekutinové proudy generované periodickými pulsacemi tekutiny, která je vyfukována a vzápětí opět nasávána vhodným otvorem. V tomto příspěvku se budeme věnovat porovnání rychlostních profilů a středních kvadratických odchylek rychlostí syntetizovaných a kontinuálních proudů. To je provedeno na základě výsledků experimentů měřených na vzduchu. Pro syntetizovaný proud budeme používat zkratku SJ (synthetic jet) a pro kontinuální proud zkratku CJ (continuous jet). Dalším tématem bude kritérium vzniku syntetizovaného proudu, které je z naměřených dat určeno a porovnáno s publikovanými údaji.

2. Základní definice

Měření, která se týkala osově symetrického syntetizovaného proudu, se prováděla s generátorem vybaveným dvojicí protiběžných budících membrán; průměr výstupního otvoru byl $D = 8.0$ mm – viz [15, 9, 8]. Použit byl termoanemometr *MiniCTA* (DANTEC) s jednodrátkovou sondou 55P16. Vzorkovací frekvence měření byla 15 kHz – 20 kHz, obvyklý počet vzorků 262144. Naměřené hodnoty byly zpracovány fázovým průměrováním.

Osově symetrický kontinuální proud (definováno v [12]) byl proměřován termoanemometrem *StreamLine 90H02 Frame* (DANTEC) se sondou 50P11, vz. frekvence: 3 kHz, počet vz.: 16384, metoda měření i laboratoř byla stejná jako v [5] – Dančová, Vít, TU – Liberec. Průměry výstupní trysky byly 21, 8 mm a 8, 6 mm.

Polohu měřeného místa popisujeme poloměrem r a vzdáleností od roviny ústí trysky x . Průměr resp. poloměr ústí značíme D resp. R . Dekompozici rychlosti provádíme na složky časově střední U , periodickou U_f a flukтуаční u' . Celkovou rychlost bez fluktuací označujeme $U_S = U + U_f$. Charakteristické rychlosti U_0 a $\bar{U}$: $U_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T_E} U_S(t, r, x) dt \Big|_{r=0, x=0}$, $\bar{U} = \frac{1}{T_E} \int_0^{T_E} U_S(t, r, x) dt \Big|_{r=0, x=0}$, kde t je čas, T je doba trvání periody ($\frac{1}{T} = f$ je budící frekvence) a T_E je doba trvání vyfukovací části periody. Reynoldsovo, Strouhalovo a Stokesovo číslo definujeme dle [6]: $Re_H = \frac{D\bar{U}}{\nu}$, $St_H = \frac{2\pi f D}{\bar{U}}$ a $S_H = \sqrt{Re_H St_H} = \sqrt{\frac{2\pi f D^2}{\nu}}$, kde ν je kinematická viskozita; obvyklé jsou i jiné definice [15, 9]: $Re = \frac{U_0 D}{\nu}$, $St = \frac{f D}{\pi U_0}$. Tzv. „délka zdvihu“ (extrusion stroke length) je $L_0 = U_0 T$, tzn. $L_0 = \frac{D}{\pi St} = \frac{\pi D}{St_H}$.

U kontinuálního proudu budeme rychlostí označenou U rozumět průměrnou rychlost (bez fluktuace u') měřenou v obecném místě x, r . Reynoldsovo číslo kontinuálního proudu bude určeno z velikosti výstupního průměru trysky a průměrné rychlosti po průřezu trysky.

3. Výsledky experimentu

3.1. Kritérium vzniku syntetizovaného proudu

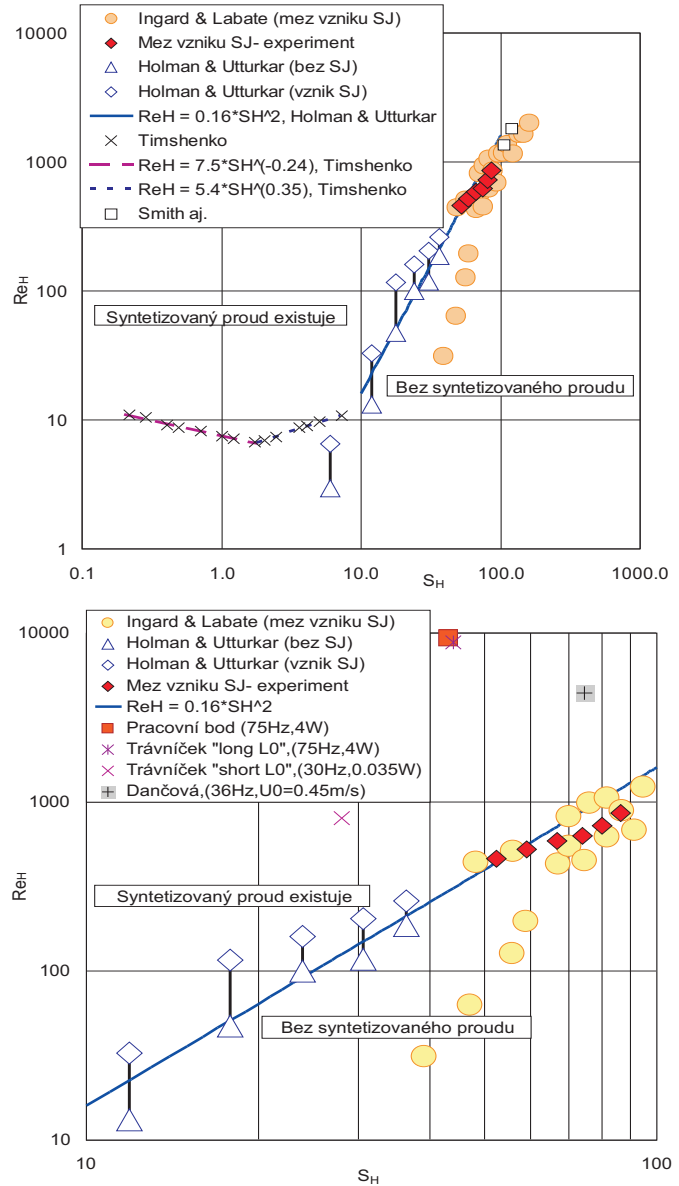
Závislosti časově střední rychlosti U na elektrickém příkonu generátoru P neboli výkonové charakteristiky jsme měřili v ose, ve vzdálenosti od ústí $x/D = 6$. Za mez vzniku jsme považovali okamžik

od kterého při dalším snížení výkonu generátoru již zůstávala rychlost U konstantní (prakticky odpovídala spodní hranici kalibrace anemometru). Proměřili jsme šest výkonových charakteristik pro frekvence od 110 Hz do 300 Hz, při kterých jsme určili tuto hranici vzniku.

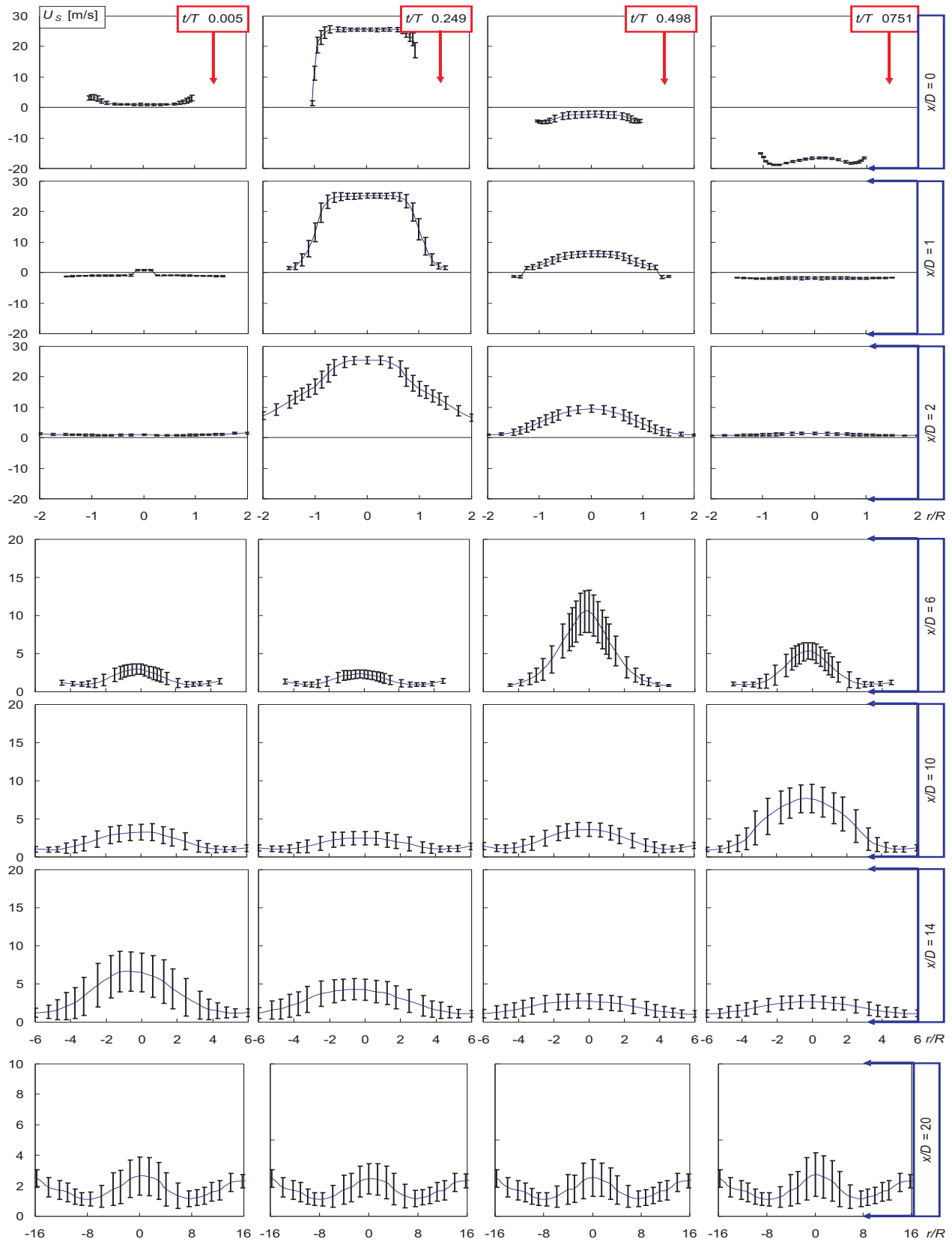
Kritérium je vyneseno v obr. 3.1 jako závislost $Re_H(S_H)$; graf tedy představuje hranici, na které se syntetizovaný proud začne vyvíjet. Výsledek velmi dobře souhlasí s kriteriem experimentálně sestaveným v článku [6]: $Re_H = 0,16S_H^2$, jehož geometrická interpretace je $(L_0/D) = 0,50$, (dle [11] může být konstanta menší, dokonce i poloviční). Na obr. 3.1 dole jsou také body experimentů [15] a [5] – všechny tyto body se nachází v oblasti existence syntetizovaného proudu, dostatečně vysoko nad mezní čarou. Nahoře jsou doplněna i kriteria formulovaná v [14] pro nižší Stokesova čísla – pro $0,2 \leq S_H < 1,8$: $Re_H = 7,5S_H^{-0,24}$ a pro $1,8 \leq S_H < 7,2$: $Re_H = 5,4S_H^{0,35}$. Vidíme, že graf poměrně dobře navazuje v okolí $S_H = 10$ na data z [6].

3.2. Rychlostní profily

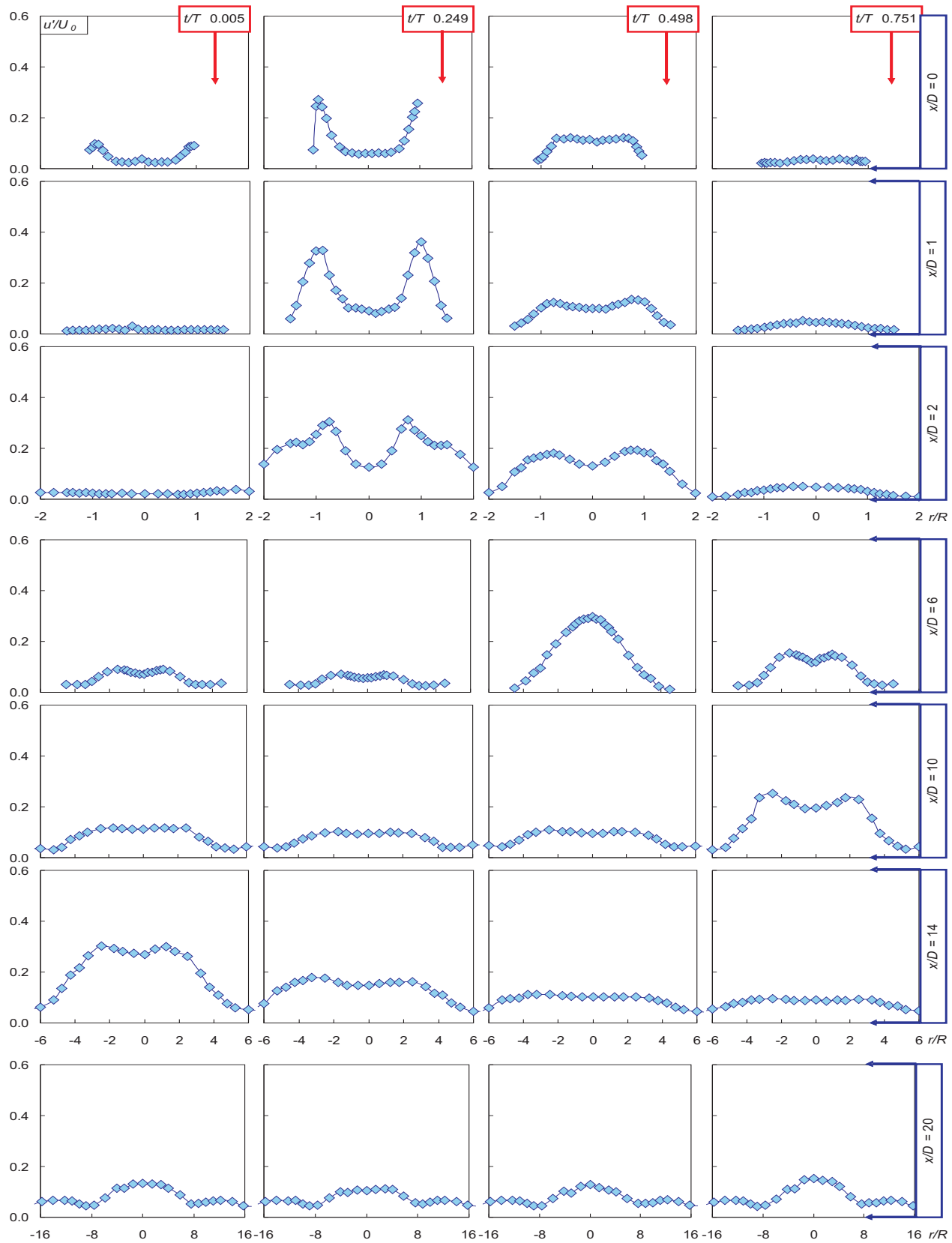
Rychlostní profily syntetizovaných proudů byly proměřovány v sedmi vzdálenostech $x/D = 0, 125$ (v obrázcích označeno přibližně jako $x/D = 0$) až $x/D = 20$, při $Re_H = 9400$, $St_H = 0,199$, ($Re = 4700$, $St = 0,0202$, $P = 4$ W, $f = 75$ Hz). Příklad typických výsledků je na obr. 3.2. Podrobnější rozbor časových průběhů těchto profilů byl prezentován v [10]. Vývoj periodické složky proudu byl diskutován např. v [15], zde naměřené průběhy jsou ve shodě se závěry [15]. Na rychlostních profilech z obr. 3.2 jsou znázorněny rozsahy směrodatných odchylek. Jejich průběh podél profilu (obr. 3.3) však není stejný. V závislosti na čase a poloze x zde nacházíme dva typy průběhů směrodatných odchylek: (1) profil směrodatných odchylek má v bodě $r/R = 0$ minimální hodnoty a (2) profil směrodatných odchylek má v bodě $r/R = 0$ maximální hodnoty (např. $x/D = 6$, $t/T = 0,498$). Vidíme také, že odchylky i rychlostní profily jsou téměř konstantní v čase až ve vzdálenosti $x/D = 20$. Tohoto faktu si můžeme povšimnout i na obr. 3.4 a především na obr. 3.5. Obrázky 3.4 a 3.5 znázorňují průběhy relativních odchylek (intenzity turbulentních fluktuací – u'/U_S) v čase a prostoru. Plochy na obrázcích 3.5 poukazují na značnou komplikovanost průběhů relativních odchylek.



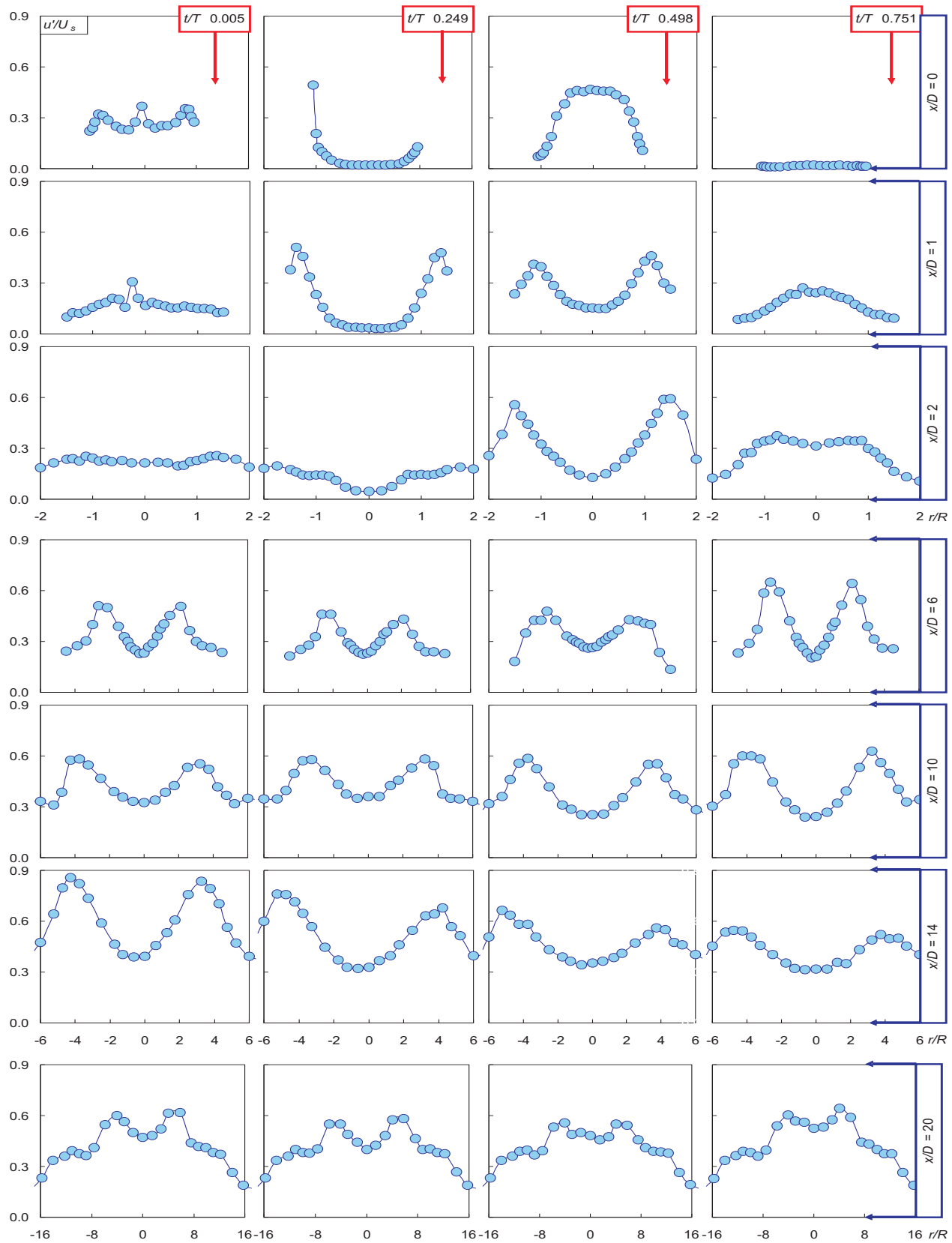
Obr. 3.1: Kritérium vzniku syntetizovaného proudu (dole detail)



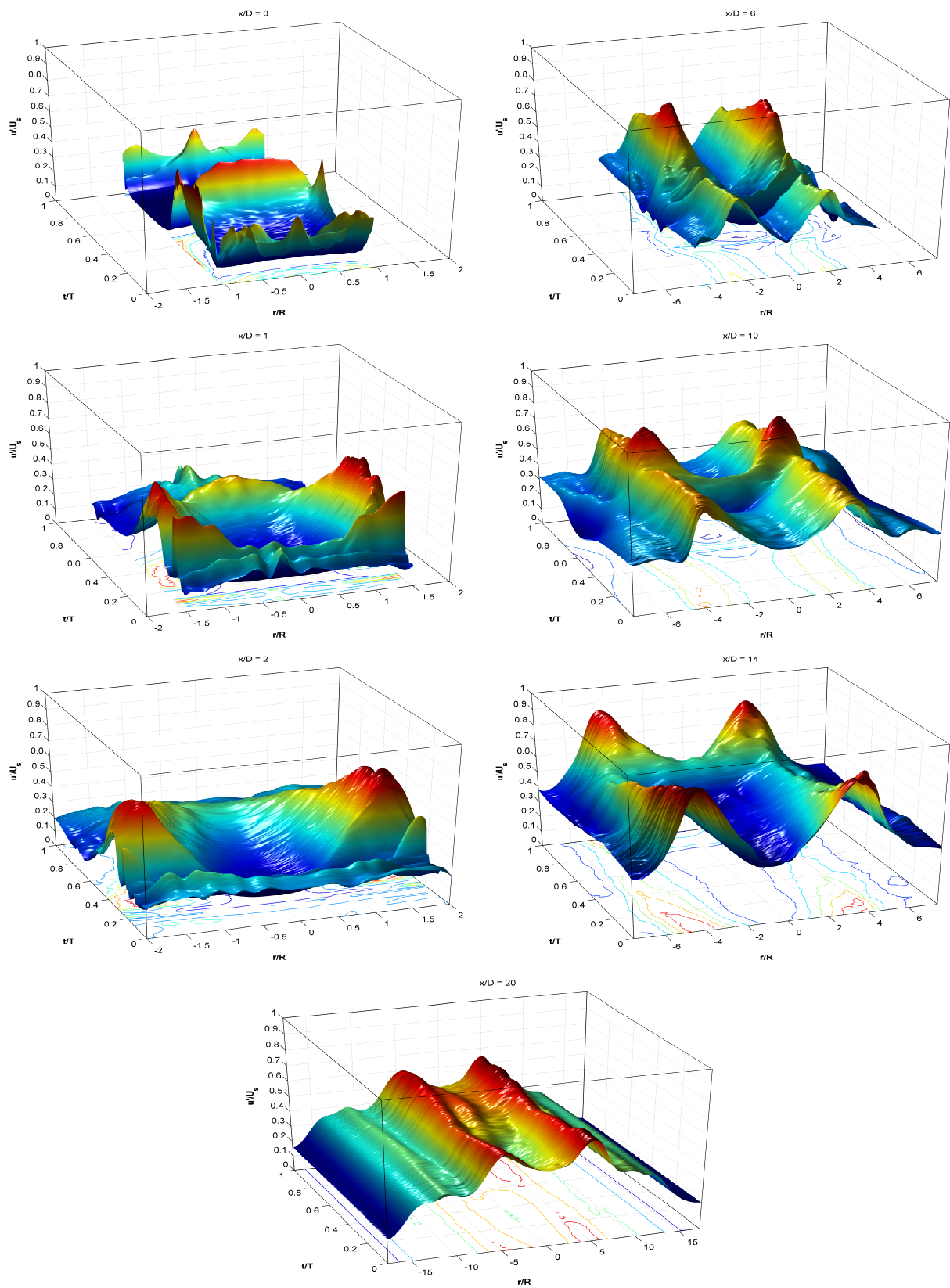
Obr. 3.2: Rychlostní profily s příslušnými směrodatnými odchylkami



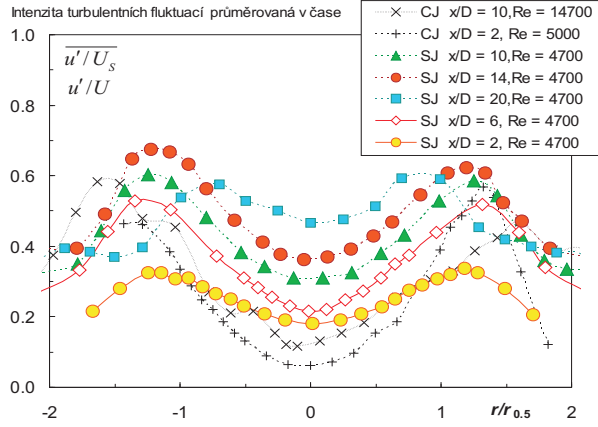
Obr. 3.3: Směrodatné odchylky normované rychlostí U_0



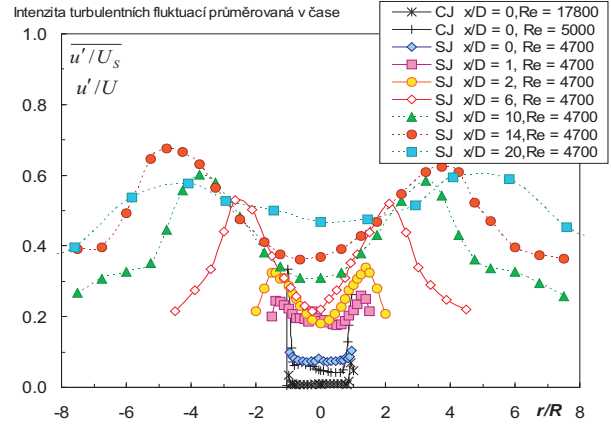
Obr. 3.4: Intenzita turbulentních fluktuací (závislosti v řezech)



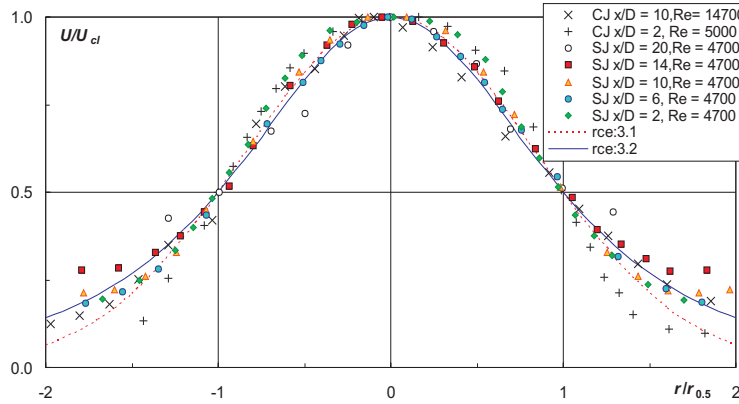
Obr. 3.5: Intenzita turbulentních fluktuací (úplné závislosti)



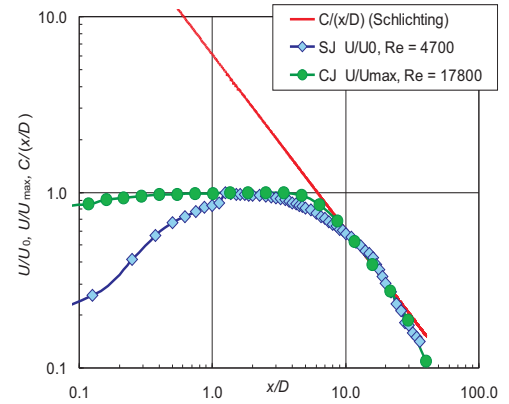
Obr. 3.6: Intenzita turbulentních fluktuací CJ a SJ (průměrná v t) v souřadnicích $r/r_{0,5}$



Obr. 3.7: Intenzita turbulentních fluktuací CJ a SJ (průměrná v t) v souřadnicích r/R



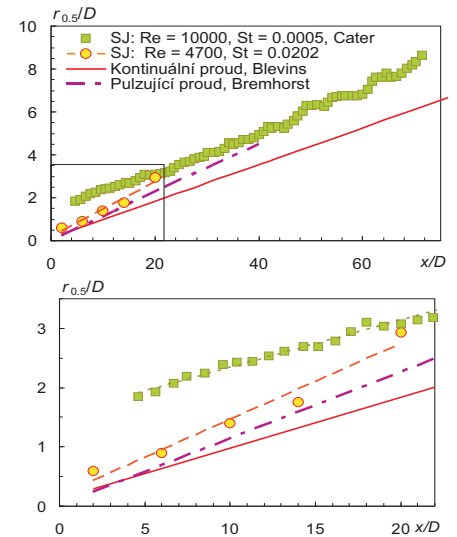
Obr. 3.8: Časově střední rychlostní profily CJ a SJ



Obr. 3.9: Pokles časově střední rychlosti SJ a CJ

Obecně lze však prohlásit, že minimální relativní odchylky se nacházejí zpravidla v $r/R = 0$, pak rostou se zvětšující se $|r/R|$ až do určitého místa, od kterého opět klesají. To však neplatí pro graf v $x/D = 0$ a částečně také pro graf $x/D = 1$ z obr. 3.5, kde je chování místama opačné.

Zprůměrujeme-li relativní odchylky profilů syntetizovaných proudů v čase, dostaneme obrázky 3.6 a 3.7. Na obr. 3.6 je zavedena souřadnice $r/r_{0,5}$, kde $r_{0,5}$ je místo na ose r , kde profil dosahuje rychlosti $\frac{U_{cl}}{2}$; U_{cl} je rychlost v ose profilu ($r = 0$) (tento souřadnicový systém má smysl zavádět pouze u profilů měřených dále od roviny ústí trysky). Intenzity turbulentních fluktuací z obr. 3.6 ve větších vzdálenostech ($x/D = 1 \div 14$ – oblast vývinu SJ i CJ) dosahují u syntetizovaných proudů maximálních hodnot přibližně v $|r/r_{0,5}| \doteq 1,25$. Maximální relativní odchylky pro kontinuální proud byly zjištěny dále od osy: tj. spíše v $|r/r_{0,5}| \doteq 1,5$; lokální minimum je u obou případů v $r/r_{0,5} \doteq 0$. Chování profilů relativních odchylek SJ na konci rozsahu x ($x/D = 20$) je odlišné – lokální maxima se přibližují k ose $|r/r_{0,5}| \doteq 0,8$.



Obr. 3.10: Rozšiřování syntetizovaných a kontinuálních proudů (dole detail)

Na obr. 3.7 jsou tyto průběhy zobrazeny v souřadnicích r/R . Navíc zde přibýly i relativní odchylky naměřené v blízkosti ústí generátoru syntetizovaného proudu a odchylky kontinuálních proudů měřených rovině ústí trysky. Jak je obvyklé u CJ, v ústí trysky je poměrně malá intenzita turbulentních fluktuací U/u' i $\overline{U_S}/u'$ téměř po celém průřezu. U kontinuálního proudu v tenké smykové vrstvě na okraji vytékajícího proudu je ale intenzita turbulentních fluktuací vyšší. Obdobný růst za hranou trysky je pravděpodobný i u syntetizovaného proudu, v této práci jsme však neměřili v tak malých blízkostech stěny, aby se nárůst projevil.

Nalezli jsme tedy tři typy chování profilů průměrovaných turbulentních intenzit: (1) v $x/D = 0 \div 1$ (blízko ústí trysky), (2) v $x/D = 1 \div 14$ (oblast vývinu SJ a CJ) a (3) pro $x/D \sim 20$ (u SJ).

Následující obrázky 3.8, 3.9, a 3.10 se týkají časově středních rychlostí syntetizovaného proudu, které porovnáváme s naměřenými výsledky pro kontinuální proud. Kontinuální proud za tryskou byl proměřován při těchto Reynoldsových číslech: $Re = 5000$, $Re = 14700$, $Re = 17800$ (tj. též výsledky z obr. 3.6 a 3.7). Rychlosti časově středních profilů $U(r)$ byly zde přepočteny do bezrozměrného tvaru $U/U_{cl}(r/r_{0,5})$. Normované profily jsou vyneseny v obr. 3.8, a jsou porovnány s následujícími rovnicemi:

$$\frac{U}{U_{cl}} = \exp \left[-\ln(2) \left(\frac{r}{r_{0,5}} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

$$\frac{U}{U_{cl}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\sqrt{2} - 1 \right) \left(\frac{r}{r_{0,5}} \right)^2 \right]^2} \quad (3.2)$$

Rovnice 3.1 je Gaussova křivka, která bývá při diskusi rychlostních profilů syntetizovaných proudů používána – viz např. Cater, Soria [3]. Podobný vztah byl použit také pro pulzující a kontinuální proudy – [2] a [7]. Rovnici 3.2 jsme získali úpravou známého Görtlerova řešení rychlostního profilu pro kontinuální proud – [4]. Obr. 3.8 ukazuje, že obě rovnice 3.1 a 3.2 poměrně dobře aproximují experimentální hodnoty syntetizovaných proudů v místech blízko osy. Naopak na okraji grafu ($r > 1,25r_{0,5}$) jsou naměřené hodnoty výrazně vyšší oproti oběma rovnicím. Profil kontinuálního proudu naměřeného ve vzdálenosti $x/D = 2$ se nachází v oblasti $x/D < 5$, to podle [1] znamená, že nebude mít typický tvar gaussovy křivky (v okolí bodu $r = 0$ bude plošší, což vidíme i z obr. 3.8). Druhý profil kontinuálního proudu ($x/D = 10$) poměrně obstojně kopíruje Görtlerovo řešení v celém jeho naměřeném rozsahu.

Průběh časově střední rychlosti syntetizovaného a kontinuálního proudu podél osy x ukazuje obr. 3.9. Rychlost u syntetizovaného proudu nejprve narůstá z nulové hodnoty v ústí generátoru na hodnotu přibližně U_0 , zatímco u kontinuálního proudu se drží na konstantní hodnotě odpovídající velikosti rychlosti $U_{max} \doteq U_{cl} |_{x=0}$. V místě $x/D \doteq 1,1$ obě střední rychlosti (SJ a CJ) začínají klesat. Exponenty poklesu n ($U/U_0 \sim (x/D)^n$) v oblasti $x/D > 1,1$ u syntetizovaného proudu pro toto konkrétní měření jsou podrobněji popsány v [8] a [10] ($x/D > 20$: $n = -1,03$). Pro porovnání syntetizovaného proudu s kontinuálním je důležitý poznatek, že exponent poklesu u obou typů proudění se ve větších vzdálenostech blíží hodnotě $n = -1$ (tj. na obr. 3.9 plná čára, [12]).

Nárůst šířky proudu podél osy ukazuje obr. 3.10. Naměřené hodnoty jsou velmi blízké hodnotám pulzujícího proudu [2]. Leží přitom mezi průběhem známým pro vyvinutý turbulentní ustálený proud ($r_{0,5} \sim 0,08x$, [1]) a hodnotami syntetizovaného proudu [3].

4. Závěr

Naměřené kritérium vytvoření syntetizovaného proudu velmi dobře souhlasí s údaji dostupnými z literatury [6]: $Re_H = 0,16S_H^2$, tj. $L_0 = 0,50D$; výsledky uvedené v [6] navazují na kritéria publikované v [14].

Časový vývoj naměřeného rychlostního pole syntetizovaného proudu byl podrobněji diskutován v [10]. Zaměřili jsme se na odchylky podél jednotlivých rychlostních profilů u syntetizovaných a kontinuálních proudů. Velikosti odchylek u syntetizovaného proudu jsou prakticky konstantní v čase až ve vzdálenosti $x/D = 20$. Jinde jsou odchylky komplikované a závisí na parametrech: $x/D, r/R, t/T$.

Pokud jde o časově středované intenzity turbulentních fluktuací ($\overline{U_S/u'}, U/u'$), byly identifikovány tři typy jejich profilů:

- v trysce jsou hodnoty $\overline{U_S/u'}$ a U/u' malé téměř po celém průřezu, maximum se nachází v tenké mezní vrstvě za hranou trysky
- pro $x/D = 1 \div 14$ má profil intenzit sedlový tvar (typický pro kontinuální proud) s minimem v ose
- ve vzdálenosti $x/D = 20$ (tj. na konci zkoumaného rozsahu) se začíná profil vyrovnávat (u SJ) a jeho lokální maxima se posouvají k ose

Časově středné profily rychlosti syntetizovaných proudů je možné popsat aproximacemi obvyklými u kontinuálních proudů, např. Görtlerovým řešením. To odpovídá naměřeným hodnotám především v místech blízko osy ($r < 1,25r_{0,5}$). Görtlerovo řešení dobře kopíruje rychlostní profil kontinuálního proudu měřený v $x/D = 10$. Pokles střední rychlosti syntetizovaného proudu podél osy x je možné v dostatečně velké vzdálenosti ($x/D > 20$) popsat vztahem $U/U_0 \sim (x/D)^{-1,03}$, což dobře odpovídá poklesu rychlosti vyvinutého turbulentního ustáleného proudu $U/(U_{max}) \sim (x/D)^{-1}$. Tento vztah potvrzuje i experiment s kontinuálním proudem.

Nárůst šířky experimentálně zkoumaného syntetizovaného proudu je poněkud větší než pro ustálený proud.

Poděkování za podporu náleží GA AV ČR (IAA200760504) a GA ČR (101/05/2681).

Literatura

- [1] Blevins R. D., *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Krieger Publishing Company Malabar, Florida, 2003.
- [2] Bremhorst, K., Hollis, P., *Velocity field of an axisymmetric pulsed, subsonic air jet*, AIAA Journal 28 (1990) 2043-2049.
- [3] Cater J.E., Soria J., *The evolution of round zero-net-mass-flux Jets*, Journal of Fluid Mechanics 472 (2002) 167-200.
- [4] Citavý J., Nožička J., *Proudění vazkých tekutin. Tenké smykové vrstvy*, ČVUT Praha, 2004.
- [5] Dančová P., *Studie proudění typu „Synthetic Jet“*, Diplomová práce, TU Liberec, 2006.
- [6] Holman R., Utturkar Y., Mittal R., Smith B.L., Cattafesta L., *Formation criterion for synthetic jets*, AIAA Journal 43 (No. 10) (2005) 2110-2116.

- [7] Hussein J., Capp S. P., George W. K., *Velocity measurements in a high-Reynolds-number, momentum conserving, axisymmetric, turbulent jet*, Journal of Fluid Mechanics 258 (1994) 31-75.
- [8] Kordík J., *Osově symetrický syntetizovaný proud*, Diplomová práce, ČVUT 2007.
- [9] Kordík J., Šafařík P., Vít T., Trávníček Z., *Analýza syntetizovaného proudu v ústí jeho generátoru*, In: Topical Problems of Fluid Mechanics 2006, IT AS CR, Prague, Feb. 16 - 17, 2005, 85-88.
- [10] Kordík J., Trávníček Z., Šafařík P., *Kritérium vytvoření syntetizovaných proudů: výkonové a frekvenční charakteristiky*, In: Topical Problems of Fluid Mechanics 2007, IT AS CR, Prague, Feb. 28 - Mar. 2, 2007, 99-102.
- [11] Milanovic I.M., Zaman K.B.M.Q., *Synthetic jets in crossflow*, AIAA Journal 43 (2005) 929-940.
- [12] Schlichting H., Gersten K., *Boundary-Layer Theory*, Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [13] Smith B.L., Glezer A., *The formation and evolution of synthetic jets*, Phys. Fluids 10 (No. 9) (1998) 2281-2297.
- [14] Timshenko V., Reizes J., de Vahl Davis E. L., de Vahl Davis G., *A criterion for the formation of micro synthetic jets*, In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, Nov. 13 - 19, 2004, 197-203.
- [15] Trávníček Z., Vít T., P. de Boer, Maršík F., *Synthetic jet - design and verification of the actuator*, In: Topical Problems of Fluid Mechanics 2004, IT AS CR, Prague, Feb. 25, 2004, 165 - 168.