



INTERMITTENCY ANALYSIS IN A JET - CROSS-FLOW INTERACTION

Václav URUBA, Oton MAZUR, Pavel JONÁŠ*

***Summary:** In the paper the intermittency analysis of the jet in cross-flow mixing zone is presented. Both jet in the nozzle orifice and incoming cross-flow were low-turbulent. The modified TERA method was adopted to distinguish laminar – turbulent local nature of the signal. Detailed analysis of the entire signal as well as laminar and turbulent fractions was carried out. Presented results include intermittency coefficients and other signal characteristics distributions.*

1. Úvod

Předkládaná práce navazuje na předchozí práce na téma experimentálního vyšetřování interakce paprsku s příčným proudem, které vznikly na našem pracovišti. Některé z nich jsou uvedeny v seznamu literatury.

V centru zájmu jsou v poslední době otázky míšení tekutiny z paprsku s tekutinou z příčného proudu. Efektivita rozptylu tekutiny paprsku do příčného proudu významně závisí na struktuře proudění v oblasti míšení, přítomnosti a topologii laminárních turbulentních a intermitentních podoblastí. Informaci o tomto můžeme získat pomocí rozboru intermitence signálů změřených v oblasti míšení. Proto jsme tuto práci věnovali zmapování intermitence v oblasti míšení.

2. POPIS EXPERIMENTU

Experimenty byly prováděny na výtlačné trati v ÚT. Měřicí prostor o rozměrech 250 x 250 x 800 mm³, v něm je umístěna deska s ústím trysky generující paprsek o průměru $D = 13,3$ mm ve vzdálenosti 80 mm od náběžné hrany. Souřadný systém byl definován s počátkem uprostřed ústí trysky, x osa ve směru příčného proudu, zatímco osa y a z je kolmá, respektive rovnoběžná s deskou. Proud vzduchu vycházející z ústí paprsku ve směru osy y i příčný proud byly homogenní, s nízkou hladinou turbulence (okolo 0,1%). Tloušťka mezní vrstvy na desce před ústím paprsku byla asi $0,1 D$. Paprsek měl v rovině ústí rovnoměrný rychlostní profil s velmi tenkými mezními vrstvami na stěnách (asi $0,05 D$). Použité experimentální zařízení bylo podrobně popsáno v [7]. Poměr rychlosti paprsku a příčného proudu byl zvolen roven 4,00 a byl udržován s maximální odchylkou $\pm 0,01$ během všech experimentů.

* Ing. Václav Uruba, CSc, Oton Mazur, prom.fyz., RNDr. Pavel Jonáš, DrSc,
ÚT AV ČR, Dolejškova 5, 182 00 Praha 8, E-mail: uruba@it.cas.cz

Pro měření rychlosti byla použita metoda žhaveného drátku CTA s jedním drátkem (sonda DANTEC 55P01) orientovaným ve směru osy z , tedy zhruba kolmo k vektoru střední rychlosti. Signál byl digitalizován 16bitovým A/D převodníkem vzorkovací frekvencí 25 kHz a zaznamenán na paměťové médium. Délka záznamu v každém měřeném bodě byla 500 000 vzorků, tedy 20s.

3. METODIKA VYHODNOCOVÁNÍ INTERMITENCE

Pro analýzu intermitentních signálů existuje velké množství metod – jejich přehled byl podán např. v [9]. V našem případě byla zvolena modifikovaná TERA metoda uváděná v [11]. Metoda spočívá v několika postupných krocích. Jako výchozí signál jsme použili časovou posloupnost místní podélné složky rychlosti.

Nejprve se signál filtruje hornopropustným filtrem tak, aby se odstranila stejnosměrná složka a nízkofrekvenční složky signálu. V našem případě jsme použili hornopropustný Butterworthův filtr s frekvencí nastavenou na 30 Hz. Tato frekvence zhruba odpovídá frekvenci fluktuací rychlosti spojenou s výskytem největších vírů, které mají velikost srovnatelnou s rozměry smykové oblasti.

Z takto upraveného signálu se určí detekční funkce pomocí „zeitlivění“ vzhledem k vysokým frekvencím. Toho se dosahuje časovou derivací a dalšími matematickými úpravami. V našem případě jsme použili detekční funkci ve tvaru $|u \cdot \partial u / \partial t|$, kde u jsou fluktuace podélné složky rychlosti.

Klíčový význam má prahová hodnota detekční funkce, která rozlišuje mezi laminární a turbulentní povahou signálu. Bylo zjištěno, že časové průběhy podélné složky rychlosti mají v celé oblasti určité společné rysy. Byl proto nejprve analyzován signál změřený mimo oblast míšení, kdy signál musí mít laminární charakter. Prahová hodnota detekční funkce byla potom zvolena poněkud vyšší, než je úroveň takto vyhodnocené detekční funkce.

Výsledkem je indikátorová funkce, která nabývá hodnot 1 v oblasti turbulentního signálu a 0 v oblasti laminárního signálu. Při určování detekční funkce byly vyloučeny laminární i turbulentní úseky, jejichž délka byla kratší než časová perioda odpovídající průchodu nejmenších turbulentních vírů.

Součinitel intermitence γ potom vyjadřuje poměrný podíl turbulentní části signálu v celém signálu. Původní signál byl pomocí indikační funkce rozdělen na laminární a turbulentní část. Potom byly vypočteny statistické charakteristiky jednotlivých částí signálu, jakož i celého signálu. Jednalo se o statistické momenty – střední hodnoty a centrální statistické momenty 2., 3. a 4. řádu – tedy variance, součinitelé šikmosti a excesu. Také byly zkoumány délky laminárních a turbulentních částí signálu.

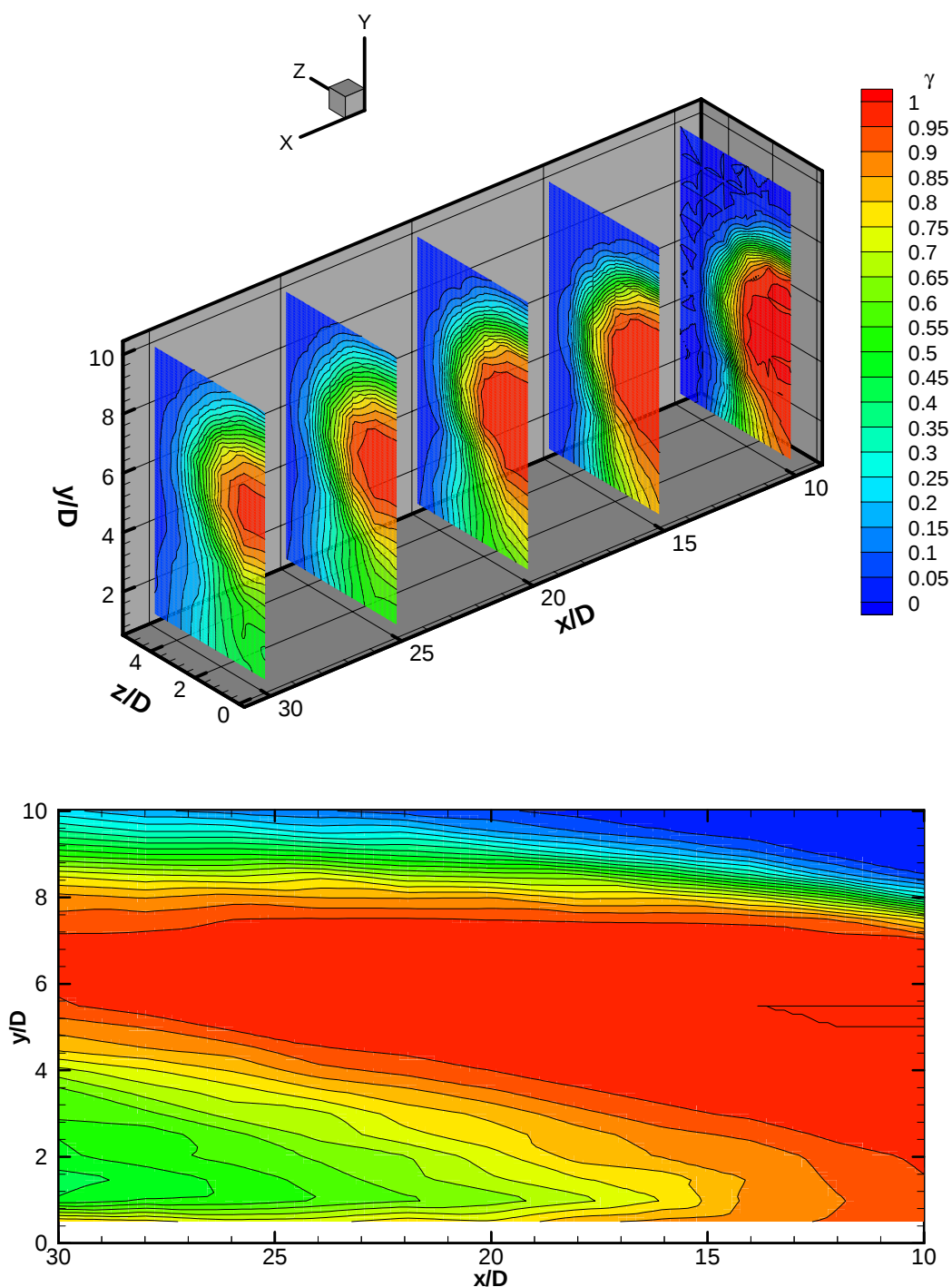
Jakožto alternativa byla použita klasická metoda pro výpočet součinitele intermitence podle Towsenda. Ten předpokládá, že součinitel intermitence je nepřímo úměrný převrácené hodnotě součinitele excesu, který byl vypočten z časově derivovaného signálu. Nastavení metody se provádí pomocí analýzy signálu v místě, kde se prokazatelně nachází zcela turbulentní signál.

4. VÝSLEDKY

Měření bylo prováděno v 5 rovinách kolmých na osu x , pro $x/D = 10, 15, 20, 25$ a 30 a dále v rovině symetrie $z = 0$. Z důvodů symetrie rozložení statistických charakteristik bude ukázána pouze jedna polovina rovin $x = \text{konst.}$

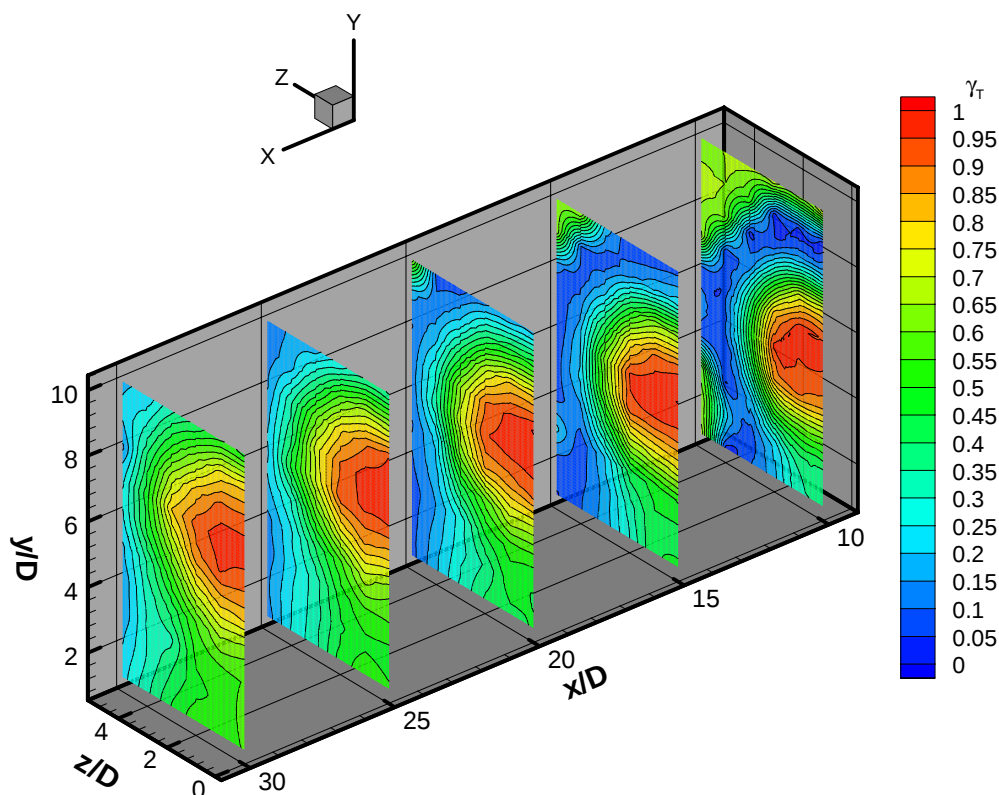
Na obr.1 vidíme rozložení součinitele intermitence v oblasti míšení. Červené oblasti značící hodnotu součinitele intermitence $\gamma = 1$ představují oblasti plně turbulentního signálu, modře jsou znázorněny zcela laminární oblasti $\gamma = 0$. Turbulentní oblasti jsou podle očekávání v oblasti jádra paprsku, postupně přecházejí do laminárních oblastí mimo oblast míšení. V blízkosti její hranice se

nalézá oblast intermitentního signálu. Turbulizovaný je také úplav za počátečním stadiem paprsku, která se nalézá pod paprskem.



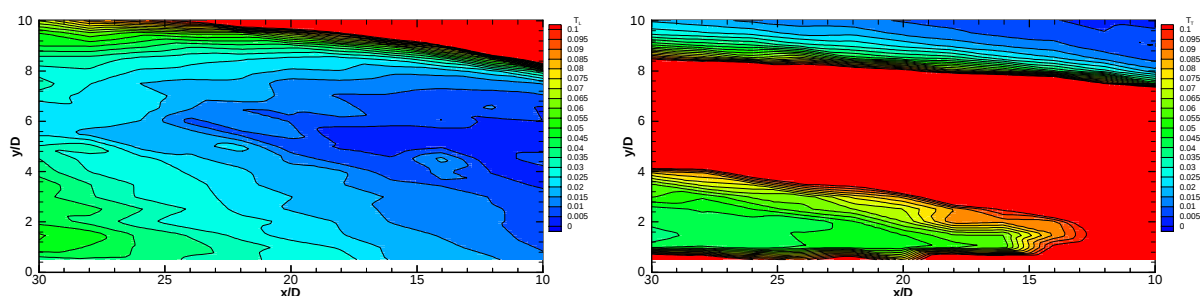
Obr.1 a, b – Rozložení součinitele intermitence γ v oblasti míšení v poloprostoru (a) a v rovině symetrie (b).

Pro srovnání je na obr.2 uvedeno rozložení součinitele intermitence γ_T vyhodnoceného podle Towsenda. Vidíme, že rozložení tohoto součinitele v podstatě dobře kvalitativně vystihuje rozložení skutečného součinitele intermitence, avšak mimo oblast míšení dává Towsendova metoda z fyzikálního pohledu evidentně nesprávnou hodnotu namísto hodnoty 0.



Obr.2 – Prostorové rozložení součinitele intermitence vypočteného dle Townsenda

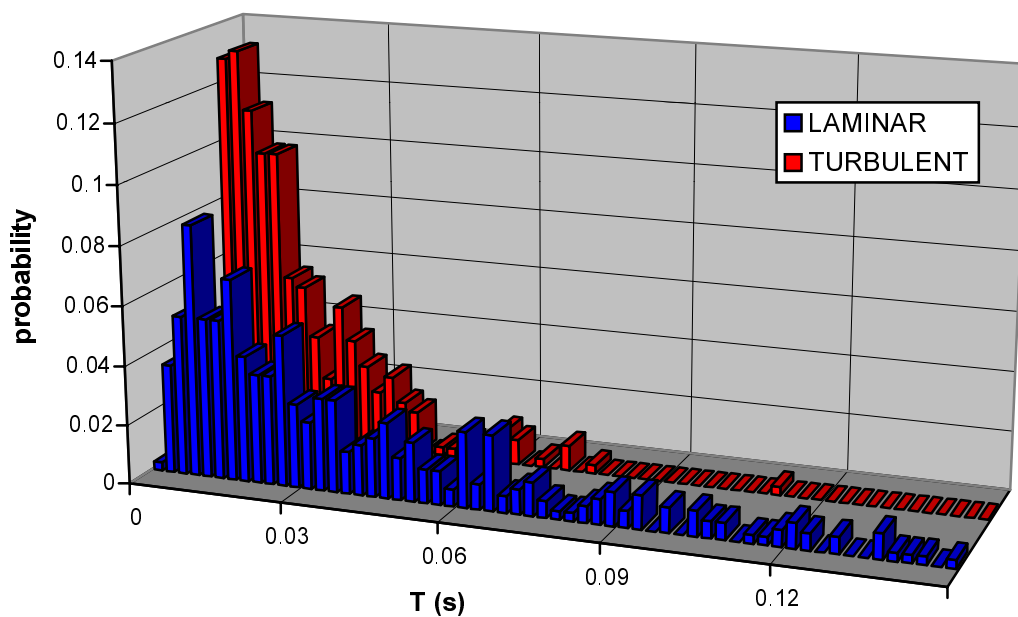
Dále uvedeme výsledky vyhodnocených průměrných délek laminárních T_L resp. turbulentních úseků T_T . Hodnota 0 odpovídá případu, kdy se daný typ signálu ve zkoumaném vzorku vůbec nevyskytuje; potom druhý typ signálu vyplňuje celou délku vzorku, která byla 20s. Rozložení průměrných délek laminárních resp. turbulentních částí signálů v rovině symetrie je uvedeno na obr.3.



Obr.3 a, b – Rozložení průměrných délek laminárních (a) a turbulentních částí signálu

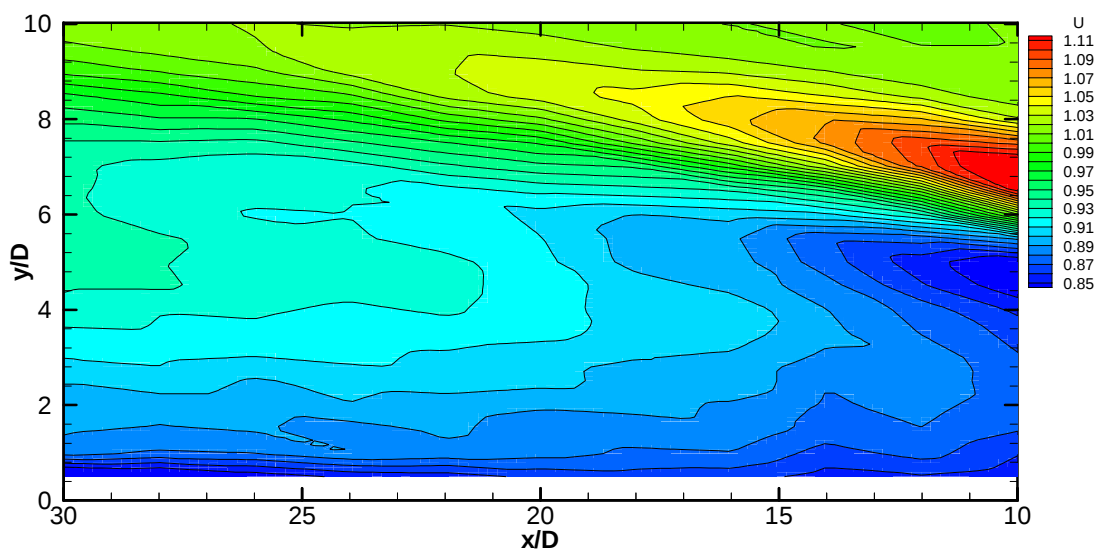
Na obr.3 jsou **červenou** barvou znázorněny oblasti s průměrnou délkou signálu delší než 0,1s. V těchto oblastech má druhý typ signálu naopak velmi krátkou průměrnou periodu.

Dále na obr.4 uvádíme příklad histogramu délek laminárních a turbulentních částí signálu v určitém bodě ($x/D=10$, $y/D=7$, $z/D=0$). Vidíme zde typické lognormální rozdělení pravděpodobnosti v obou případech.

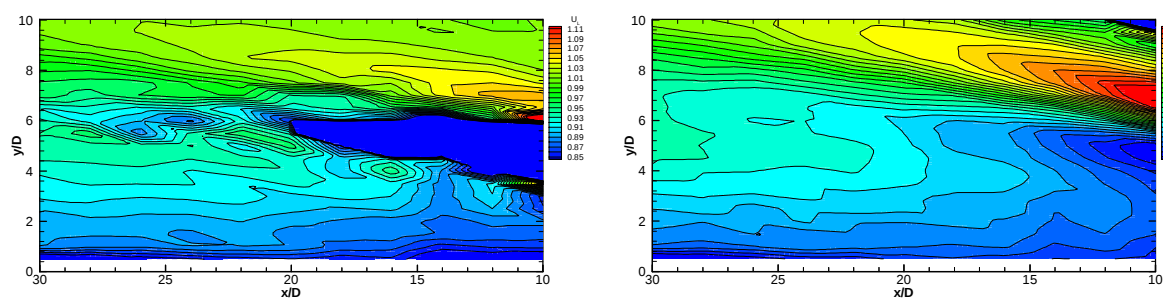


Obr.4 – Příklad histogramů délek laminárních a turbulentních úseků

Dále byla provedena statistická analýza signálu jako celku i jeho laminární a turbulentní části. V místech, kde není daný typ signálu přítomen je nastavena hodnota všech statistických charakteristik rovna 0. Na obr.5 jsou uvedeny rozložení časově středních hodnot podélné složky rychlosti, na obr.6 je rozložení variancí a konečně na obr.7 jsou součinitelé excessu v rovině symetrie.

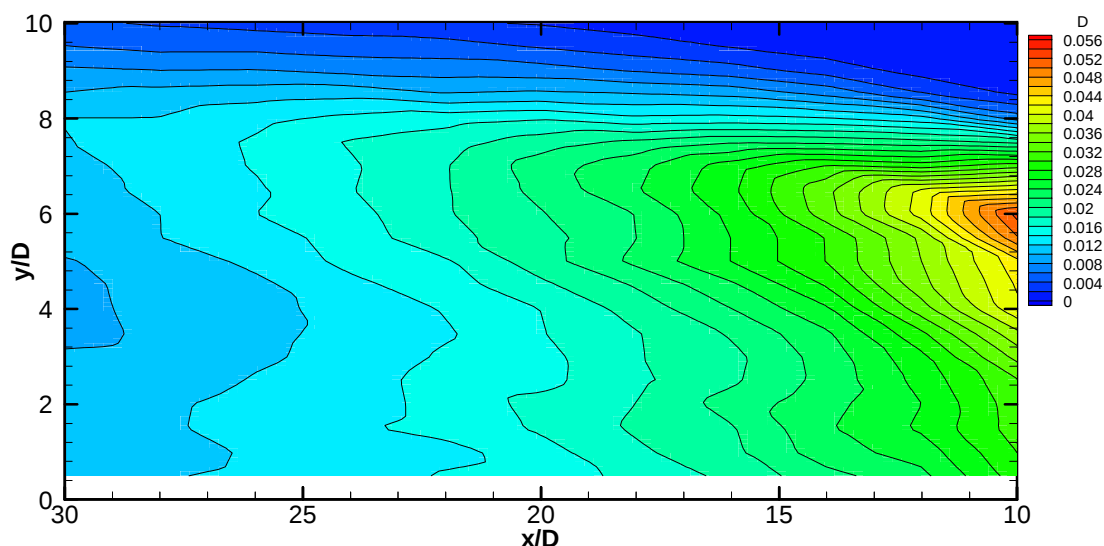


Obr.5 a – Rozložení středních hodnot podélné složky rychlosti kompletního signálu

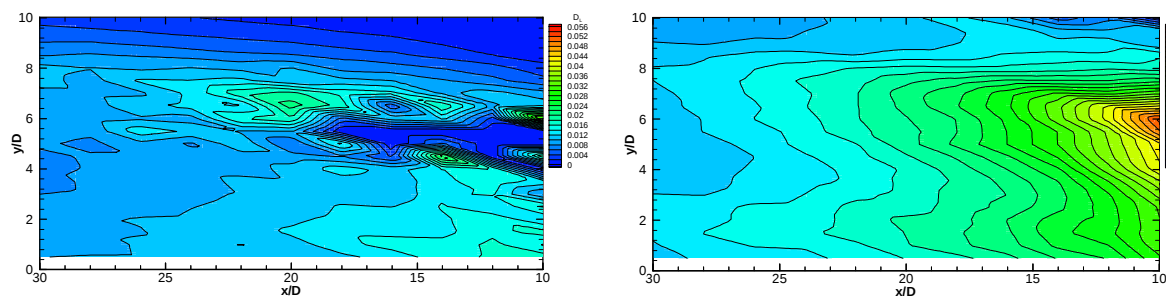


Obr.5 b, c – Rozložení středních hodnot podélné složky rychlosti laminární (b) a turbulentní (c) části signálu

Střední hodnoty rychlosti jsou vztaženy k rychlosti nabíhajícího příčného proudu. Na obrázcích 5 vidíme, že střední hodnoty podélné složky rychlosti laminární a turbulentní části signálu se v intermitentních oblastech příliš neliší, v oblasti plně turbulentního, resp. laminárního signálu je nastavena hodnota rychlosti druhé ze složek 0.

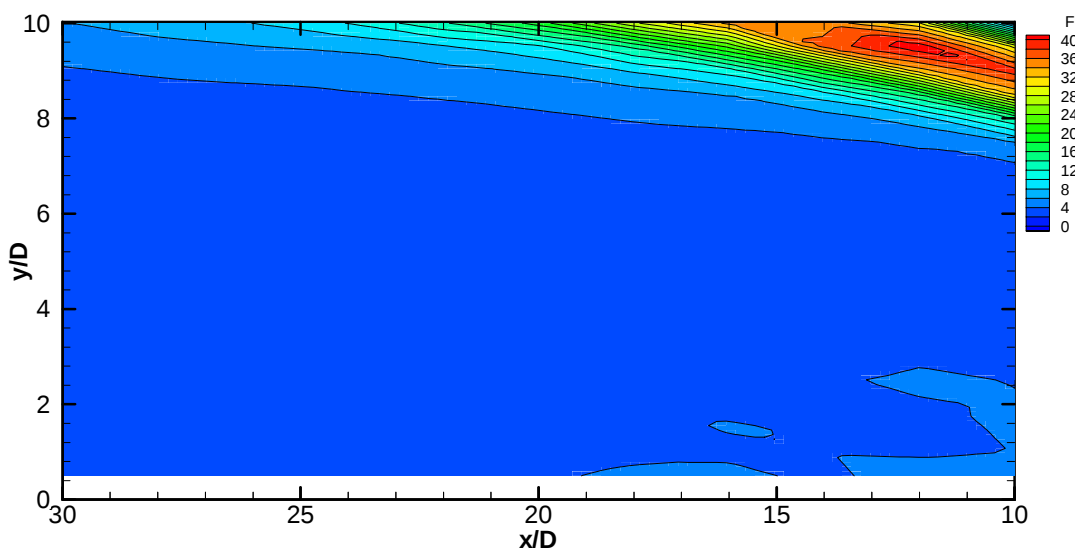


Obr.6 a – Rozložení variancí podélné složky rychlosti kompletního signálu

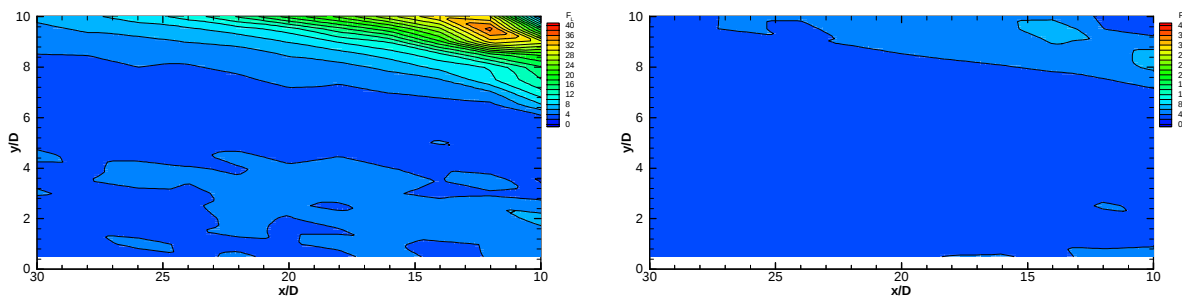


Obr.6 b, c – Rozložení variancí podélné složky rychlosti laminární (b) a turbulentní (c) části signálu

Hodnoty variancí jsou vztaženy ke kvadrátu rychlosti příčného proudu. Podle očekávání jsme vyhodnotili daleko vyšší hodnoty variancí pro turbulentní části signálů než pro laminární.



Obr.7 a – Rozložení součinitele excessu podélné složky rychlosti kompletního signálu



Obr.7 b, c – Rozložení součinitele excessu podélné složky rychlosti laminární (b) a turbulentní (c) části signálu

Z obr.7 vidíme, že za zvýšené hodnoty součinitele excessu v okolí hranice oblasti interakce je zodpovědná laminární složka signálu, turbulentní část vykazuje hodnoty blízké normálnímu rozdělení v celé sledované oblasti.

5. ZÁVĚR

Výsledky uvedené v této práci byly získány pomocí analýzy časových průběhů podélné složky rychlosti tak, že se zkoumá charakter místních fluktuací rychlosti. Tím je také dán význam takto získaných výsledků. Někteří autoři preferují indikaci pomocí prostorových vlastností vektoru rychlosti. Je si třeba také uvědomit, že intermitence laminárních a turbulentních částí signálu nesouvisí jednoduše s výskytem tekutiny pocházející z paprsku a příčného proudu, jak experimentálně ukázal např. Andreopoulos v [1].

6. PODĚKOVÁNÍ

Práce vznikla za podpory grantu COST OC715.90 podporovaného z rozpočtu MŠMT a grantu GAČR číslo 101/98/K001.

7. LITERATURA

- [1] Andreopoulos, J., 1983, "On the structure of jet in a crossflow", *J.Fluid Mech.*, vol.157, pp.163-197.
- [2] Luxa, M., Uruba V., 2000, "Visualisation of Jet in Cross-Flow", In: *Proceedings of colloquium Dynamics of Fluids 2000*, Praha 24-25 / 10 / 2000, pp.75-76.
- [3] Uruba, V., Mazur, O., Jonáš, P., 2000, „The Instabilities in Jet-Cross Flow Interaction“, In: *Proceedings of Engineering Mechanics 2000*, Svatka, May 15-18 2000, vol.IV, pp 129-134.
- [4] Uruba, V., Mazur, O., Jonáš, P., 2000, "On the Influence of the Cross Flow Structure Interacting with a Perpendicular Jet", In: *Book of abstracts of Annual Scientific Conference, GAMM*, Göttingen, 2-7 April 2000, pp.155-156
- [5] Uruba, V., Mazur, O., Jonáš, P., Hemrle, J., 1999, "On the Unsteady Characteristics of the Jet – Cross Flow Interaction", In: *Proceedings of colloquium Dynamics of Fluids '99*, Praha 19-20 October 1999, pp.219-224.
- [6] Uruba, V., Mazur, O., Jonáš, P., Hemrle, J., 1999, "On the Jet - Cross Flow Interaction", In: *Book of abstracts, EUROMECH Colloquium 391 "Wind tunnel modelling of dispersion in environmental flows"*, Prague, September, 13-15, 1999 pp.56-57.
- [7] Uruba V., Jonáš P., Mazur O., 1999, "Facility for Experimental Investigation of Jet-Cross flow Interaction", In: *Proceedings of Engineering Mechanics '99*, Svatka, May 17-20 1999, vol.3, pp 737-740.
- [8] Hemrle J., Uruba V., 1998, "On the Steady 3D Pattern of a Jet – Cross-Flow Mixing Zone", In: *Proceedings of colloquium Dynamics of Fluids '98*, Praha 20-22 October 1998, pp.19-20.
- [9] Uruba V., Jonáš P., Mazur O., 1998, "The Methods of Intermittency Analysis", In: *Proceedings of Engineering Mechanics '98*, Svatka, May 11-14, 1998, vol.4, pp.781-786.
- [10] Uruba V., 1997, "A Review of Jet in Cross Flow Research", In: *Proceedings of colloquium Dynamics of Fluids '97*, Praha 21.-23.10.1997, pp.53-54.
- [11] Zhang, D.H., Chew, Y.T., Winoto, S.H., 1996, "Investigation of Intermittency Measurement Methods for Transitional Boundary Layer Flows", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier, pp.433-443.