

PRELIMINARY RESULTS ON EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A JET — SHEAR FLOW INTERACTION

V. Uruba¹, P. Jonáš¹, O. Mazur¹

Summary: *A qualitative analysis of influence of cross-flow shear on its interaction with a jet emanating perpendicularly from the wall is presented. The linear shear flow was generated using a deformed screen. The shear cross-flow case was compared with a comparative regular cross-flow case. The jet / cross-flow velocity ratio was of about 5 maintaining approximately the same shape of the jet centreline for both cases. As results, considerably higher velocity deficit in the jet wake has been observed for the shear cross-flow case than for the regular case. On the other hand the structure of the bend jet is very similar in both cases. Also the size of the zone of interaction is much larger in lateral direction for the shear cross-flow case.*

Úvod

Interakce paprsku s příčným proudem je na našem pracovišti experimentálně vyšetřována po řadu let v rámci několika projektů. Výsledky byly průběžně publikovány – viz např. [2-11]. Byl vyšetřován vliv poměru rychlostí paprsku a příčného proudu a dále vliv struktury příčného proudu na interakci. Struktura příčného proudu byla uvažována s vysokou a nízkou hladinou turbulence. S ohledem na možné aplikace v proudění v přízemní atmosférické mezní vrstvě bylo rozhodnuto kvalitativně prozkoumat vliv gradientu příčné rychlosti na interakci.

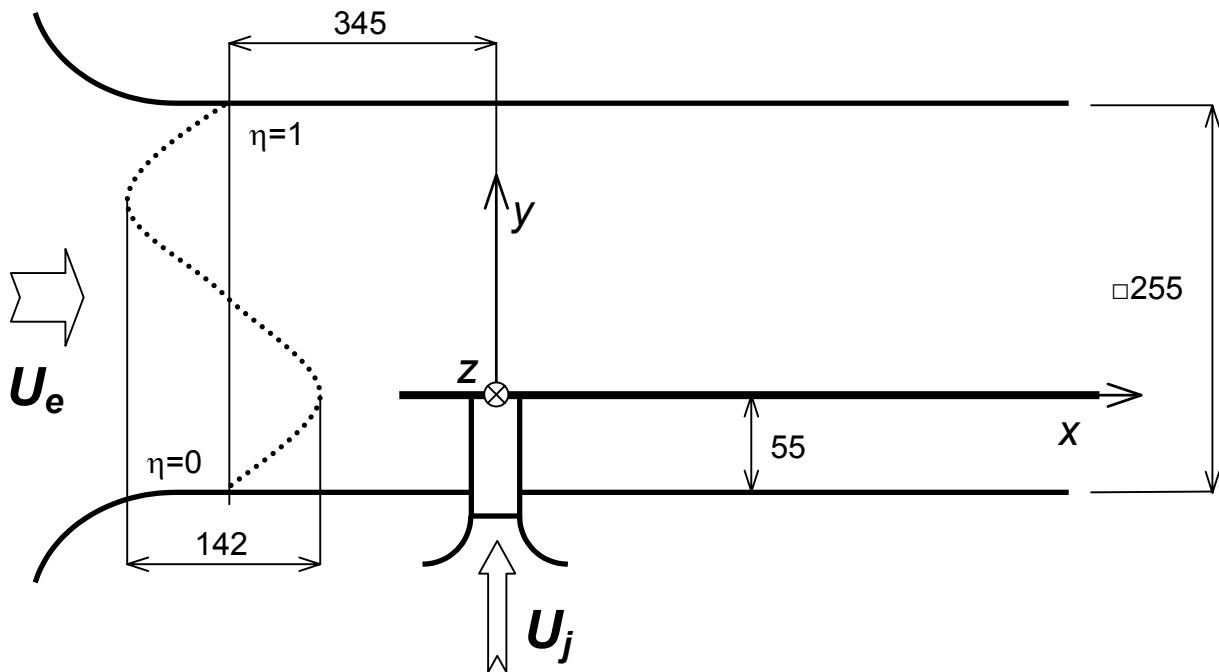
Vliv příčného gradientu budeme zkoumat tak, že porovnáme dva případy. První případ s generovaným smykovým příčným proudem a druhý referenční s rovnoměrným příčným proudem. Poměr rychlosti paprsku a příčného proudu byl zvolen tak, aby tvar střední čáry paprsku byl v obou případech přibližně týž. Jeho hodnota v referenčním případě byla přibližně 5. Při studiu jsme se zaměřili na oblast interakce pod paprskem.

Experimentální zařízení

Experimentální zařízení – výtlačná aerodynamická trať byla podrobně popsána v článku [12]. Jedná se o trať s měřicím prostorem o rozměrech 250 x 250 x 800 mm³ s vloženou deskou a dýzou s ústím o průměru $D = 13.3$ mm pro generaci paprsku kolmého k příčnému proudem. Deska byla na konci opatřena křídélkem, které brání odtržení mezní vrstvy v blízkosti náběžné hrany. V prizmatické kazetě zařazené proti proudem před měřicím prostorem byl umístěn ve vzdálenosti 345 mm od osy paprsku generátor smykového proudu. Celá situace je

¹ Ing. Václav Uruba, CSc, RNDr. Pavel Jonáš, DrSc, Oton Mazur, prom.fyz., Ústav termomechaniky AV ČR, Dolejškova 5, 182 00 Praha 8, tel.: +420 / 286 588 547, fax: +420 / 286 854 695, e-mail: uruba@it.cas.cz

schematicky znázorněna na obr.1. Je zde také naznačeno zavedení souřadného systému s počátkem uprostřed ústí dýzy.



Obr.1 – Schema uspořádání experimentu

Pro měření pole rychlostí byl použit CTA anemometr StreamLine od firmy DANTEC, který byl řízen pomocí PC. Použitá sonda byla od téže firmy s jedním kolmým drátkem (typ 55P01). Byla tedy měřena pouze podélná složka rychlosti. Signál byl digitalizován pomocí karty sběru dat firmy UEI s rozlišením 14bitů. V každém měřeném bodě byl zaznamenán signál o délce 10s vzorkovací frekvencí 25kHz (celkem 250 tisíc vzorků). Záznam byl uložen na disk pro další zpracování.

Pro měření bylo použito traverzovací zařízení, které umožňovalo posuv ve směru x v rozsahu $0 - 30D$, ve směru y v rozsahu $0.5D$ až $9.5D$ a ve směru z potom $\pm 7D$.

Okrajové podmínky

Pro generování smykového proudu byl použit generátor s deformovaným sítem dle Eldera. Síto bylo prohnuto do tvaru písmene „S“. Způsob funkce a návrh tohoto generátoru byl popsán v práci [2].

Elder teoreticky odvodil tvar profilu střední rychlosti pro zadaný tvar a parametry síta. Vyřešil také úlohu inverzní, kdy se určuje pro požadovaný tvar profilu střední rychlosti tvar daného síta. Pro náš účel jsme zvolili generátor konstantního příčného gradientu střední rychlosti v kanále v příčném směru. V Elderově práci [1] je pro tento případ odvozen vztah pro prohnutí síta ve tvaru:

$$C \cdot \zeta = -0.915a + \frac{1}{3}a^3 + \frac{1}{60}a^5 + \frac{1}{1680}a^7 \quad (1)$$

kde C je konstanta,

$$a = \pi \left(\eta - \frac{1}{2} \right),$$

ζ je místní prohnutí síta,

η je bezrozměrná souřadnice napříč proudem.

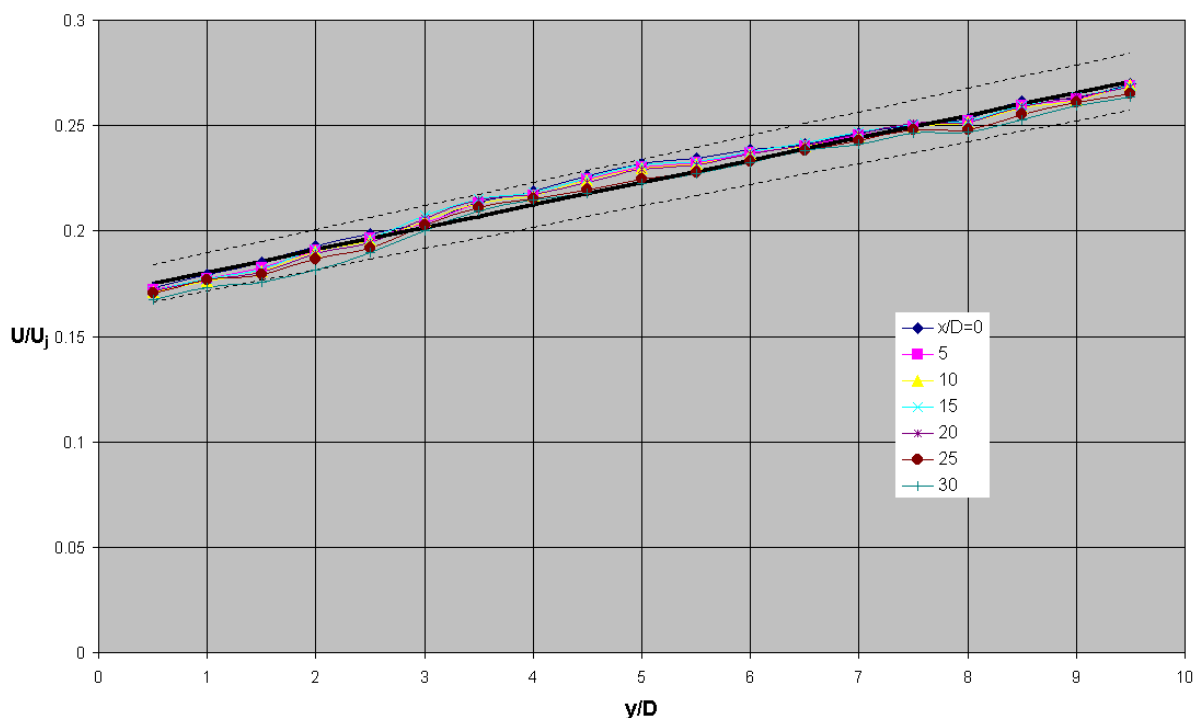
Velikost konstanty C ve vztahu (1) závisí na parametrech síta i proudu a na požadovaném sešikmení proudu.

Pro výrobu generátoru jsme použili bronzové síto se čtvercovými oky s roztečí 0.357mm a průměrem vlákna 0.1mm. Propustnost síta je 52 %.

Bylo proměřeno rozložení rychlosti za generátorem smykového proudu v rozsahu $x = 0$ až $30D$ bez přítomnosti paprsku. Všechny hodnoty střední rychlosti naměřené v různých bodech byly vztaženy k hodnotě rychlosti paprsku U_j , která byla pro oba případy stejná (asi 40 m/s). Na obr.2 jsou profily střední rychlosti změřené v ose měřicího prostoru ($z = 0$). Vidíme, že ve sledované oblasti dostáváme téměř lineární průběh rychlosti v příčném směru y , který ve zkoumaném rozsahu x prakticky nezávisí na vzdálenosti od síta. Průběh lze aproximovat vztahem:

$$\frac{U}{U_j} = A + B \frac{y}{D} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

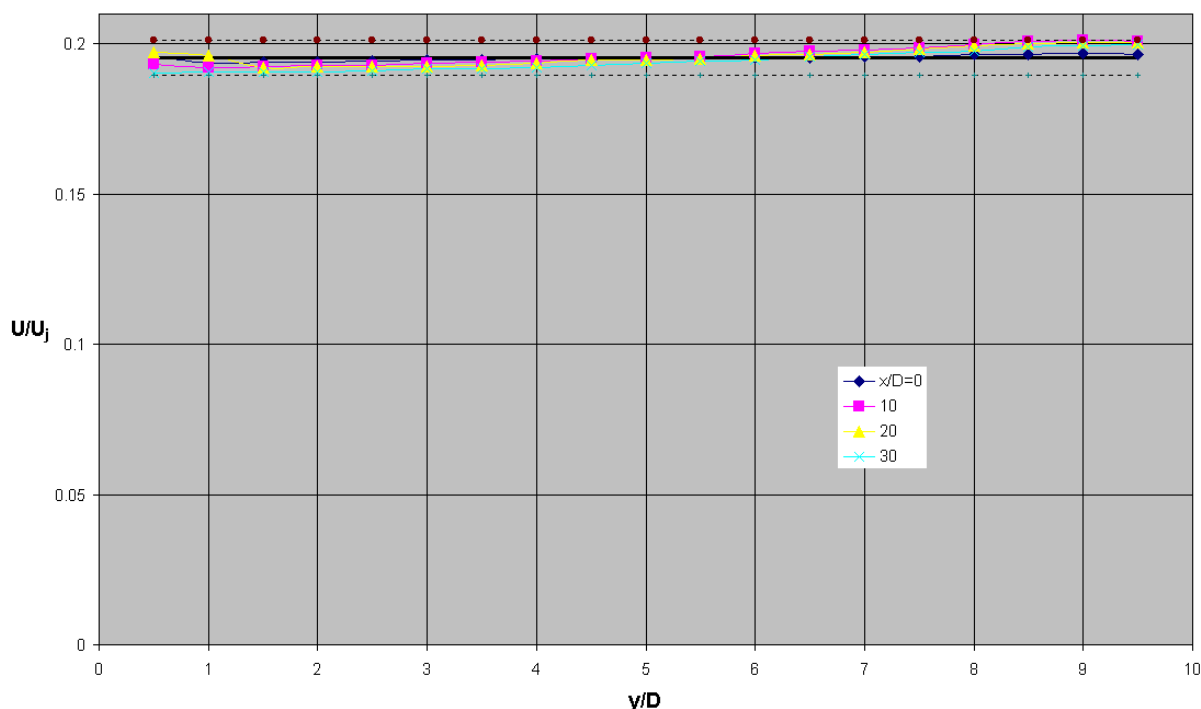
kde $A = 0.1699$, $B = 0.01063$. Naměřené body se potom pohybují v pásmu ± 5 %. Intenzita turbulence se pohybovala v rozmezí od 0.5 do 1 %.



Obr.2 – Profily středních rychlostí v ose měřicího prostoru za generátorem smykového proudu bez paprsku

Referenční případ je charakterizován konstantní hodnotou střední rychlosti příčného proudu. Na obr.3 jsou profily střední rychlosti v ose měřicího prostoru ($z = 0$) pro různé

hodnoty x . Odchyly od nominální hodnoty poměrné rychlosti 0.1954 jsou menší než 3 %. Intenzita fluktuací podélné složky rychlosti je v tomto případě pod 0.5 %.



Obr.3 – Profily středních rychlostí v ose měřicího prostoru v referenčním případě bez paprsku

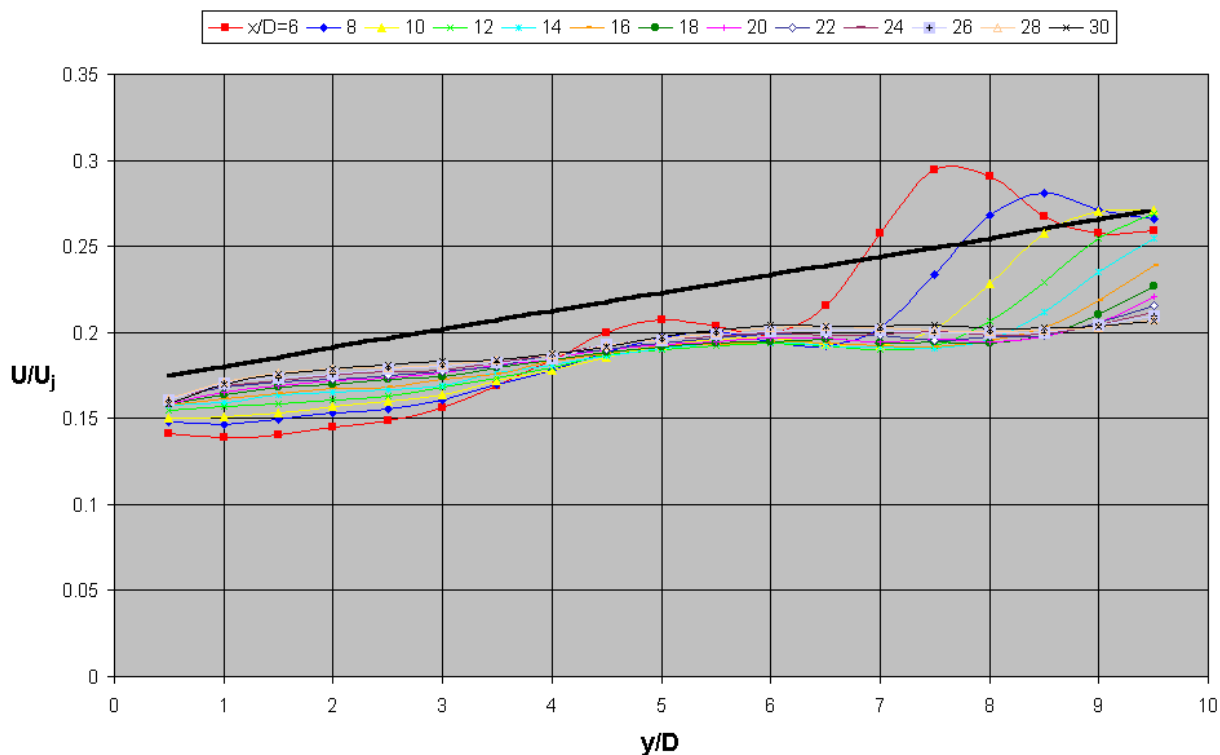
Mezní vrstva na desce byla podrobně proměřena pouze před ústím dýzy v místě $x = -1D$, její tloušťka v tomto místě je přibližně rovna $0.1D$.

Paprsek vystupující z kruhového ústí dýzy má nízkoturbulentní strukturu, rychlostní profil se blíží rovnoměrnému, mezní vrstvy na stěnách jsou velmi tenké.

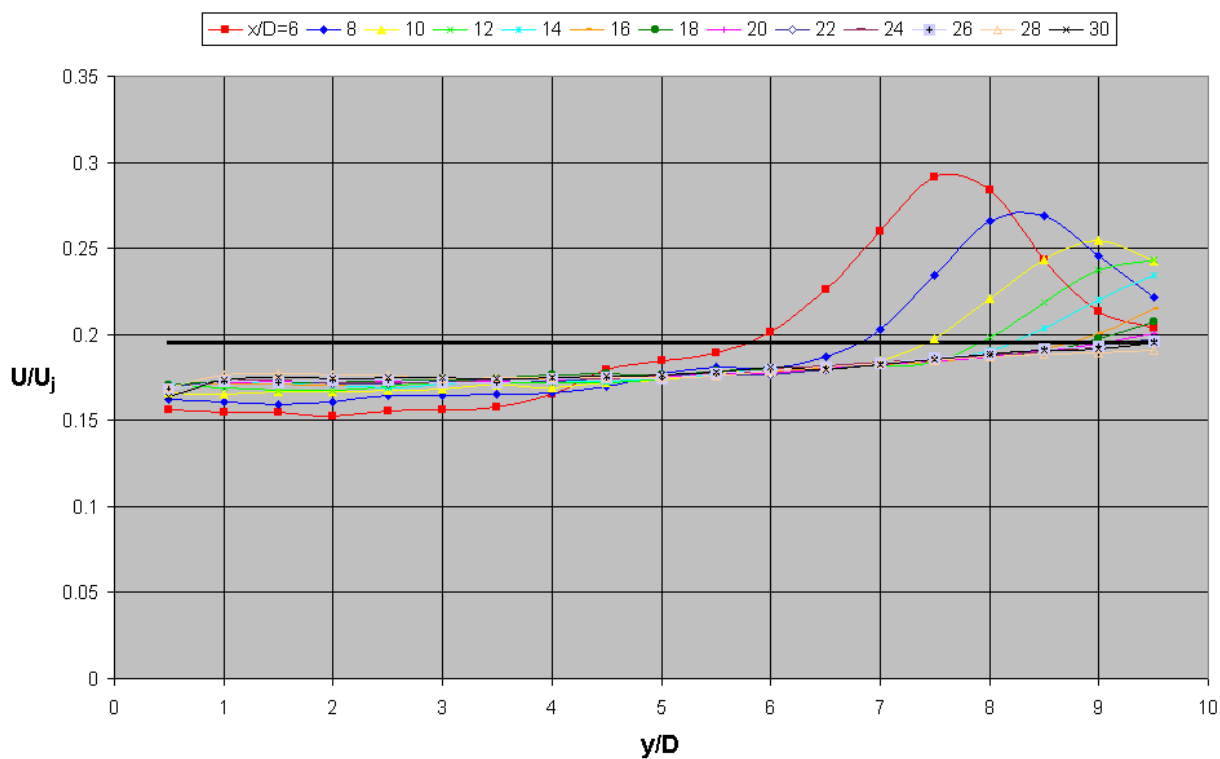
Výsledky

Byla podrobně proměřena rovina symetrie oblasti ($z = 0$) v rozsahu x/D od 6 do 30 a y/D od 0.5 do 9.5. Dále byly proměřeny tři roviny kolmé ke směru příčného proudu $x/D = 10, 20, 30$. Z důvodů symetrie byla měřena pouze polovina pro hodnoty souřadnice z kladné od 0 do $7D$.

Na obr.4a resp. 4b jsou vyneseny profily středních hodnot podélné složky rychlosti v rovině symetrie pro oba zkoumané případy příčného proudu. Profily byly měřeny ve směru y kolmém ke stěně v různých vzdálenostech od ústí dýzy. Pro orientaci byly v obou obrázcích vyneseny silnou černou čarou (přímku) odpovídající profily rychlosti bez přítomnosti paprsku. V oblasti pod paprskem je zřejmý deficit rychlosti v úplavu za paprskem, který brání pronikání tekutiny z příčného proudu. Tento deficit je od stěny (mimo mezní vrstvu) až po hranici paprsku přibližně konstantní, jeho hodnota je největší nejbližší ústí dýzy. V oblasti paprsku je rychlost naopak vyšší než rychlost samotného příčného proudu. Toto navýšení rychlosti je však mnohem nižší v případě smykového příčného proudu než pro rovnoměrný proud. V obou případech je však poloha i absolutní velikost maximu modulu podélné složky rychlosti prakticky stejná (např. pro $x=6D$ je poloha maxima rychlosti cca $7.5D$ a jeho hodnota asi $0.3 U_j$)

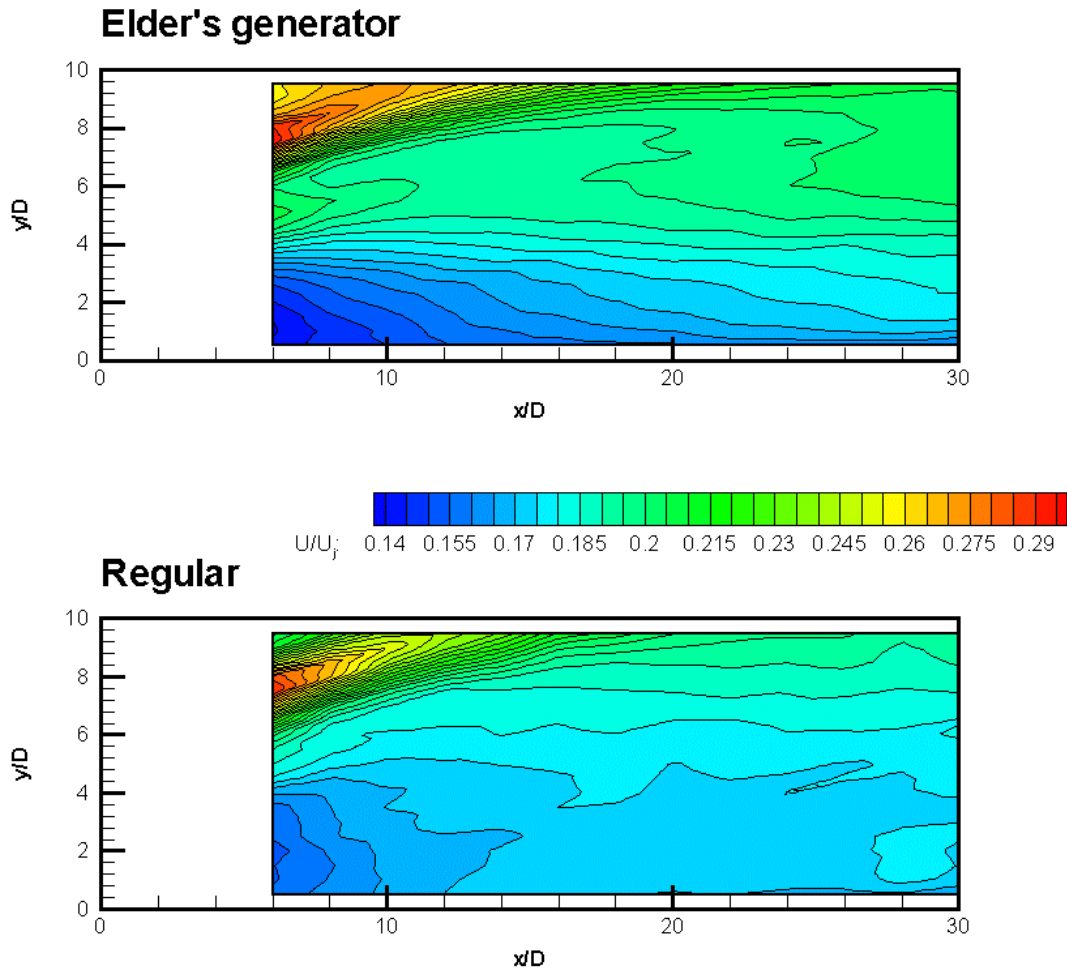


Obr.4a – Profily středních rychlostí v ose měřicího prostoru za generátorem smykového proudu s paprskem



Obr.4b – Profily středních rychlostí v ose měřicího prostoru v referenčním případě proudu s paprskem

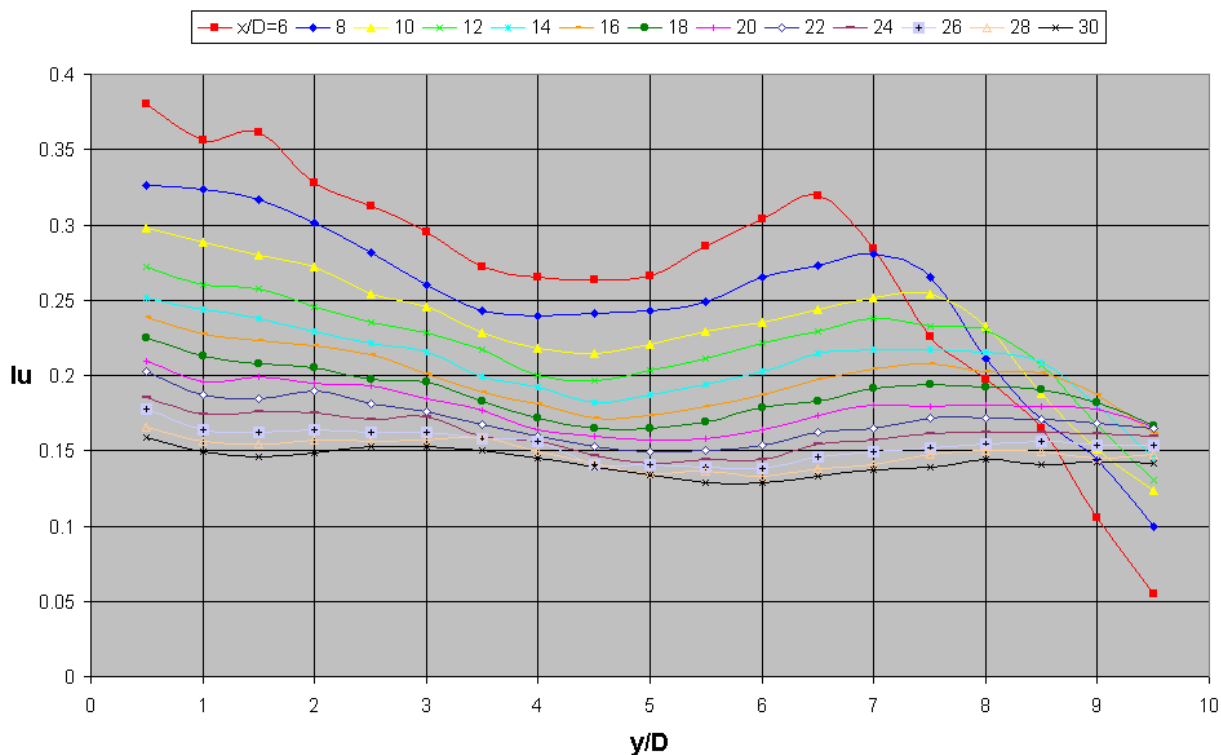
Situace je také dobře patrná z porovnání izolinií středních rychlostí pro oba případy, které je uvedeno na obr.5.



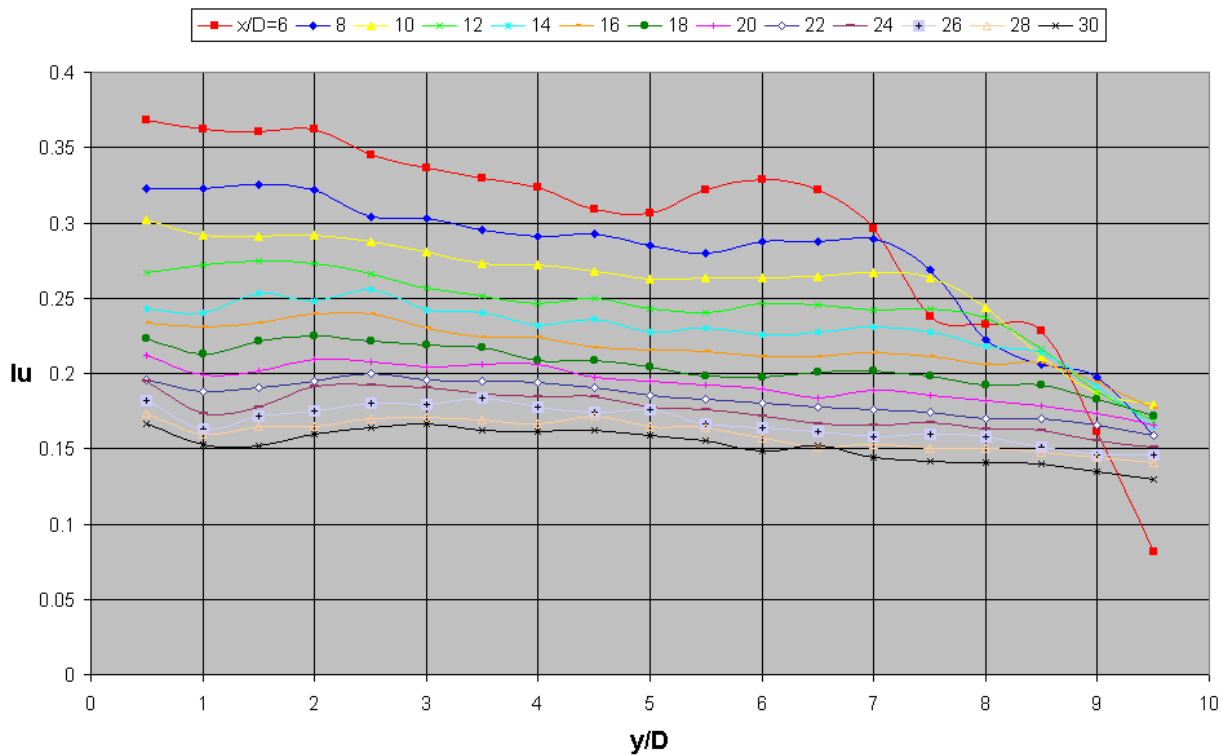
Obr.5 – Porovnání rozložení středních rychlostí v rovině symetrie pro případ smykového příčného proudu („Elder's generator“) a pro referenční případ („Regular“)

V případě smykového příčného proudu můžeme pozorovat vznik lokálního maxima rychlosti ve výšce nad deskou asi 2/3 výšky paprsku. Tento jev je patrný i z profilů na obr.4a.

Na obr.6a, resp. 6b jsou vyneseny profily intenzit fluktuací podélné složky rychlosti v rovině symetrie v případě smykového, resp. rovnoměrného příčného proudu. Z výsledků vyplývá, že intenzita fluktuací v oblasti interakce klesá se vzdáleností od ústí dýzy. Globální maximum se nachází v blízkosti stěny. Hodnoty intenzit fluktuací v blízkosti stěny i v okolí paprsku jsou pro dané vzdálenosti od ústí dýzy pro oba případy přibližně stejné. V případě smykového příčného proudu je v oblasti kolem poloviny výšky paprsku zřetelný pokles intenzity fluktuací, který je výraznější blíže ústí dýzy. U rovnoměrného příčného proudu tento pokles pozorován nebyl. Pokles intenzit fluktuací v oblasti nad paprskem je rychlejší pro nízké hodnoty x .

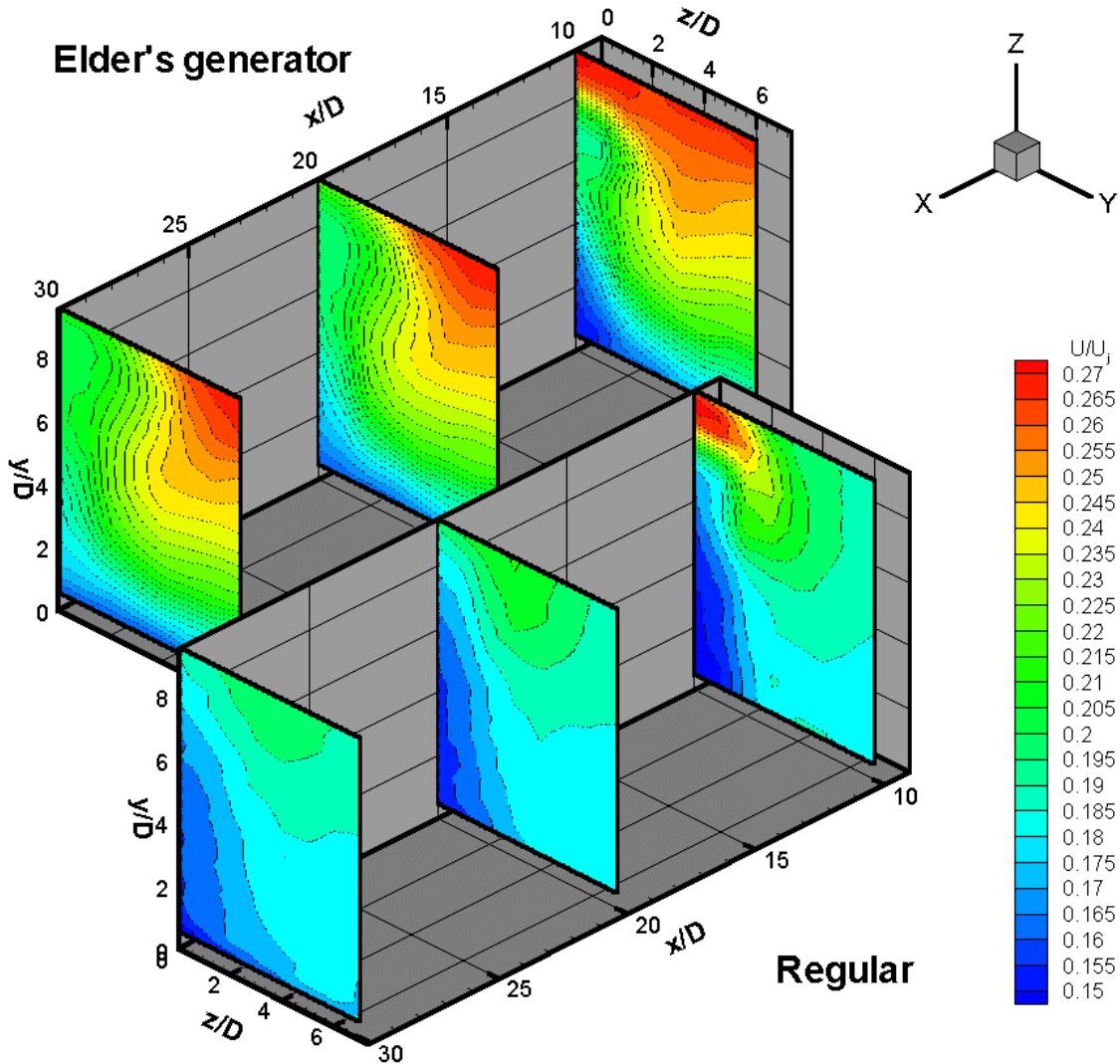


Obr.6a – Profily intenzit fluktuací podélné složky rychlosti v rovině symetrie za generátorem smykového proudu s paprskem



Obr.6b – Profily intenzit fluktuací podélné složky rychlosti v rovině symetrie v referenčním případě proudu s paprskem

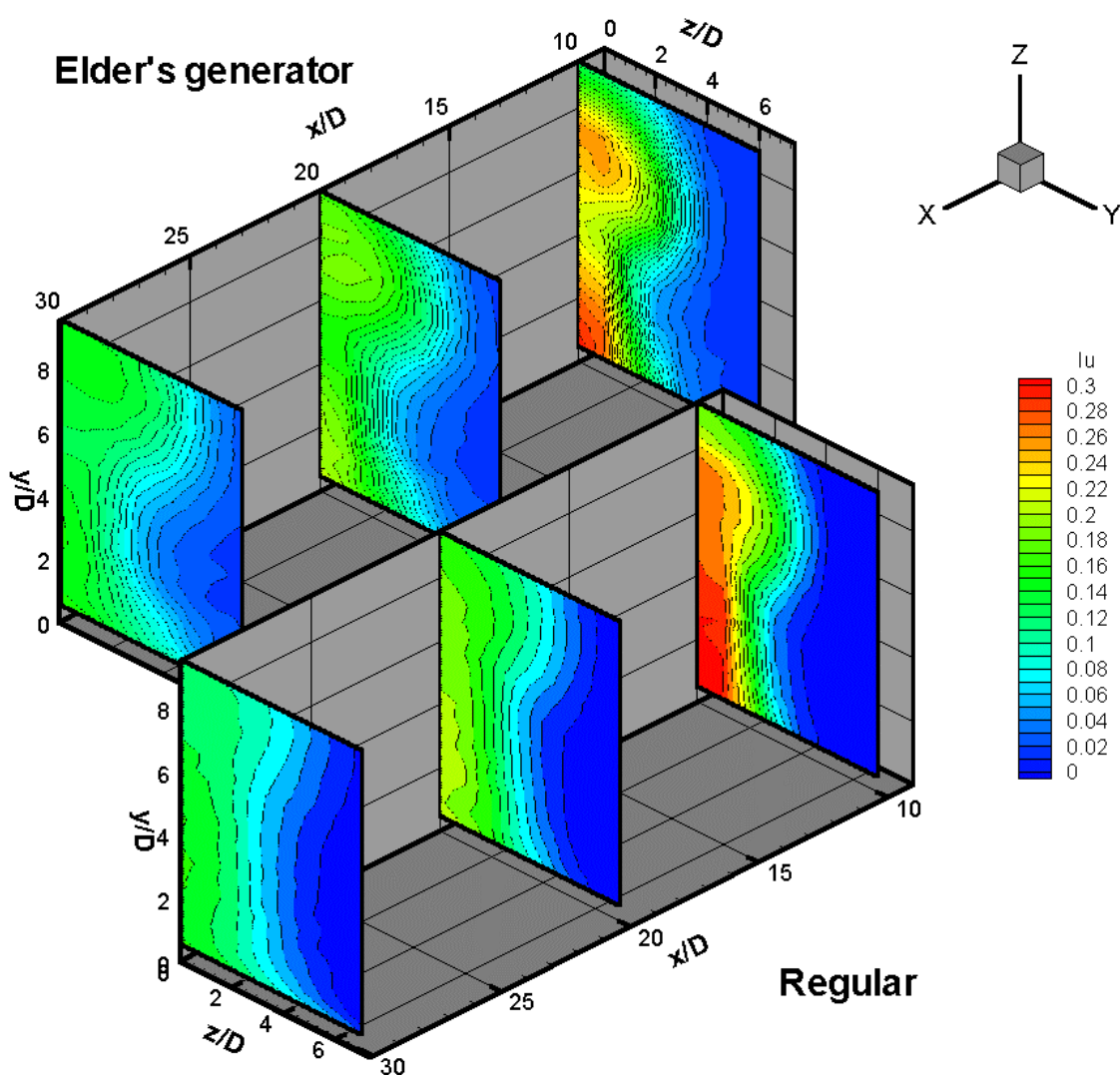
Dále jsou porovnány rozložení střední hodnoty podélné složky rychlosti a intenzity fluktuací podélné složky rychlosti v rovinách kolmých ke směru příčného proudu. Byly vybrány tři roviny pro x/D rovno 10, 20 a 30. Na obr.7 jsou znázorněny izotachy, na obr.8 potom čáry konstantní hodnoty intenzit podélné složky rychlosti.



Obr.7 – Porovnání rozložení středních hodnot podélné složky rychlosti

Pro oba případy je v rozložení střední rychlosti patrné, že na vnějším okraji (pro $z/D = 7$) přechází v hodnoty blízké příslušnému příčnému proudu bez přítomnosti paprsku. V oblasti úplavu za paprskem dochází k významnému snížení rychlosti. Tato oblast deficitu rychlosti je stranově i výškově limitována. Pro smykový příčný proud není v blízkosti desky (pro y/D menší než 2) deficit rychlosti pozorován, naopak velký deficit je v oblasti bezprostředně pod paprskem. V rovnoměrném příčném proudu je deficit patrný i v blízkosti stěny, výše je však oblast deficitu podstatně užší než v případě smykového příčného proudu. Rozdíl v šířce oblasti deficitu rychlosti se zvětšuje se vzdáleností od ústí paprsku.

Jak uvidíme dále, oblast deficitu rychlosti nelze ztotožnit s oblastí ovlivněnou interakcí. Lepším indikátorem k identifikaci této oblasti se jeví hladina fluktuací rychlosti. Vysoké hodnoty intenzit fluktuací nám indikují oblast narušení příčného proudu vlivem paprsku.



Obr.8 – Porovnání rozložení intenzit fluktuací podélné složky rychlosti

Na obr.8 vidíme typický tvar oblastí zvýšené intenzity fluktuací podélné složky rychlosti pro obě varianty a různé hodnoty x . Vidíme, že oblast interakce je nejširší v blízkosti paprsku a dále v bezprostřední blízkosti stěny. Nejužší místo je ve výšce y rovné asi $4D$. Lze konstatovat, že šířka oblasti interakce je podstatně větší v případě smykového příčného proudu než v případě proudu rovnoměrného.

Závěr

V předkládaném příspěvku jsou ukázány kvalitativní rozdíly v tvaru a velikosti oblasti interakce pro případ smykového a rovnoměrného příčného proudu.

Při případném pokračování výzkumu v této oblasti bychom se chtěli zaměřit na zkoumání velikosti, intenzity a polohy středů dominantních proti sobě rotujících vírů, které vznikají v oblasti ohýbajícího se paprsku.

Poděkování

Práce vznikla za podpory projektů COST OC715.90 a GAČR č.101/01/0449 financovaných z rozpočtu ČR.

Literatura

- [1] Elder, J.W., 1959, "Steady flow through non-uniform gauzes of arbitrary shape", Journal of Fluid Mechanics, Cambridge University Press, vol.5, pt.3, pp.355-368.
- [2] Uruba, V., 2002, "Flow Field Behind a Deformed Screen", In: Proceedings of Topical Problems of Fluid Mechanics 2002, February 22, 2002, Prague, pp.87-91.
- [3] Uruba, V., Jonáš, P., Mazur, O., 2001, "Coherent Structures in the Jet – Cross-Flow Mixing Zone", Proceedings of the 5th ISAIF, Gdansk, September 4 – 7, 2001, pp. 741-748.
- [4] Uruba, V., Mazur, O., Jonáš, P., 2000, „The Instabilities in Jet-Cross Flow Interaction“, In: Proceedings of Engineering Mechanics 2000, Svratka, May 15-18 2000, vol.IV, pp 129-134.
- [5] Uruba, V., Jonáš, P., Mazur, O., 2000, "On the Coherent Structure Behaviour in the Jet – Cross Flow Interaction", In: Book of Abstracts, 4th EUROMECH Fluid Mechanics Conference, 19 – 23 November 2000, Eindhoven, p.83.
- [6] 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
- [7] 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.
- [8] Uruba V., Jonáš P., Mazur O., 1999, "On the Unsteady Behaviour of a Jet – Cross Flow Mixing Zone“, In: Book of Abstracts, GAMM Annual Meeting, Metz, April 12-16, 1999, p 157.
- [9] Uruba, V., Mazur, O., Jonáš, P., 2001, "Intermittency Analysis in a Jet – Cross-Flow Interaction", In: Proceedings of Engineering Mechanics 2001, Svratka, May 14-17 2001, CDROM, 8 pages.
- [10] Uruba, V., Mazur, O., Jonáš, P., Luxa, M., 2001, "On the Jet – Cross-Flow Interaction“, In: Proceedings of the conference Topical Problems of Fluid Mechanics '2001, Praha 21/2/2001, pp. 125-128.
- [11] 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.
- [12] Uruba V., Jonáš P., Mazur O., 1999, "Facility for Experimental Investigation of Jet-Cross flow Interaction“, In: Proceedings of Engineering Mechanics '99, Svratka, May 17-20 1999, vol.3, pp 737-740.