
A CONTRIBUTION TO THE SIMILARITY STUDY OF 3D-FLOW IN A CHANNEL WITH A STEP EXPANSION OF THE CROSS-SECTION**P. Jonáš, O. Mazur, V. Uruba ***

Summary: *A new experimental set-up and measuring methods for the investigation of a channel flow with a backward-facing step on one wall are described. The rectangular cross section (0.275 m x 0.10 m) of the channel downstream from the step is unchanging. The height of the incoming channel H is adjustable so as to vary the ratio of step height h over H ; $h/H = 1:10, 1:4, 1.02:1$. The static pressure distribution measurements downstream the step-foot showed that the distances of these distributions extremes (minimum, zero crossing, maximum) from the step foot are independent on the ratios h/H if scaled by the step height h . A correlation between the mentioned extremes and limits of the separation zone and of the corner vortex follows from the preliminary analysis.*

1. Úvod

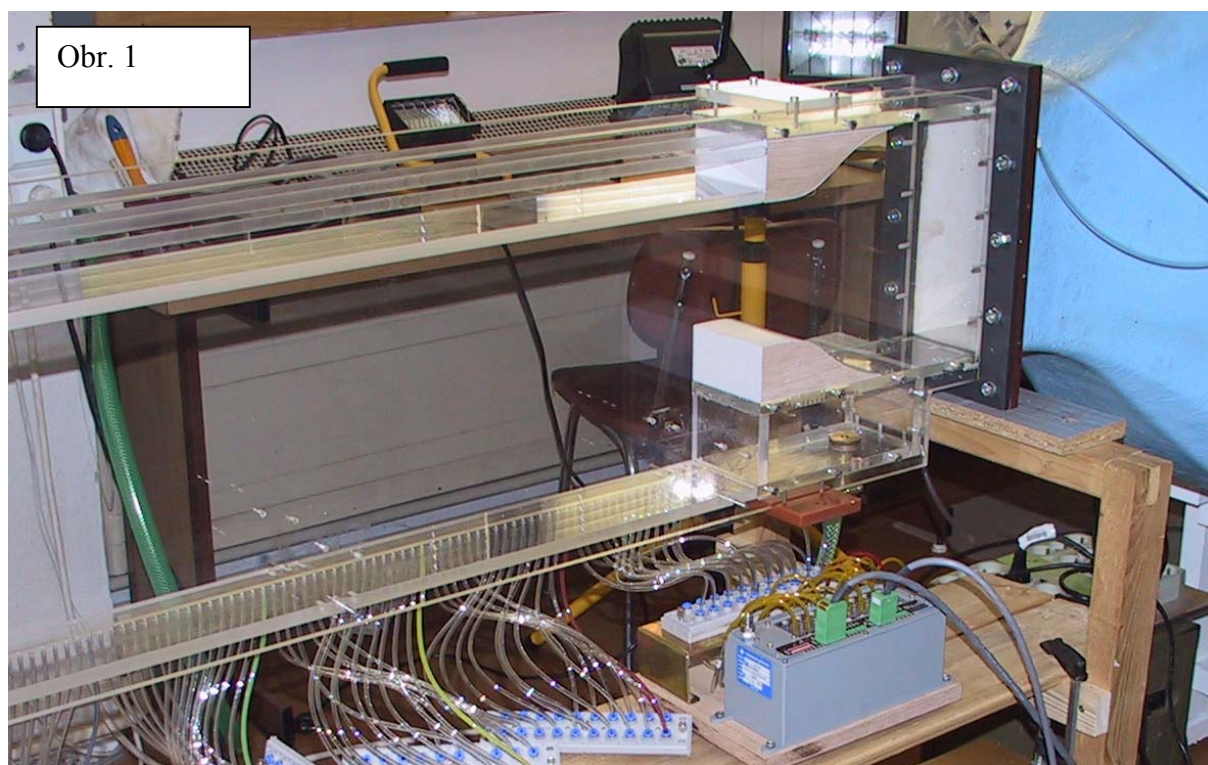
Studium proudění uzavřeným kanálem s náhlým jednostranným rozšířením průřezu, za „dozadu směřujícím schodem“ je významné pro poznání problematiky odtržených proudů i pro technické aplikace. Toto proudění je, vzhledem k jednoduchosti popisu a realizace geometrie hranic oblasti proudění a s přihlédnutím ke složité struktuře, velmi vhodným případem složitého smykového proudění (complex flow) pro experimentální studium a shromažďování podkladů pro vývoj a testování matematických modelů. Při řádově stejných rozměrech stran průřezu kanálu je obtékání dozadu směřujícího schodu prostorové a je výsledkem několika interakcí smykových vrstev, které vyvolají v proudu poruchy klasifikované podle Bradshawa & Wonga (1972) jako silné a pozměňující. Nejprve se mezní vrstva přicházejícího proudu (tloušťka δ_0) odtrhne na hraně schodu a na hranici oblasti odtržení se vytvoří volná smyková vrstva, která je zprvu příbuzná vrstvě míšení avšak silně se zakřivuje a významně se posléze liší od vrstvy míšení když se blíží ke znovu přilnutí ke stěně (Eaton & Johnston, 1981). Je to následek vysoké hladiny turbulence v recirkulačním odtrženém proudění, které vznikne tím že silný zpětný gradient tlaku u stěny obrací část tekutiny z volné smykové vrstvy směrem k patě schodu. Blízko stěny vznikají silné nestacionární interakce mezi volnou smykovou vrstvou, stěnou i recirkulačním proudem a následkem toho je znovu přilnutí proudění proměnné v čase i prostoru. Po proudu, pod zbytkem opět přilnuté smykové vrstvy, se začne vyvíjet nová mezní vrstva, která si dosti dlouho podrží ve vnější oblasti vlastnosti původní volné smykové vrstvy. Podle naznačeného

* RNDr. Pavel Jonáš, DrSc., Oton Mazur, prom. fyz., Ing. Václav Uruba, CSc.: Ústav termomechaniky AV ČR, Dolejškova 5, 182 00 Praha 8; tel.: +420.266 052 025, fax: +420.286 584 695, e-mail: jonas@it.cas.cz

scénáře probíhá 2D-obtékání schodu. Při konečné šířce schodu je nutné uvažovat rovněž interakce mezních vrstev na bočních stěnách kanálu s mezní vrstvou před schodem, s volnou smykovou vrstvou i s prouděním uvnitř oblasti odtržení (např. Biswas aj., 2004, Šulc aj., 2004 a Zubík & Šulc, 2004). Obtékání dozadu směřujícího schodu se řádově stejnou šířkou a výškou je proto prostorové. Z naznačeného rozboru plyne, že vlastnosti nabíhajícího proudu (homogenita, přítomnost sekundárních proudění, charakter a tloušťka mezních vrstev na stěně se schodem a na bočních stěnách, turbulence) mohou odtržení na hraně po proudu směřujícího schodu ovlivňovat. Proto je třeba věnovat velkou pozornost vlastnostem experimentálního zařízení.

2. Experimentální zařízení

Pro experimentální studium proudění kanálem s dozadu směřujícím schodem byla přestavěna výtlačná aerodynamická trati Ústavu termomechaniky AV ČR poháněná dmychadlem ČKD 11 kW. Návrh úprav a podrobný popis jsou uvedeny v literatuře Jonáš (2004) a Jonáš aj. (2004). Zde se omezíme na stručný popis. K základnímu měřicímu prostoru trati (průřez: $0.25 \times 0.1 \text{ m}^2$, délka 0.3 m) se připojuje kanál ($0.275 \times 0.1 \text{ m}^2$, délka 1.4 m) tak, že boční-svislé stěny hladce navazují a na dolní stěně vznikne schodovité rozšíření průřezu. Dolní i horní stěna jsou vodorovné a lze je přestavovat do různé výšky podle toho, jak vysoké kontrakční vložky se vkládají na výstup základního měřicího prostoru. Toto řešení umožňuje modelovat různá uspořádání výšky H , proudovodu nad schodem, výšky schodu h při stálé šířce 0.1 m a stálém výstupním průřezu kanálu ($0.275 \times 0.1 \text{ m}^2$). Na fotografii Obr. 1 jsou zobrazeny: konec kontrakce trati, základní měřicí prostor a navazující kanál v uspořádání $h/H = 1.02$; bílé součásti na konci základního měřicího prostoru jsou již zmíněné kontrakční vložky. Rozměrová schémata na Obr. 2 skýtají představu o úpravách kanálu pomocí kontrakčních vložek pro různé poměry h/H .



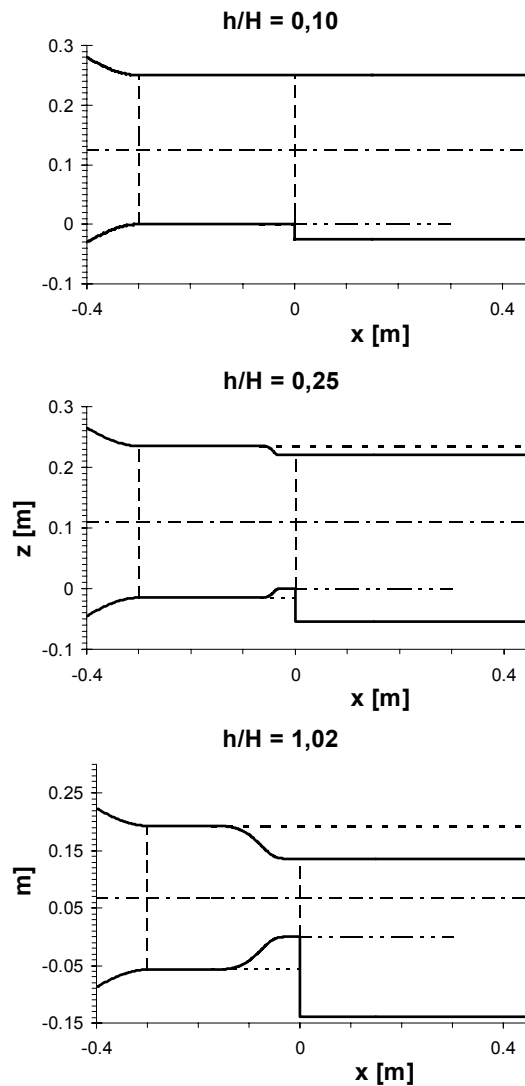
3. Metodika měření

Pro měření statického, P_s a celkového tlaku, P_c se používá sonda statického tlaku s polokulovou hlavou (průměr 2,5 mm) a Pitotova sonda s kruhovým ústím (průměr 1,6 mm). Profily v mezních vrstvách se měří Pitotovou sondou se zploštělým ústím ($2,3 \times 0,17 \text{ mm}^2$). Všechny uvedené rozměry sond se vztahují k vnějšímu povrchu. Sondy jsou unášeny 3D-posuvníkem DANTEC (t. C142-4). Tlakové rozdíly proti barometrickému tlaku B se snímají tlakovým převodníkem MKS t. 120A - Baratron ($\pm 0,05 \%$) současně s teplotou t [$^{\circ}\text{C}$] (odporový teploměr Pt-100). Tlak B a referenční tlak p_{ref} (rozdíl statického tlaku před kontrakční dýzou a tlaku B) se měří tlakovými převodníky aparatury Druck DPI 145 (přesnost $\pm 0,03\%$).

Rozložení statického tlaku na stěně po proudu za patou schodu se měří na výměnné dolní stěně kanálu (Obr. 1) šestnáctinásobným snímačem tlaků (Pressure Scanner Model 9010 fa Pressure Systems) ($\pm 2,5 \text{ Pa}$) ke kterému se postupně připojují speciálními spojkami skupiny šestnácti hadiček od odběrů statického tlaku na stěně. Měří se rozdíly $P_n = P_s(x_n) - B$, $n = 0$ až 15, 16 až 31 atd. až do $n = 126$.

Statistické charakteristiky turbulentních fluktuací rychlosti se měří termoanemometrem se žhavenými čidly. K systému DANTEC StreamLine se připojuje buď jednodrátková sonda DANTEC t. 55P01, pro měření pouze podélné složky rychlosti až do těsné blízkosti stěny, nebo „X“ sonda se dvěma drátky DANTEC t. 55P51 s drátky ve vodorovné nebo svislé rovině. Metodiku těchto měření popsali např. Jonáš (2000) a Mazur a Uruba (2000).

Dále se používá nátěrová metoda pro zviditelňování směru proudění v těsné blízkosti otékané stěny popsaná v knize Rosenheada (1963) a zdokonalená Jaňourem (1972). Magnesium vmíchané do kerosenu (7:100) s přidáním několika kapek převodového oleje se štětcem nanese v přiměřené vrstvě na povrch a neprodleně se nastaví režim proudění. Pohyb suspenze je určen rovnováhou gravitační, setrvačné a vnější tlakové síly. Po jisté době, závislé na teplotě a rychlosti proudu vzduchu a na tloušťce nanesené vrstvy, se částice uskupí do útvarů charakteristických pro přechod do turbulence, odtržení a znovu přilnutí proudu a rovněž zobrazí vírové útvary. Po zaschnutí se obraz proudění zaznamená digitálním fotoaparátem a dodatečně se analyzuje.

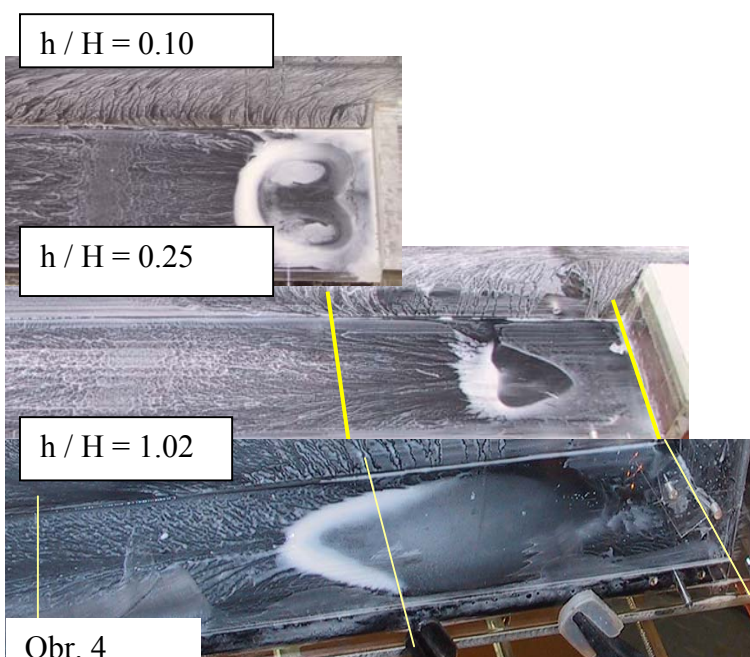


Obr. 2

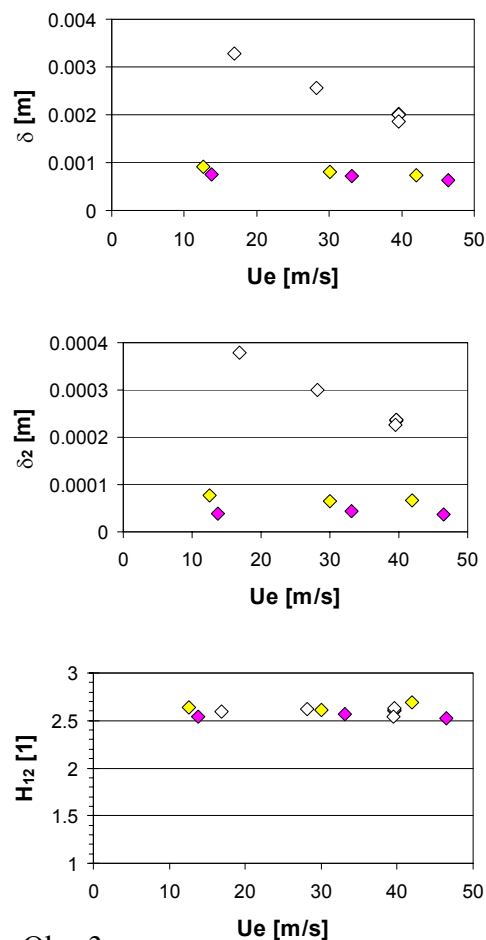
4. Vlastnosti vstupního proudu

Experimenty byly prováděny při rychlosti proudění před hranou schodu od 5 m/s do 55 m/s. Byly podrobně vyšetřeny vlastnosti proudění ve vzdálenosti 0.25 m po proudu od konce kontrakční dýzy (tj. $x = -0,05$ m) a 0.005 m před hranou schodu (tj. $x = -0.005$ m) pro uspořádání $h/H = 0.1$, 0.25 a 1.02.

Výsledky měření v rovině $x = -0.05$ m byly podrobně uvedeny v příspěvku Jonáš aj. (2004). Byla prokázána velmi dobrá homogenita polí tlaku a střední rychlosti v rovině $x = \text{konst.}$ Relativní odchylky místní rychlosti od průměru jsou řádu promile a pouze malé oblasti v koutech naznačují, že se začaly vyvíjet *koutové víry* (od výstupu z kontrakce tunelu je průřez proudovodu obdélníkový). S výjimkou těchto koutů jsou mezní vrstvy na stěnách tenké (δ řádu 10^{-3} m) s parametry odpovídajícími Blasiovu řešení laminární mezní vrstvy na stěně. Na Obr. 3 jsou v závislosti na rychlosti proudění, U_e před hranou schodu ($x = -0.005$ m) znázorněny půlprocentní rychlostní tloušťka δ , impulsová tloušťka δ_2 a tvarový parametr H_{12} mezní vrstvy v rovině symetrie kanálu ($x = -0.005$ m, $y = 0.05$ m) pro $h/H = 0,1$ (prázdné značky), $h/H = 0.25$ (šedé značky) a $h/H = 1.02$ (černé značky).



Obr. 4



Obr. 3

Dobrou homogenitu proudění potvrzují také měření turbulentních fluktuací rychlosti v rovině $x = -0.05$ m. Intenzita podélné složky je v převážné části intervalu rychlosti menší než 0.001 a pouze při rychlosti kolem $U_e \approx 18$ m/s vzroste k hodnotě 0.0015. Tento nárůst patrně souvisí s poruchami v proudění buzenými dmychadlem.

5. Výsledky měření v proudu za náhlým rozšířením kanálu

Nátěrovou metodou bylo zviditelňováno proudění při povrchu dolní stěny kanálu po proudu od paty schodu ($x=0$).

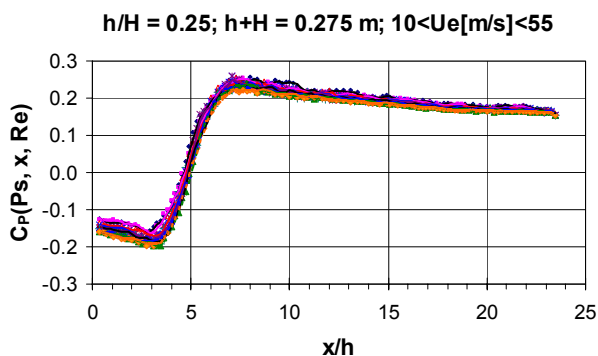
Na Obr. 4 jsou ukázky záznamů pro tři zkoušené poměry výšky schodu a výšky kanálu před hranou schodu $h/H = 0.1, 0.25$ a 1.02 (připomeňme $h+H = 0.275$ m ve všech případech). Při pozorném prohlížení se na Obr. 4 naleznou pásy odpovídající hranici znovu přilnutí proudění x_r ; tato hodnota odpovídá středu pásu. V případě vysokého schodu $h/H = 1.02$ nepostačila délka kanálu za schodem (1.4 m) k tomu aby došlo ke znovu přilnutí proudu. Ve všech ukázkách jsou zřejmé také podoblasti 3D-vířů u paty schodu zabírající prostor mezi $x = 0$ a $x = x'_r$; opět odpovídá tato vzdálenost středu bílého pásu do kterého víry odtlačí částice emulze magnesia. Poměr výšky schodu h k jeho šířce L_s rozhoduje o tom zda vzniknou dva protiběžné víry (odhadem $h/L_s < 0.5$) nebo víry splynou v jediný (Obr. 4b, c). V tabulce Tab. 1 jsou uvedeny relativní vzdálenosti x_r/h a x'_r/h vyhodnocené ze záznamů vizualizací.

Tab. 1	Průměr $h/H = \sim$	[%]	Průměr $h/H = 0.1$	[%]	Průměr $h/H = 0.25$	[%]	Průměr $h/H = 1.02$	[%]
x'_r	-	-	3.0	10.0	1.86	8.9	1.8	6.0
x_r	-	-	6.3	6.0	6.33	3.1	-	-
x_1	2.33	13.6	2.56	7.3	2.36	9.6	2.00	13.2
x_2	2.90	9.5	3.06	4.3	3.09	5.1	2.61	6.7
x_3	4.89	4.1	4.94	5.6	4.85	2.4	4.90	3.5
x_4	5.1	7.4	4.91	5.3	5.00	3.8	5.38	8.3
x_5	7.46	4.7	7.26	3.9	7.66	3.7	$x_5 > 9.3$	-

Rovněž byla měřena rozložení statického tlaku na dolní stěně kanálu a vyhodnoceny průběhy tlakového součinitele C_p

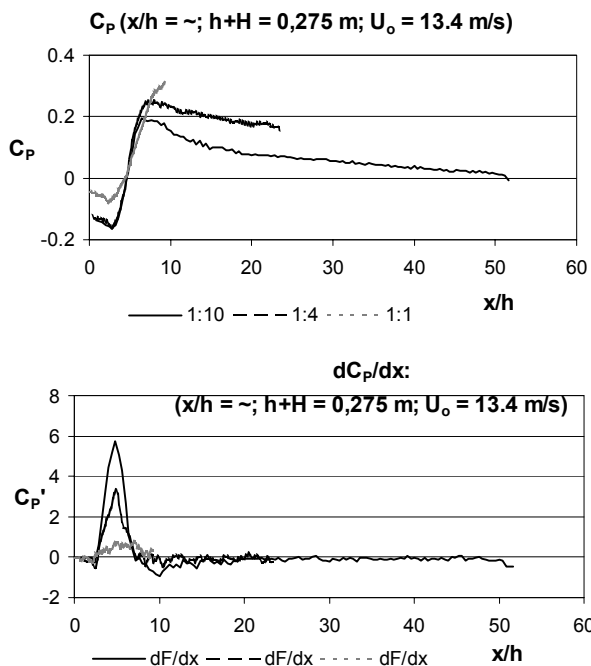
$$C_p(x) = \frac{P_s(x) - P_s(-0.005)}{0.5\rho U_e^2} \quad (1)$$

Na Obr. 5 jsou jako ukázka znázorněny všechny průběhy součinitele C_p změřené při uspořádání $h/H = 0.25$. Stejně soubory byly změřeny také v ostatních uspořádáních. Na Obr. 6 a 7 jsou pro hodnoty rychlosti $U_e = 13.4$ m/s a 50 m/s a tři různé výšky schodu zakreslena rozložení součinitel C_p a jeho derivace dC_p/dx . Na každém z podobných průběhů byly určeny vzdálenosti extrémů od paty schodu: x_1 je poloha minima derivace součinitele, x_2 popisuje polohu minima C_p , pro x_3 je $C_p = 0$, x_4 je odhad místa s maximální hodnotou derivace C_p a konečně x_5 je vzdálenost, ve které má součinitel C_p své maximum. Připomeňme, že podle Chandrsudy a Bradshawa (1981) se místu znovu přilnutí proudu nachází blízko maxima tlakového součinitele C_p . V Tab. 1 jsou průměry vzdáleností x_i ($i = 1$ až 5) uvedeny s odhady relativních chyb jejich odhadů. Na obr 8 a 9 jsou relativní vzdálenosti extrémů znázorněny v závislosti na Reynoldsově čísle definovaném pro

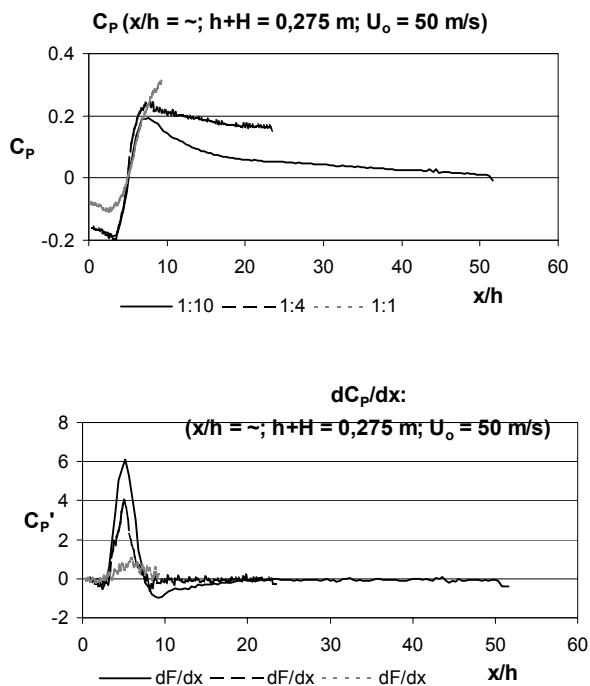


Obr. 5

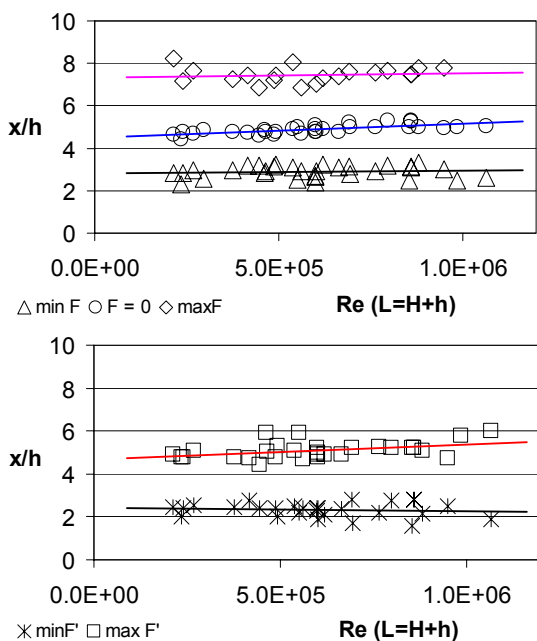
rychlost U_e a charakteristické délky $L = h+H$ (výška výstupního kanálu) a $L = h$ (výška schodu). Čáry představují lineární regrese vyneseny body. Vesměs je statistická přiléhavost těchto regresí velmi slabá a z daných souborů (intervaly hodnot Re) nelze na vliv Reynoldsova čísla usuzovat.



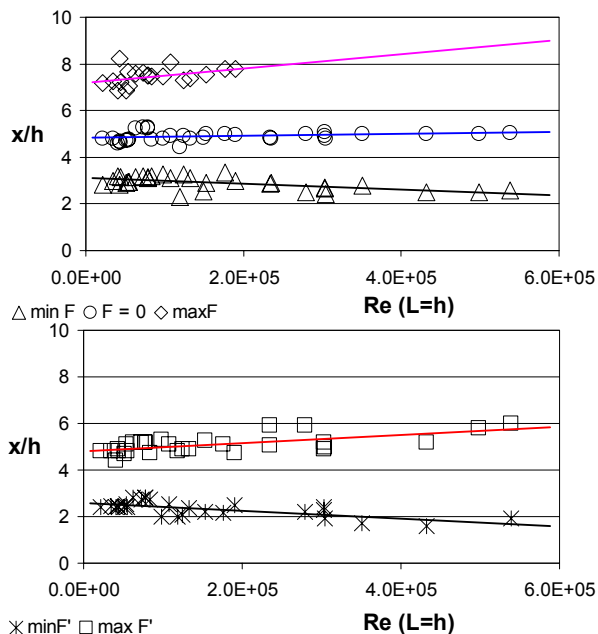
Obr. 6



Obr. 7



Obr. 8



Obr. 9

5. Závěr

V rovině $x = -0.05$ m byla prokázána velmi dobrá homogenita polí statického a celkového tlaku s odchylkami rychlosti od průměru řádu desetin procenta; pouze v koutech jsou slabé příznaky koutových vírů.

Před hranou schodu mají mezní vrstvy na stěnách tloušťku zhruba 1 až 3 mm a tvarový parametr odpovídající Blasiovu řešení mezní vrstvy na desce.

V celém rozsahu střední rychlosti je v jádru proudu intenzita turbulence kolem 0.1 procenta.

Proudění za náhlým rozšířením se vyznačuje dobrou symetrií kolem roviny symetrie (svislá).

Místo znovu přilnutí proudění se s časem rychle mění a dochází k němu v pásu širokém 15 až 20 mm; vzdálenost znovu přilnutí proudu x_r se měří ke středu pásu. Hranice x_r se nachází zhruba uprostřed mezi místy kde dosahují maximálních hodnot tlakový součinitel C_p (x_5) a jeho derivace dC_p/dx (x_4) $x_4 < x_r < x_5$.

Podoblast 3D-vířů u paty schodu $x < x'_r$ určená z vizualizace proudění u stěny je v místech kde je součinitel C_p záporný a končí dříve než C_p dosáhne minima $x = x_2$; přibližně platí $x'_r \sim x_1$, kde x_1 je poloha minima derivace.

Bez ohledu na velikost h/H prochází tlakový součinitel nulou ve vzdálenosti x/h blízké 5.

Z pozorování při uspořádání s výškou schodu srovnatelnou s výškou vstupního kanálu $h/H = 1.02$ je možné usuzovat na to, že délka kanálu za dozadu směřujícím schodem ovlivňuje oblast odtrženého recirkulačního proudění.

6. Poděkování

Práce vznikla s podporou Grantové agentury ČR v rámci projektu č. 101/03/0018.

7. Literatura

Biswas, G. – Breuer, M. – Durst, F. (2004) Backward-facing step flows for various expansion ratios at low and moderate Reynolds numbers. ASME J.Fluids Eng. Vol. 126, 362-374.

Bradshaw, P. – Wong, F.Y.F. (1972) The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer. J. Fluid Mech. Vol. 52, 113-135.

Eaton, J.K. – Johnston, J.P. (1981) A review of research on subsonic turbulent flow reattachment. AIAA Journal Vol. 19, No. 9, 1093-1100.

Chandrsuda, C. – Bradshaw, P. (1981) Turbulence structure of a reattaching mixing layer. J. Fluid Mech. Vol. 110, 171-194.

Jaňour, Z. (sen.) (1972) Mezní vrstva na křídle v silně turbulentním proudu. Zpráva VZLÚ č. V 1151/72.

Jonáš, P. – Mazur, O. – Uruba, V. (2004) Experimentální zařízení pro modelování odtržení proudu při schodovitém rozšíření kanálu. 4. Vodohospodářská konference 2004, Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT v Brně, Sešit 6 (ISBN80-7204-360-9), 205-212.

Jonáš, P. (2000) Termoanemometr – Možnosti a meze použití. In: Modelování a měření turbulence, H. Klášterka (ed.), VTS Škoda výzkum (ISBN80-238-5533-6), 169-186.

Jonáš, P. (2004) Návrh úpravy aerodynamického výtlačného tunelu pro výzkum proudění v kanálu s náhlým rozšířením průřezu. Sborník Topical Problems of Fluid Mechanics 2004, Eds. J. Příhoda, K. Kozel (ISBN 80-85918-86-2), 63-68.

Mazur, O. – Uruba, V. (2000) Nový přístup k měření termoanemometrem s X-sondou. . In: Modelování a měření turbulence, H. Klášterka (ed.), VTS Škoda výzkum (ISBN80-238-5533-6), 197-200.

Rosenhead, L. (1963) Laminar boundary layers. Clarendon Press, Oxford.

Šulc, J. – Lichtneger, P. – Zubík, P. (2004) Flow parameters measurement in the channel with negative step. Book of Abstracts Engineering Mechanics 2004, Zolotarev, I. & Poživilová A. (eds.), ÚT AV ČR Praha, ISBN 80-85918-88-9, 289-290, plný text CD ROOM.

Zubík, P. – Šulc, J. (2004) Měření proudění v kanálu s náhlým rozšířením průřezu. 4. Vodohospodářská konference 2004, Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT v Brně, Sešit 6 (ISBN80-7204-360-9), 579-586.