

ANALYSIS OF THE INTERNAL STRUCTURE OF FLOW IN A CHANNEL WITH NEGATIVE STEP

P. Zubík*, J. Šulc*

Summary: *Technique and results of measurement of flow parameters in the channel model of rectangular cross-section with a negative bottom step are presented. The flow was alternatively arranged with and without free water surface. The contact-less measuring techniques, i.e. Laser Doppler Anemometry (LDA) and Particle Image Velocimetry (PIV), were used for the measurement of mean and pulsation velocity components. The measurement was carried out in several different regimes of flow. The results of measurement in a relatively simple technical element were destined for subsequent calibration and verification of mathematical models of turbulent flow.*

1. Úvod

Laboratoř vodohospodářského výzkumu (LVV) Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně je spoluřešitelským pracovištěm výzkumného projektu podporovaného Grantovou agenturou České republiky „Vyšetřování turbulentního smykového proudění v kanálech s náhlým rozšířením průřezu“ reg. č.: 101/03/0018. V prvním roce řešení tohoto výzkumného projektu byl proveden experiment na přímém kanálu s rozšířením obdélníkového průřezu 200 x 180 mm na čtvercový průřez 200 x 200 mm (negativní stupeň ve dně 20 mm) při tlakovém proudění – publikováno na konferenci IM 2004. Následující text stručně prezentuje průběh a výsledky druhého roku řešení. Experiment navázal měření parametrů proudění na modelu shodného tvaru při provozu s volnou hladinou. Další série měření byly provedeny na kanálu s rozšířením průřezu 200 x 160 mm na průřez 200 x 200 mm (negativní stupeň ve dně 40 mm) při obou režimech proudění. Účelem experimentů bylo získat vstupní a ověřovací data pro „odladění“ matematických modelů realizovaných na řešitelském pracovišti – Ústav termomechaniky Akademie věd České republiky.

K měření byly použity dvě měřicí metody: rovinná laserová anemometrie (Particle Image Velocimetry (PIV)) – posloužila k měření rozložení rychlostí ve zvolených dvourozměrných řezech a bodová laserová anemometrie (Laser Doppler Anemometry (LDA)) – měření turbulence rychlosti ve vstupním poli a měření nestacionarity proudění v prostoru za náhlým rozšířením kanálu.

* Ing. Pavel Zubík, Ph.D., Doc. Ing. Jan Šulc, CSc.: Ústav vodních staveb, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně; Veveří 331/95, 602 00 Brno; tel.: 541 147 286, fax: 541 147 288; e-mail: Zubik.P@fce.vutbr.cz, Sulc.J@fce.vutbr.cz.,

2. Zkušební trať, model, proudové podmínky

V prostorách LVV byla pro testovací okruh využita zásobní nádrž s čerpadlem řízeným frekvenčním měničem. Pro daný účel byl vyroben hydraulický okruh s modelem předmětného kanálu včetně vstupního a výstupního úseku.

Vzhledem k záměru použít pro měření rychlostí bezkontaktní optické metody, byly pro výrobu celého kanálu s protiproudím a poproudím úsekem zvoleny materiály a technologie zajišťující maximální průhlednost. Rozměry modelů jsou uvedeny ve schématu na obr. 1, celkový pohled na model je na obr. 2. Přehled provedených měření je uveden v tabulkách.

Proudění na modelu bylo realizováno v režimu tlakovém i o volné hladině (po sejmutí horního krycího víka kanálu). Pro režim s volnou hladinou byly průtoky přizpůsobeny přípustným deformacím hladiny v okolí profilu rozšíření (schodu). U kombinací uváděných v tabulce č. 1 a 2 byla deformace hladiny v okolí zájmového profilu prakticky zanedbatelná. U kombinace uvedené v tabulkách č. 5 a 6 vzniká nad rozšířením dna oblast snížení hladiny 5 mm oproti úrovni okolní (před i za), což odpovídá bernoulliiovskému vyjádření energetické bilance.

3. Použitá měřicí technika

LDA

Laserový dopplerovský anemometr je schopen měřit v místě protnutí jedné, dvou nebo tří dvojic laserových svazků jednu, dvě nebo tři složky vektoru rychlosti a to v přesně definovaných směrech. Rychlost média je odvozena z rychlosti unášených mikročástic.

Argonový laser výrobce Ion Laser Technology Model 5500A, max. výkon 300 mW, optická souprava pro dvousložkové měření dopřednou metodou, výrobce DISA typ 55X a dvoukanálový procesor, výrobce Dantec typ FVA. V každém měrném bodě bylo zaznamenáváno 20 000 vzorků s nepravidelnou frekvencí v rozpětí 200 až 1200 Hz dle aktuálních optických podmínek a hustoty stopovacích částic. Dodatečné sycení nebylo prováděno – byly využívány přirozeně se vyskytující částice ve vodě z vodovodního řádu. Odhad hodnoty rozšířené nejistoty ve stanovení rychlosti proudění vody v měrném bodě, na hladině spolehlivosti 95 %, je menší než 5 %.

PIV

Použití měřicí metody rovinné laserové anemometrie (Particle Image Velocimetry - PIV) umožňuje měřit rozložení rychlostí v dvourozměrném poli, a to současně a v jediném okamžiku. Princip metody je založen na zaznamenávání dvou obrazů rozmístění unášených částic, během velmi krátké doby, kterou lze s mírnou nadsázkou nazvat jedním okamžikem. Pomocí korelačních metod je potom porovnáváním takto získaných obrazů vyhodnoceno dvourozměrné rychlostní pole průmětů vektorů do měřené roviny. Jako jeden okamžitý stav sledované oblasti. O zlomek sekundy později je možno získat další okamžitý stav a takto je možné zaznamenávat celé série. Také v případě PIV je rychlost média vyjádřena z rychlosti unášených mikročástic.

Dvojitý pulzní laser typu Nd:YAG, výrobce New Wave Research typ Gemini PIV, s nastavitelnou opakovací frekvencí 0 až 15 Hz. Záznamová kamera FlowSense 2M s rozlišením 1600 x 1200 pixelů výrobce Dantec. Synchronizací všech prvků v měřicím kompletu zajišťuje centrální řídicí jednotka System Hub od firmy Dantec. V případě použití PIV přirozeně se vyskytující částice neposkytovaly dostatečně kvalitní signál. K sycení vody

byly použity částice PSP-50 (Polyamid Seeding Particles) se střední velikostí 50 μm . V každém zvoleném měrném řezu byla zaznamenána řada 30 až 65 okamžitých stavů rychlostního pole se vzorkovací frekvencí většinou 5 Hz, ojediněle 15 Hz. Odhad hodnoty rozšířené nejistoty ve stanovení místní rychlosti proudění vody v měrném poli, na hladině spolehlivosti 95 %, je menší než 15 %. Tato metoda ovšem není určena k měření místní rychlosti, ale ke zjišťování širších prostorových souvislostí. Na konci kapitoly 5. je informace o porovnání měření provedeném pomocí LDA a PIV.

4. Měření parametrů vstupního pole

Ve vzdálenosti 600 mm protiproudě před rozšířením byl pro obě varianty modelu a oba režimy proudění zvolen profil pro měření parametrů vstupního proudového pole.

Pro proudění o volné hladině se „schodem“ 20 mm bylo metodou PIV provedeno 10 sérií měření, v tabulce č.1 označené pořadovými čísly 4 až 14. Ze záznamů provedených v rovinách byly vytrženy příslušné řady hodnot nacházející se ve zvolené vzdálenosti 600 mm protiproudě před rozšířením. Následným zpracováním byl získán časově střední obraz rozložení podélné složky rychlosti napříč celým kanálem. Střední (průřezová) rychlost tohoto vstupního rychlostního profilu (pro příslušnou variantu modelu a režim proudění) je pro účely porovnání s jinými průtokovými režimy ve zkušebním hydraulickém okruhu označena jako „poměrná průřezová rychlost = 1“.

Ve stejném profilu bylo ve zvolené síti 40 měrných bodů provedeno měření metodou LDA (v tabulce č.2 pořadové číslo 30). V každém měrném bodě bylo naměřeno 20 000 hodnot podélné složky rychlosti tempem několika set dat za sekundu. Ze zaznamenaných dat je možno získat pro matematický model důležitou informaci o charakteru turbulence v daném místě. V tomto zvoleném vstupním řezu bylo také provedeno měření v osmi bodech horizontály situované mezi bočními stěnami v úrovni poloviny výšky kanálu při dalších dvou různých rychlostech (v tabulce č.2 pořadová čísla 31 a 32) pro orientační zjištění vlivu průřezové rychlosti na intenzitu turbulence.

Při stanovování vstupní okrajové podmínky na modelu se „schodem“ 40 mm byla použita již pouze metoda LDA ovšem s podstatně hustější měrnou sítí (143 a 130 měrných bodů), jak je uvedeno v tabulkách č. 4 a č. 6. Příklad jednoho vyhodnoceného vstupního rychlostního pole je na obr. 3 a jeho turbulence na obr. 4.

5. Měření proudění v prostoru náhlého rozšíření

Měrné roviny PIV byly voleny vždy rovnoběžně s podélnou osou kanálu a to svisle a vodorovně.

V pohledu na vektorové pole ve svislé rovině symetrie kanálu dominují vysoké rychlosti se směry téměř rovnoběžnými s osou kanálu, ve srovnání s nimi jsou poměrně malé rychlosti v úplavu za schodem nevýrazné. Teprve detailní pohled na oblast za náhlým rozšířením kanálu ukazuje složitost daného typu proudění, příklad je na obr. 5.

Z průmětů vektorů rychlosti do rovin rovnoběžných se dnem kanálu je zřetelně vidět trojrozměrný charakter daného proudění, jeden příklad je na obr. 6.

Porovnávání jednotlivých okamžitých stavů rychlostního pole s časově středními rychlostními poli za hranou schodu ukazuje poměrně značné rozdíly. Charakteristickým rysem jsou neustále vznikající, ubíhající a zanikající vírové struktury.

Měření metodou PIV, které poskytlo jednak celkový pohled na charakter proudění a také umožnilo sledovat jeho časovou proměnlivost, bylo doplněno LDA měřením sice v omezeném počtu měrných bodů, ale poskytujícím velmi přesnou informaci o turbulenci v daném místě.

Na obr. 7 je porovnání naměřených hodnot podélné složky rychlostí v jedné svislici umístěné uprostřed šířky kanálu v poproudí vzdálenosti 100 mm za schodem. Na svislé ose je vzdálenost od dna kanálu. V grafu jsou vyneseny výsledky tří zcela nezávislých měření ve shodných proudových podmínkách. Hodnoty jsou porovnatelně prezentovány:

- a) v relativně nejhrubší síti LDA měření,
- b) s jemnějším rozstupem jsou hodnoty vybrané z pole PIV měření přes celou výšku kanálu
- c) nejpodrobnější jsou data vybraná z detailního PIV měření dané oblasti.

Při podrobném zkoumání je možno nalézt v oblasti velmi složitého proudění rozdíly v řádu desítek procent, ale v oblasti relativně klidného proudění je již shoda velmi uspokojivá.

6. Závěr

Bezkontaktní měření středních a pulzačních složek rychlostí proudu včetně zobrazení časového vývoje úplných rychlostních polí v definovaných profilech hydraulického okruhu s náhlým rozšířením průřezu umožnilo detailní analýzu struktury proudu. Měření byla provedena při různých rychlostních poměrech (Re).

Pro experimenty byl záměrně zvolen prvek relativně jednoduchého geometrického tvaru s proudovými poměry závisujícími zejména na Reynoldsově kritériu. Měření parametrů nestacionárního proudění v oblasti odtržení a tvorby vírů je pro verifikaci numerických postupů a nalezení vhodného modelu turbulence obzvláště cenné. Podrobnosti jsou v příspěvku Jaňour & Jonáš (2004).

Obdobná měření parametrů a struktury proudění tlakového i o volné hladině pro kalibrační a verifikační účely matematických modelů s odlišným poměrným rozšířením průřezu kanálu budou prováděna s podporou GA ČR také v letošním roce.

Tabulka 1

PIV měření (série 50 okamžitých stavů rychlostního pole s periodou 0,2s)						
Proudění s volnou hladinou – náhlé rozšíření dna (20 mm), hloubka proudu v kanálu před schodem $h_1=165$, hloubka v kanálu za schodem $h_2=185$ mm						
Poř. č.	Průřez. rychlost [m/s]	Poměrná střední průřez. rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny vzhledem k profilu náhlého rozšíření		Poznámka
1	0,50	1	svislá, podélně	za schodem	uprostřed	celá výška kanálu
2	0,50	1	svislá, podélně	za schodem	uprostřed	detail
3	0,50	1	svislá, podélně	za schodem	uprostřed	detail
4	0,50	1	vodorovná	600 mm před	5 mm od dna	celá šířka kanálu
5	0,50	1	vodorovná	600 mm před	10 mm od dna	celá šířka kanálu

6	0,50	1	vodorovná	600 mm před	20 mm od dna	celá šířka kanálu
7	0,50	1	vodorovná	600 mm před	40 mm od dna	celá šířka kanálu
8	0,50	1	vodorovná	600 mm před	60 mm od dna	celá šířka kanálu
9	0,50	1	vodorovná	600 mm před	80 mm od dna	celá šířka kanálu
10	0,50	1	vodorovná	600 mm před	100 mm od dna	celá šířka kanálu
11	0,50	1	vodorovná	600 mm před	120 mm od dna	celá šířka kanálu
12	0,50	1	vodorovná	600 mm před	140 mm od dna	celá šířka kanálu
13	0,50	1	vodorovná	600 mm před	150 mm od dna	celá šířka kanálu
14	0,50	1	vodorovná	600 mm před	160 mm od dna	celá šířka kanálu
15	0,50	1	vodorovná	za schodem	2,5 mm od dna	celá šířka kanálu
16	0,50	1	vodorovná	za schodem	5 mm od dna	celá šířka kanálu
17	0,50	1	vodorovná	za schodem	10 mm od dna	celá šířka kanálu
18	0,50	1	vodorovná	za schodem	15 mm od dna	celá šířka kanálu
19	0,50	1	vodorovná	za schodem	20 mm od dna	celá šířka kanálu
20	0,50	1	vodorovná	za schodem	25 mm od dna	celá šířka kanálu
21	0,50	1	vodorovná	za schodem	30 mm od dna	celá šířka kanálu
22	0,50	1	vodorovná	za schodem	40 mm od dna	celá šířka kanálu
23	0,50	1	vodorovná	za schodem	60 mm od dna	celá šířka kanálu
24	0,50	1	vodorovná	za schodem	80 mm od dna	celá šířka kanálu
25	0,50	1	vodorovná	za schodem	100 mm od dna	celá šířka kanálu
26	0,50	1	vodorovná	za schodem	120 mm od dna	celá šířka kanálu
27	0,50	1	vodorovná	za schodem	140 mm od dna	celá šířka kanálu
28	0,50	1	vodorovná	za schodem	160 mm od dna	celá šířka kanálu
29	0,50	1	vodorovná	za schodem	180 mm od dna	celá šířka kanálu

Tabulka 2

LDA měření (časová řada 20 000 hodnot rychlostí naměřených v každém z 56 měrných bodů zvolené sítě)

Proudění s volnou hladinou – náhlé rozšíření dna (20 mm) , hloubka proudu v kanálu před schodem $h_1=165$, hloubka v kanálu za schodem $h_2=185$ mm

Poř. č.	Průřez. rychlost [m/s]	Poměrná střední průřez. rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny vzhledem k profilu náhlého rozšíření	Poznámka
30	0,50	1	svislá, napříč	600 mm před	celý průřez kanálu
31	0,44	0,88	svislá, napříč	600 mm před	jedna řada
32	0,64	1,28	svislá, napříč	600 mm před	jedna řada

Tabulka 3

PIV měření (série 50 okamžitých stavů rychlostního pole s periodou 0,2s)						
Tlakové proudění – náhlé rozšíření dna (40), výška kanálu před schodem $H_1=160$, výška kanálu za schodem $H_2=200$ mm						
Poř. č.	Průřez. rychlost [m/s]	Poměrná střední průřez. rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny vzhledem k profilu náhlého rozšíření		Poznámka
1	2,15	1	svislá, podélně	za schodem	5 mm od L	celá výška kanálu
2	2,15	1	svislá, podélně	za schodem	20 mm od L	celá výška kanálu
3	2,15	1	svislá, podélně	za schodem	50 mm od L	celá výška kanálu
4	2,15	1	svislá, podélně	za schodem	100 mm od L	celá výška kanálu
5	2,15	1	svislá, podélně	za schodem	100 mm od L	detail
6	2,15	1	vodorovná	za schodem	2,5 mm od dna	celá šířka kanálu
7	2,15	1	vodorovná	za schodem	5 mm od dna	celá šířka kanálu
8	2,15	1	vodorovná	za schodem	10 mm od dna	celá šířka kanálu
9	2,15	1	vodorovná	za schodem	20 mm od dna	celá šířka kanálu
10	2,15	1	vodorovná	za schodem	30 mm od dna	celá šířka kanálu
11	2,15	1	vodorovná	za schodem	40 mm od dna	celá šířka kanálu
12	2,15	1	vodorovná	za schodem	60 mm od dna	celá šířka kanálu
13	2,15	1	vodorovná	za schodem	80 mm od dna	celá šířka kanálu
14	2,15	1	vodorovná	za schodem	100 mm od dna	celá šířka kanálu
15	2,15	1	vodorovná	za schodem	140 mm od dna	celá šířka kanálu
16	2,15	1	vodorovná	za schodem	180 mm od dna	celá šířka kanálu
17	2,15	1	vodorovná	za schodem	190 mm od dna	celá šířka kanálu

Tabulka 4

LDA měření (časová řada 20 000 hodnot rychlostí naměřených v každém z 143 měrných bodů zvolené sítě)						
Tlakové proudění – náhlé rozšíření dna (40), výška kanálu před schodem $H_1=160$, výška kanálu za schodem $H_2=200$ mm						
Poř. č.	Průřez. rychlost [m/s]	Poměrná střední průřez. rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny vzhledem k profilu náhlého rozšíření	Poznámka	
18	2,15	1	svislá, napříč	600 mm před	celý průřez kanálu	
19	2,15	1	svislá, uprostřed	100 mm za	jedna řada	

Tabulka 5

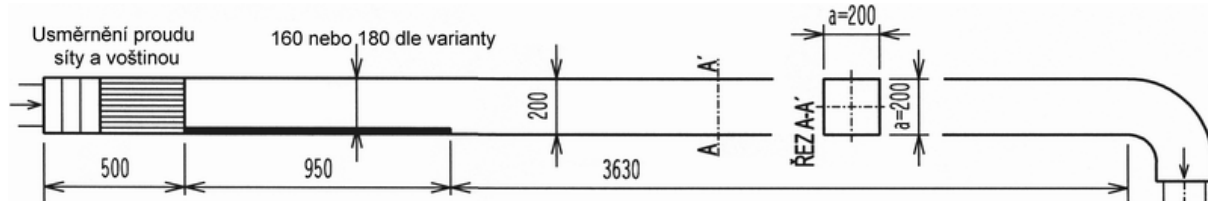
PIV měření (série 50 okamžitých stavů rychlostního pole s periodou 0,2s)						
Proudění s volnou hladinou – náhlé rozšíření dna (40 mm), hloubka v kanálu před schodem $h_1=145$, hloubka v kanálu nad schodem $h_2=140$, hloubka v kanálu za schodem $h_3 =185$ mm						
Poř. č.	Průřez. rychlost [m/s]	Poměrná střední průřez. rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny vzhledem k profilu náhlého rozšíření		Poznámka
1	0.48	1	vodorovná	za schodem	2,5 mm od dna	celá šířka kanálu
2	0.48	1	vodorovná	za schodem	5 mm od dna	celá šířka kanálu
3	0.48	1	vodorovná	za schodem	10 mm od dna	celá šířka kanálu
4	0.48	1	vodorovná	za schodem	25 mm od dna	celá šířka kanálu
5	0.48	1	vodorovná	za schodem	40 mm od dna	celá šířka kanálu
6	0.48	1	vodorovná	za schodem	60 mm od dna	celá šířka kanálu
7	0.48	1	vodorovná	za schodem	90 mm od dna	celá šířka kanálu
8	0.48	1	vodorovná	za schodem	120 mm od dna	celá šířka kanálu
9	0.48	1	vodorovná	za schodem	150 mm od dna	celá šířka kanálu
10	0.48	1	vodorovná	za schodem	180 mm od dna	celá šířka kanálu
11	0.48	1	svislá, podélně	za schodem	uprostřed	celá výška kanálu
12	0.48	1	svislá, podélně	za schodem	uprostřed	celá výška kanálu
13	0.48	1	svislá, podélně	za schodem	uprostřed	detail
14	0.48	1	svislá, podélně	za schodem	uprostřed	detail

Tabulka 6

LDA měření (časová řada 20 000 hodnot rychlostí naměřených v každém z 130 měrných bodů zvolené sítě)					
Proudění s volnou hladinou – náhlé rozšíření dna (40 mm) , hloubka v kanálu před schodem $h_1=145$, hloubka v kanálu nad schodem $h_2=140$, hloubka v kanálu za schodem $h_3 =185$ mm					
Poř. č.	Průřez. rychlost [m/s]	Poměrná střední průřez. rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny vzhledem k profilu náhlého rozšíření	Poznámka
15	0.48	1	svislá, napříč	600 mm před	celý průřez kanálu

7. Literatura

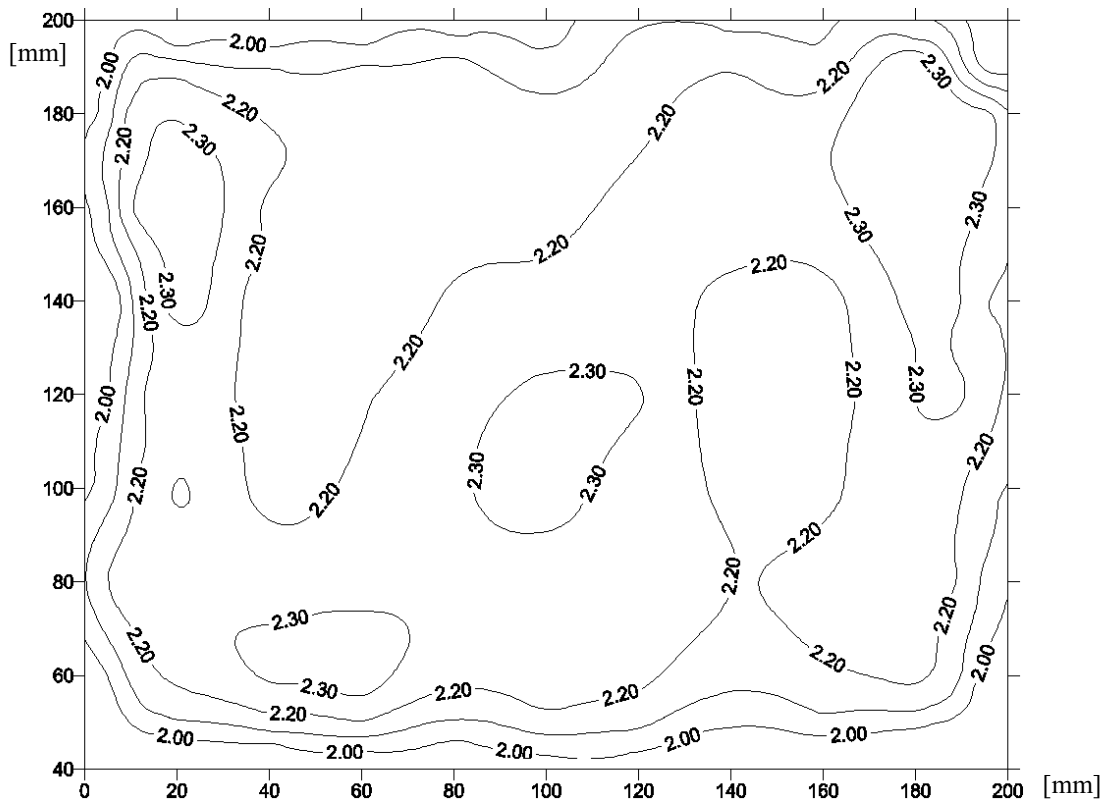
- Šulc J. & Lichtneger P. & Zubík P. (2004) Flow parameters measurement in the channel with the negative step. IM 2004
- Jaňour Z. & Jonáš P. (2004) Some methods of the control of the separation region behind a backward facing step. GAMM'2004 Jahrestagung, Dresden



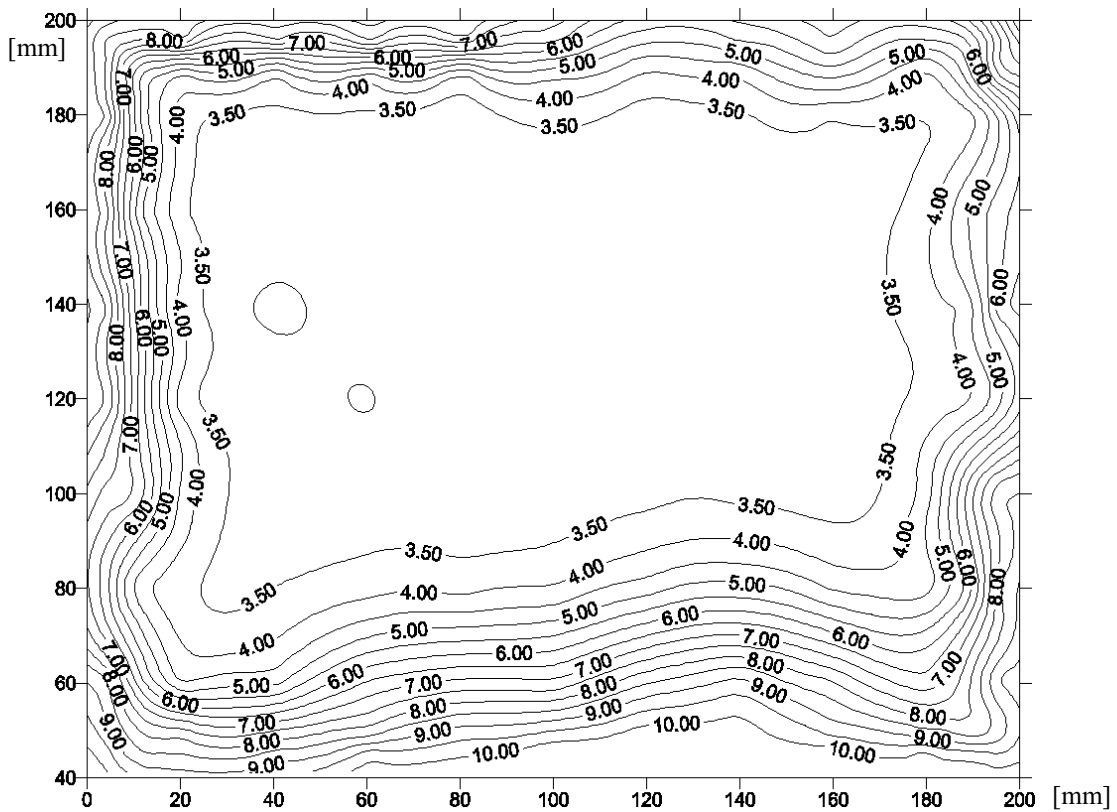
Obr.1 Schéma modelu – svislý podélný řez



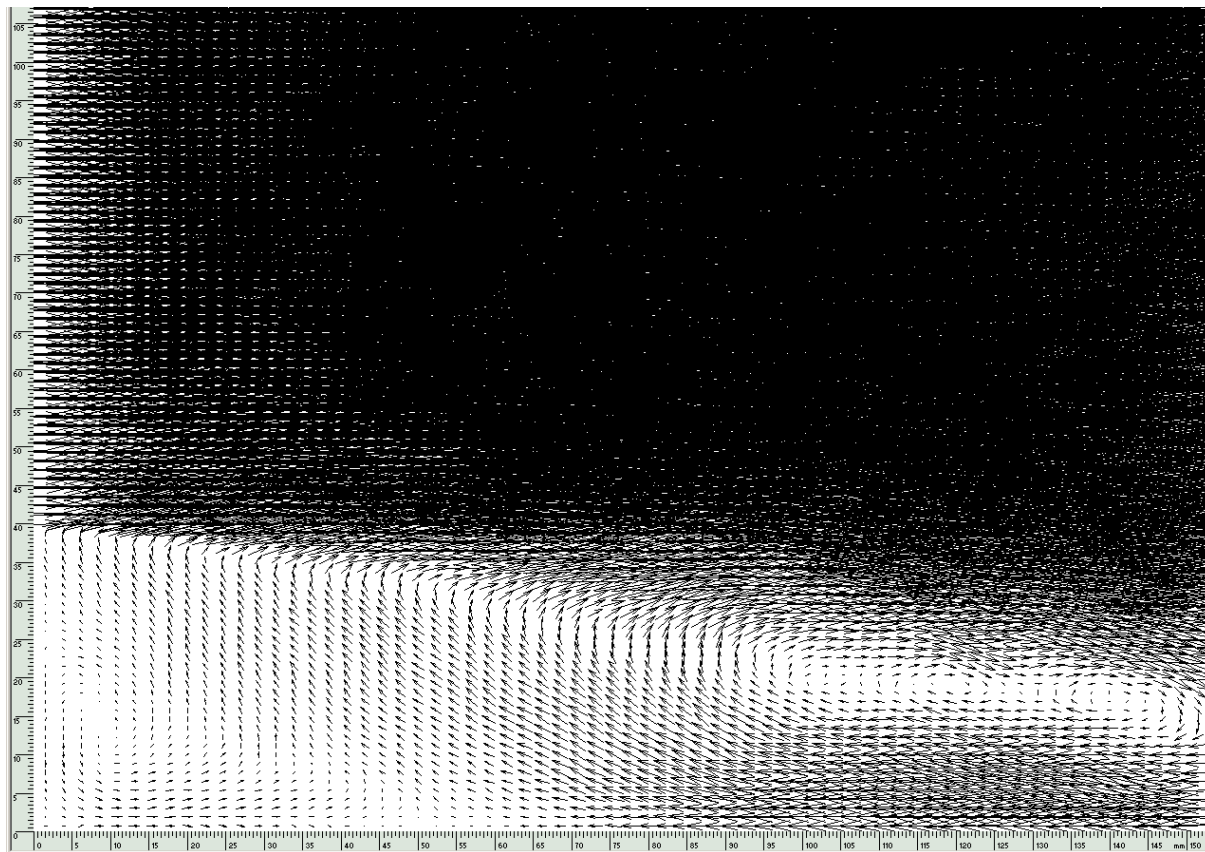
Obr.2 Celkový pohled na model při proudění s volnou hladinou



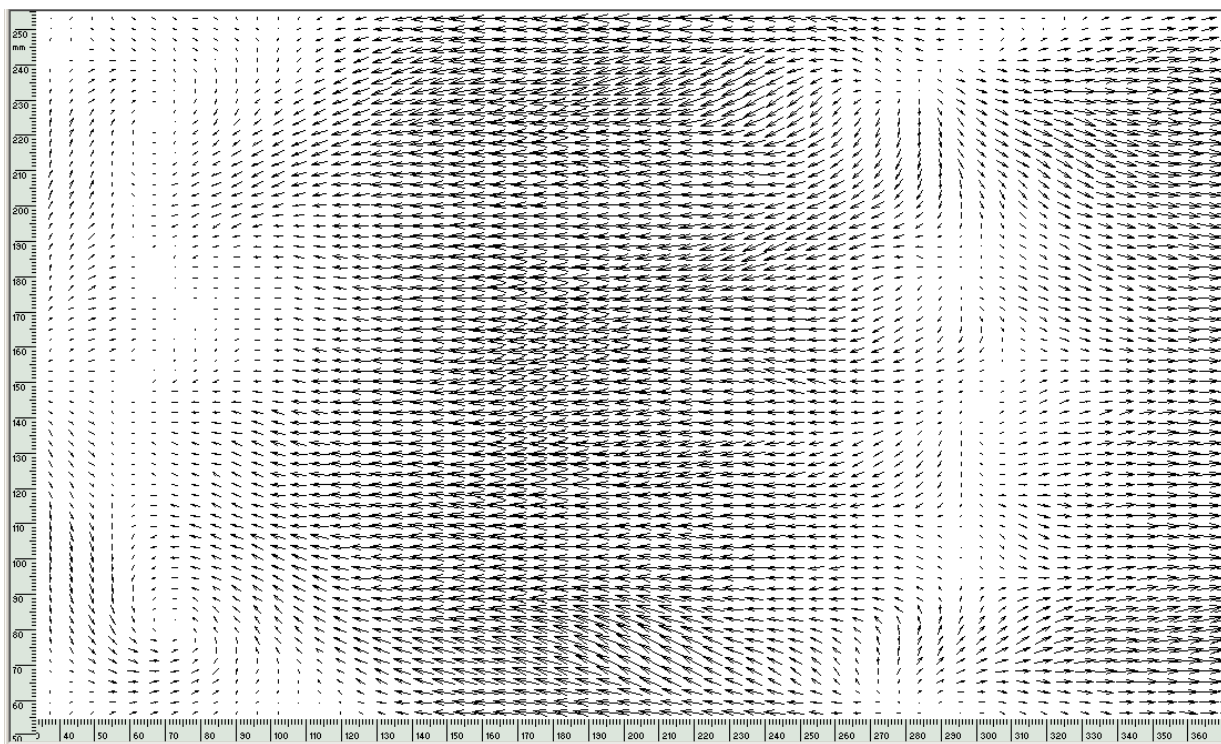
Obr.3 Rozložení podélné složky rychlosti 600 mm protiproudě před schodem výšky 40 mm při tlakovém proudění (hodnoty m/s)



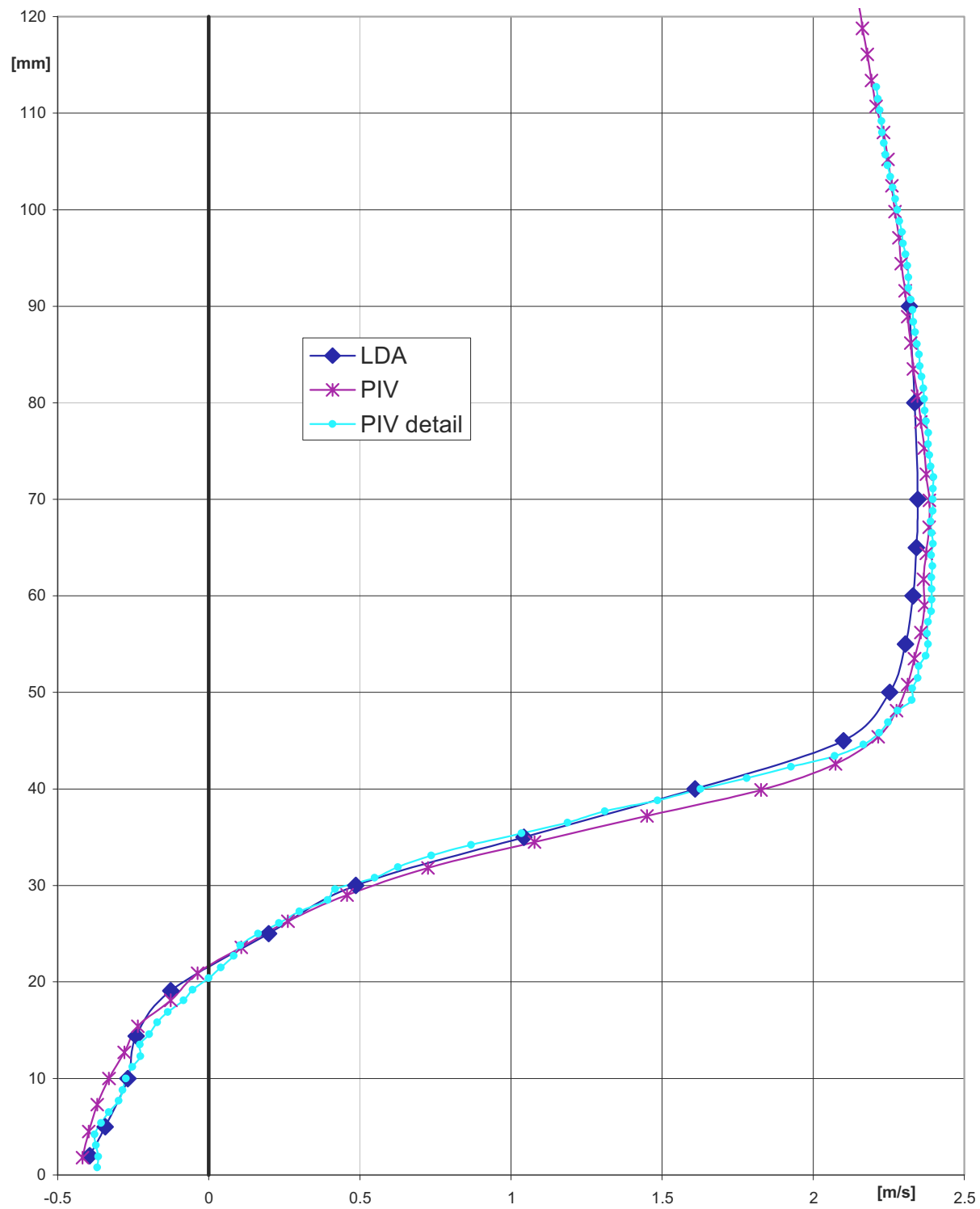
Obr.4 Rozložení turbulence podélné složky rychlosti 600 mm protiproudě před schodem výšky 40 mm při tlakovém proudění (hodnoty %)



Obr.5 Časově střední obraz odtržení proudu za schodem výšky 40 mm při tlakovém proudění



Obr.6 Časově střední obraz průmětů vektorů rychlosti do roviny 2,5 mm nad dnem kanálu za schodem výšky 40 mm při proudění o volné hladině



Obr.7 Tři nezávislá měření podélné složky rychlostí v jedné svislici umístěné uprostřed šířky kanálu v poproudě vzdálenosti 100 mm za schodem