

FLOW PARAMETERS MEASUREMENT IN THE CHANNEL WITH NEGATIVE STEP OF EXTREME RELATIVE HEIGHT

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 byla 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 a druhém 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) a 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 (publikováno na konferenci IM 2005). Následující text stručně prezentuje průběh a výsledky třetího roku řešení. 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; Veverí 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 protiproudáním a poproudáním úsekem zvoleny materiály a technologie zajišťující maximální průhlednost. Rozměry modelů jsou uvedeny ve schématu na obr. 2, celkový pohled na model je na obr. 1. Přehled identifikačních údajů 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 sníženy tak, že deformace hladiny v okolí zájmového profilu byla prakticky zanedbatelná.

3. Použitá měřicí technika

Princip 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 jím unášených mikročástic.

Popis použité měřicí soupravy pro LDA: Argonový laser výrobce Ion Laser Technology Model 5500A, max. výkon 300 mW, optická souprava pro dvousložkové měření dopřednou metodou, výrobce DISA typ 55X a dva procesory, výrobce Dantec typ BSA. 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 syčení nebylo prováděno – byly využívány přirozeně se vyskytující částice ve vodě z vodovodního řádu. Odhad hodnoty rozšířené nejistoty rychlosti proudění vody v měrném bodě, na hladině spolehlivosti 95 %, je menší než 5 %.

Princip PIV: Použití měřicí metody rovinné laserové anemometrie (Particle Image Velocimetry - PIV) umožňuje měřit rozložení rychlostí v dvourozměrném poli. Princip metody je založen na zaznamenávání dvou obrazů pozic 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, představující jeden okamžitý stav sledované oblasti. O zlomek sekundy později je možno získat další okamžitý stav a případně zaznamenávat celé série. Také v případě PIV je rychlost média vyjádřena z rychlosti unášených mikročástic.

Popis použité měřicí soupravy pro PIV: Dvojité pulzní laser typu Nd:YAG, výrobce New Wave Research typ Gemini PIV, s nastavitelnou opakovací frekvencí 0 až 15 Hz. Záznamová kamera FlowSense 2M výrobce Dantec má rozlišení 1600 x 1200 pixelů. Synchronizaci 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 syčení vody byly použity částice PSP-50 (Polyamid Seeding Particles) se střední velikostí 50 μm . V každém zvoleném měrném řezu byla zaznamenána řada 50 až 75 okamžitých stavů rychlostního pole se vzorkovací frekvencí většinou 5 Hz při tlakovém proudění a 1 Hz při proudění o volné hladině. Odhad hodnoty rozšířené nejistoty bodové rychlosti proudění vody v měrném poli, na hladině spolehlivosti 95 %, je menší než 15 %.

Tato metoda ovšem není určena k měření bodové rychlosti, ale ke zjišťování širších časoprostorových souvislostí.

4. Měření parametrů vstupního pole

Ve vzdálenosti 540 mm případně 550 mm protiproudě před rozšířením byl zvolen profil pro měření parametrů vstupního proudového pole.

V poměrně husté síti měrných bodů (104 při tlakovém proudění a 160 při proudění o volné hladině) bylo provedeno měření metodou LDA (v tabulce č.2 pořadové číslo 47 a v tabulce č.4 pořadové číslo 34). V každém měrném bodě bylo naměřeno 20 000 hodnot podélné složky rychlosti tempem několika set dat za sekundu. 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“. Ze zaznamenaných dat je možno získat pro matematický model důležitou informaci o charakteru turbulence v daném místě. V tomto zvoleném vstupním řezu bylo při tlakovém proudění také provedeno měření v 13 bodech jedné horizontály situované mezi bočními stěnami v úrovni poloviny výšky kanálu při dalších dvou různých rychlostech (v tabulce č.2 pořadová čísla 49 a 50) pro orientační zjištění vlivu průřezové rychlosti na intenzitu turbulence. Ukázka vyhodnocených vstupních rychlostních polí je na obr. 4 a 6 a polí turbulence na obr. 5 a 7.

5. Měření proudění v prostoru náhlého rozšíření

Měrné roviny PIV byly voleny vždy rovnoběžně s podélnou osou kanálu se svislou a vodorovnou orientací.

Ve vektorovém poli ve svislé rovině symetrie kanálu dominují vysoké rychlosti orientované téměř shodně 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.

Z průmětů vektorů rychlosti do rovin rovnoběžných se dnem kanálu je patrný trojrozměrný charakter daného proudění, obzvláště zřetelný z obr. 13 a posloupnosti obr. 8 až 10.

V průběhu PIV měření byl zjištěn, oproti předchozím variantám modelu s nižším schodem, výrazný nárůst délky doby, kdy je již možno považovat děj za kvazistacionární. Obzvláště výrazné to bylo při proudění s volnou hladinou a velmi nízkých rychlostech proudění - při zpracování série měření trvajících méně než 60 sekund byl pokaždé získán jiný lokální časově střední obraz rychlostního pole, příklad je vidět na porovnání obr. 11 a 12.

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.

Po provedení měření metodou PIV a získání celkového přehledu o charakteru proudění bylo pro aplikaci matematických modelů provedeno poměrně rozsáhlé LDA měření v několika svislících (vždy ležících v rovině symetrie kanálu) v různých vzdálenostech od profilu náhlého rozšíření. Bylo tak získáno mnoho verifikačních dat o rychlostech a jejich fluktuacích, příklad grafického výstupu je na obr. 14.

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 ($Re = S \cdot v / \nu = (3,2 \div 24,7) \cdot 10^4$).

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 obzvlášť cenné. Podrobnosti jsou v příspěvku Jaňour & Jonáš (2004).

Tabulka 1

PIV měření (série 50 až 75 okamžitých stavů rychlostního pole, většinou s periodou 0,2s)						
Tlakové proudění – náhlé rozšíření dna 90-200 mm (schod 110) , $v = 2,92/1,32$ m/s						
Poř. č.	Nastavená frekvence pohonu čerpadla	Poměrná průřezov. rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny		Poznámka
1	27 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	5 mm od leva	celá výška kanálu
2	27 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	20 mm od leva	celá výška kanálu
3	27 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	50 mm od leva	celá výška kanálu
4	27 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	100 mm od leva	celá výška kanálu
5	27 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	150 mm od leva	celá výška kanálu
6	27 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	180 mm od leva	celá výška kanálu
7	27 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	195 mm od leva	celá výška kanálu
8	27 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	100 mm od leva	detail, perioda 0,07s
9	27 Hz	1	svislá, podélně	318mm za schod.	50 mm od leva	celá výška kanálu
10	27 Hz	1	svislá, podélně	318mm za schod.	100 mm od leva	celá výška kanálu
11	27 Hz	1	svislá, podélně	318mm za schod.	150 mm od leva	celá výška kanálu
12	27 Hz	1	svislá, podélně	1047mm za schod.	100 mm od leva	celá výška kanálu
13	27 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	2 mm od dna	celá šířka kanálu
14	27 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	5 mm od dna	celá šířka kanálu
15	27 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	20 mm od dna	celá šířka kanálu
16	27 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	40 mm od dna	celá šířka kanálu
17	27 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	60 mm od dna	celá šířka kanálu
18	27 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	85 mm od dna	celá šířka kanálu
19	27 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	110 mm od dna	celá šířka kanálu
20	27 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	135 mm od dna	celá šířka kanálu
21	27 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	160 mm od dna	celá šířka kanálu
22	27 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	190 mm od dna	celá šířka kanálu
23	12,5 Hz	0,16	svislá, podélně	těsně za schodem	5 mm od leva	celá výška kanálu
24	12,5 Hz	0,16	svislá, podélně	těsně za schodem	20 mm od leva	celá výška kanálu
25	12,5 Hz	0,16	svislá, podélně	těsně za schodem	50 mm od leva	celá výška kanálu
26	12,5 Hz	0,16	svislá, podélně	těsně za schodem	100 mm od leva	celá výška kanálu
27	12,5 Hz	0,16	svislá, podélně	těsně za schodem	150 mm od leva	celá výška kanálu
28	12,5 Hz	0,16	svislá, podélně	těsně za schodem	180 mm od leva	celá výška kanálu
29	12,5 Hz	0,16	svislá, podélně	těsně za schodem	195 mm od leva	celá výška kanálu
30	12,5 Hz	0,16	svislá, podélně	těsně za schodem	100 mm od leva	detail, perioda 0,07s
31	12,5 Hz	0,16	svislá, podélně	318mm za schod.	50 mm od leva	celá výška kanálu
32	12,5 Hz	0,16	svislá, podélně	318mm za schod.	100 mm od leva	celá výška kanálu
33	12,5 Hz	0,16	svislá, podélně	318mm za schod.	150 mm od leva	celá výška kanálu
34	12,5 Hz	0,16	svislá, podélně	1047mm za schod.	100 mm od leva	celá výška kanálu
35	12,5 Hz	0,16	vodorovná	těsně za schodem	2 mm od dna	celá šířka kanálu
36	12,5 Hz	0,16	vodorovná	těsně za schodem	5 mm od dna	celá šířka kanálu
37	12,5 Hz	0,16	vodorovná	těsně za schodem	20 mm od dna	celá šířka kanálu
38	12,5 Hz	0,16	vodorovná	těsně za schodem	40 mm od dna	celá šířka kanálu

39	12,5 Hz	0,16	vodorovná	těsně za schodem	60 mm od dna	celá šířka kanálu
40	12,5 Hz	0,16	vodorovná	těsně za schodem	85 mm od dna	celá šířka kanálu
41	12,5 Hz	0,16	vodorovná	těsně za schodem	110 mm od dna	celá šířka kanálu
42	12,5 Hz	0,16	vodorovná	těsně za schodem	135 mm od dna	celá šířka kanálu
43	12,5 Hz	0,16	vodorovná	těsně za schodem	160 mm od dna	celá šířka kanálu
44	12,5 Hz	0,16	vodorovná	těsně za schodem	190 mm od dna	celá šířka kanálu
45	12,5 Hz	0,16	vodorovná	těsně za schodem	2 mm od dna	perioda 0,07s
46	12,5 Hz	0,16	vodorovná	těsně za schodem	10 mm od dna	perioda 0,07s

Tabulka 2

LDA měření (časová řada 20 000 hodnot rychlostí naměřených v každém měrném bodu)

Poř. č.	Nastavená frekvence pohonu čerpadla	Poměrná průřezová rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny	Poznámka
47	27 Hz	1	svislá, napříč	540 mm před schodem	celý průřez kanálu, po 13 bodech na 8 horizontálách
48	27 Hz	1	svislá, napříč	540 mm před	13 bodů na 1 horizontále
49	20 Hz	0,68	svislá, napříč	540 mm před	13 bodů na 1 horizontále
50	12,5 Hz	0,16	svislá, napříč	540 mm před	13 bodů na 1 horizontále

Tabulka 3

PIV měření (série 60 až 75 okamžitých stavů rychlostního pole, většinou s periodou 1s)

Proudění s volnou hladinou – náhlé rozšíření dna, H = 80/190 mm (schod 110), v = 0,38/0,16 m/s

Poř. č.	Nastavená frekvence pohonu čerpadla	Poměrná průřez. rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny		Poznámka
1	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	2 mm od dna	celá šířka kanálu, 5Hz
2	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	2 mm od dna	celá šířka kanálu, 2Hz
3	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	2 mm od dna	celá šířka kanálu, 1Hz
4	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	5 mm od dna	celá šířka kanálu, 2Hz
5	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	5 mm od dna	celá šířka kanálu, 1Hz
6	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	10 mm od dna	celá šířka kanálu
7	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	20 mm od dna	celá šířka kanálu
8	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	40 mm od dna	celá šířka kanálu
9	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	60 mm od dna	celá šířka kanálu
10	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	85 mm od dna	celá šířka kanálu
11	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	110 mm od dna	celá šířka kanálu
12	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	135 mm od dna	celá šířka kanálu
13	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	160 mm od dna	celá šířka kanálu
14	11,82 Hz	1	vodorovná	těsně za schodem	180 mm od dna	celá šířka kanálu
15	11,82 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	5 mm od leva	celá výška kanálu
16	11,82 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	20 mm od leva	celá výška kanálu
17	11,82 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	50 mm od leva	celá výška kanálu
18	11,82 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	100 mm od leva	celá výška kanálu
19	11,82 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	150 mm od leva	celá výška kanálu
20	11,82 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	180 mm od leva	celá výška kanálu
21	11,82 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	195 mm od leva	celá výška kanálu
22	11,82 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	100 mm od leva	detail, vzorkování 1Hz
23	11,82 Hz	1	svislá, podélně	těsně za schodem	100 mm od leva	detail, vzorkování 5Hz
24	11,82 Hz	1	svislá, podélně	510mm za schod.	100 mm od leva	celá výška kanálu
25	11,82 Hz	1	svislá, podélně	510mm za schod.	100 mm od leva	celá výška kanálu
26	11,82 Hz	1	vodorovná	510mm za schod.	2 mm od dna	celá šířka kanálu
27	11,82 Hz	1	vodorovná	510mm za schod.	5 mm od dna	celá šířka kanálu
28	11,82 Hz	1	vodorovná	510mm za schod.	10 mm od dna	celá šířka kanálu
29	11,82 Hz	1	vodorovná	510mm za schod.	20 mm od dna	celá šířka kanálu
30	11,82 Hz	1	vodorovná	510mm za schod.	40 mm od dna	celá šířka kanálu
31	11,82 Hz	1	vodorovná	510mm za schod.	60 mm od dna	celá šířka kanálu
32	11,82 Hz	1	vodorovná	510mm za schod.	85 mm od dna	celá šířka kanálu
33	11,82 Hz	1	vodorovná	510mm za schod.	110 mm od dna	celá šířka kanálu

Tabulka 4

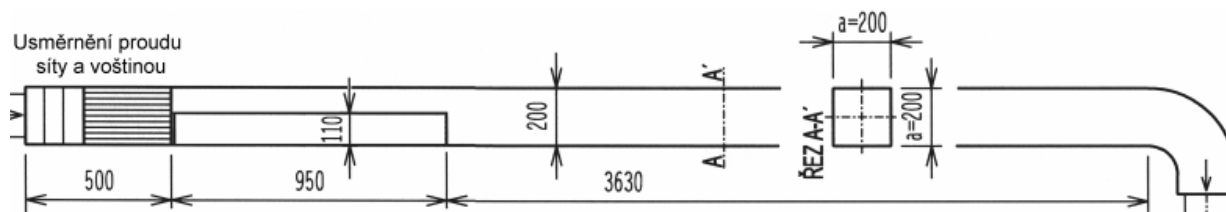
LDA měření (časová řada 20 000 hodnot rychlostí naměřených v každém měrném bodu)					
Poř. č.	Nastavená frekvence pohonu čerpadla	Poměrná průřezová rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny	Poznámka
34	11,82 Hz	1	svislá, napříč kanálem	550 mm před schodem	celý průřez kanálu, po 8 bodech na 20 vertikálách
35	11,82 Hz	1	svislá uprostřed šířky kanálu	275 mm před	15 bodů na 1 vertikále
36	11,82 Hz	1	svislá uprostřed	0 mm před	15 bodů na 1 vertikále
37	11,82 Hz	1	svislá uprostřed	275 mm za	37 bodů na 1 vertikále
38	11,82 Hz	1	svislá uprostřed	550 mm za	37 bodů na 1 vertikále
39	11,82 Hz	1	svislá uprostřed	1100 mm za	37 bodů na 1 vertikále
40	11,82 Hz	1	svislá uprostřed	1650 mm za	37 bodů na 1 vertikále
41	11,82 Hz	1	svislá uprostřed	2200 mm za	37 bodů na 1 vertikále
42	11,82 Hz	1	svislá uprostřed	2750 mm za	37 bodů na 1 vertikále
43	11,82 Hz	1	svislá uprostřed	2965 mm za	37 bodů na 1 vertikále

7. Literatura

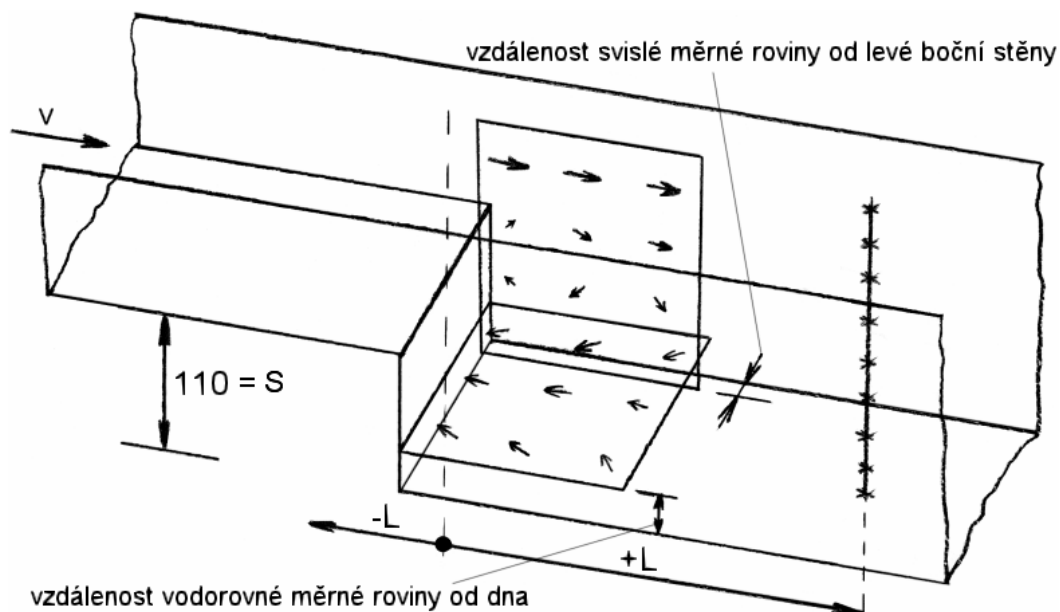
- Šulc J., Lichtneger P., Zubík P. (2004) Flow parameters measurement in the channel with the negative step. In.: Engineering Mechanics 2004, Ústav termomechaniky AVČR, Svratka 2004, s. 289-290, CD 10 s. ISBN 80-85918-88-9
- Jaňour Z. & Jonáš P. (2004) Some methods of the control of the separation region behind a backward facing step. Book of Abstracts 75th Annual Scientific Conference GAMM'2004 Jahrestagung, Dresden, March 21-27, 2004, p.148
- Zubík P., Šulc J. (2005) Analysis of the internal structure of flow in a channel with negative step. In.: Engineering Mechanics 2005, Ústav termomechaniky AVČR, Svratka 2005, s. 365-366, CD 11 s. ISBN 80-85918-93-5
- Jonáš P., Mazur O., Uruba V. (2005) A contribution to the similarity study of 3D flow in a channel with a step expansion of the cross-section. In.: Engineering Mechanics 2005, Ústav termomechaniky AVČR, Svratka 2005, s. 147-148, CD 8 s. ISBN 80-85918-93-5
- Zubík P. (2005) Porovnání výsledků měření provedených pomocí LDA a PIV na kanálu se záporným stupněm ve dně. In.: 19. Sympozium o anemometrii. Ústav pro hydrodynamiku AVČR, Holany-Litice 2005, s. 155-160. ISBN 80-239-4871-7.



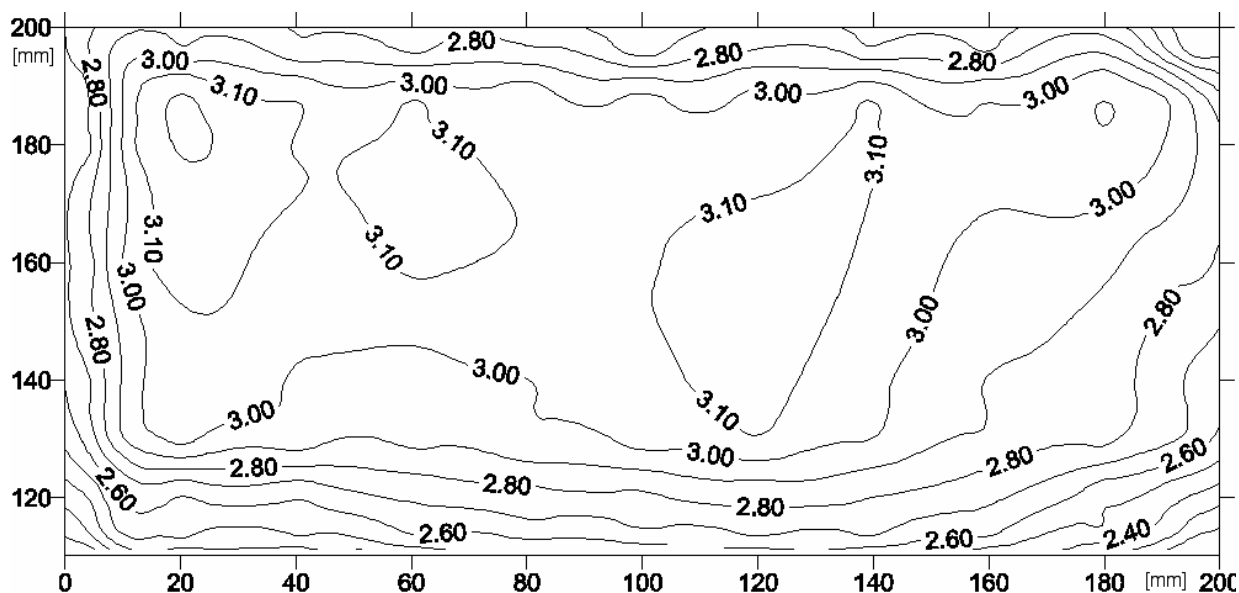
Obr.1 Celkový pohled na model při proudění s volnou hladinou



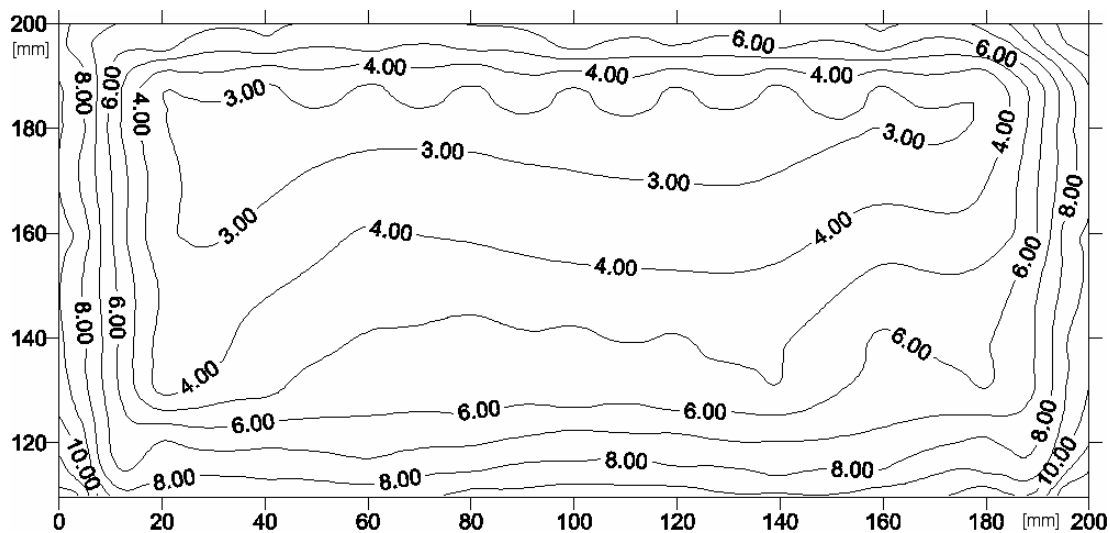
Obr.2 Schéma modelu – svislý podélný řez



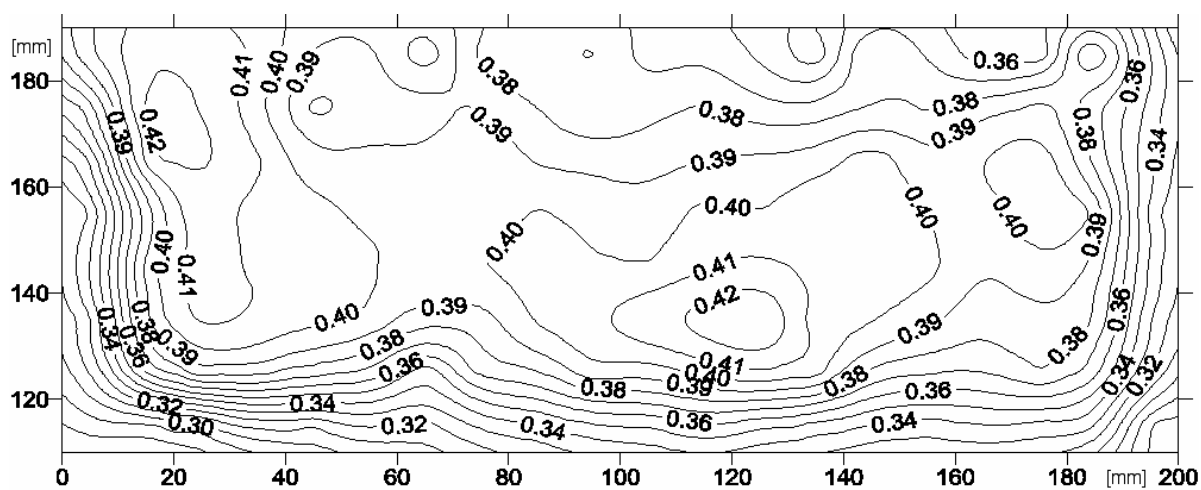
Obr.3 Schéma poloh měrných rovin a měrných svislic vzhledem k profilu náhlého rozšíření a stěnám kanálu – označení použito v tabulkách a v grafu na obr. 14



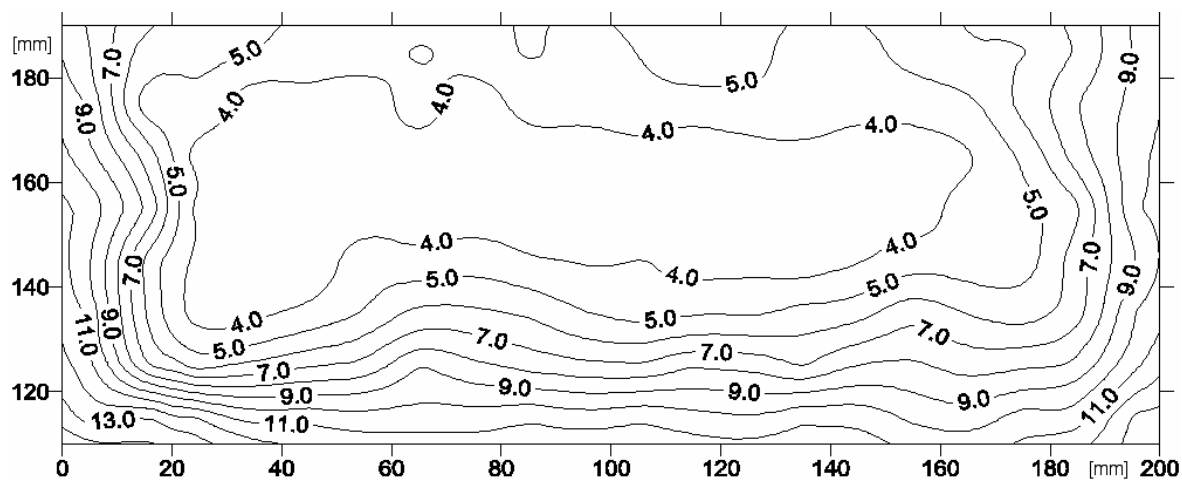
Obr.4 Rozložení podélné složky rychlosti v profilu 540 mm protiproudě před schodem výšky 110 mm při tlakovém proudění (hodnoty m/s)



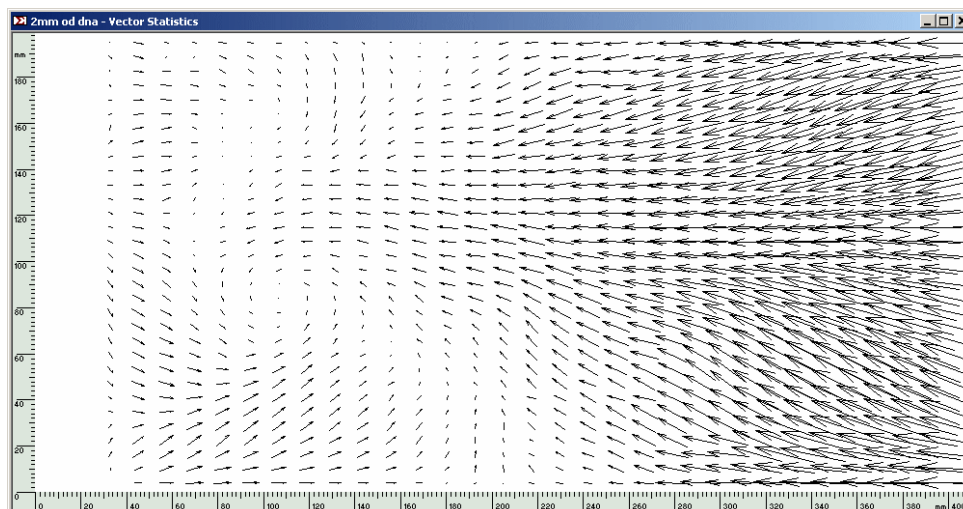
Obr.5 Rozložení turbulence podélné složky rychlosti v profilu 540 mm protiproudě před schodem výšky 110 mm při tlakovém proudění (hodnoty %)



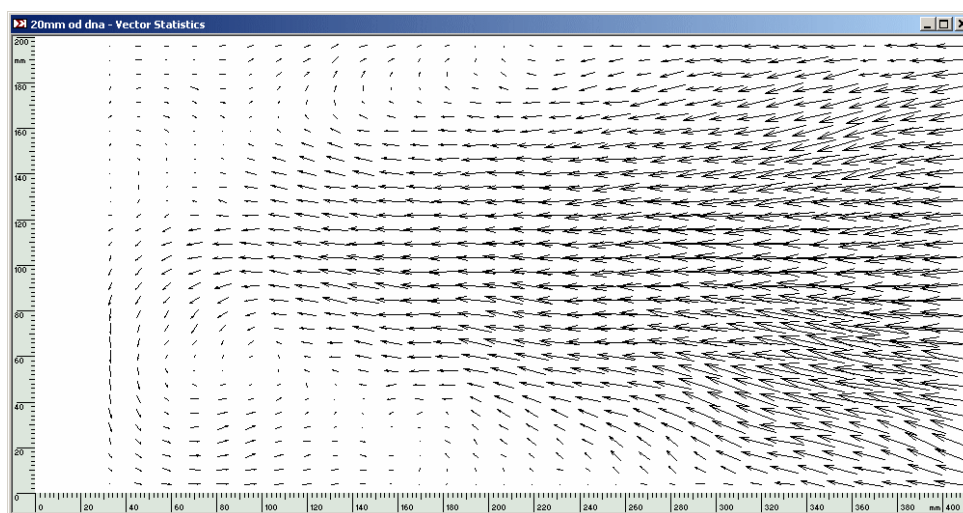
Obr.6 Rozložení podélné složky rychlosti v profilu 550 mm protiproudě před schodem výšky 110 mm při proudění o volné hladině (hodnoty m/s)



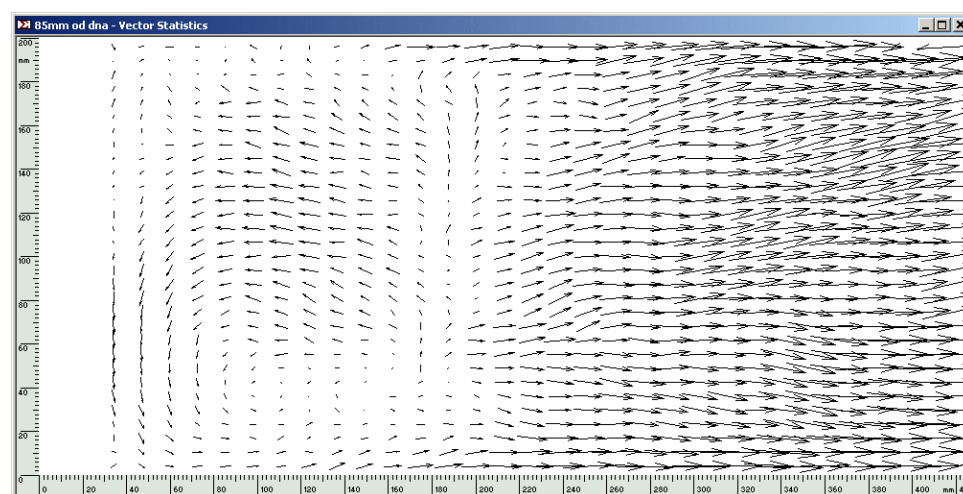
Obr.7 Rozložení turbulence podélné složky rychlosti v profilu 550 mm protiproudě před schodem výšky 110 mm při proudění o volné hladině (hodnoty %)



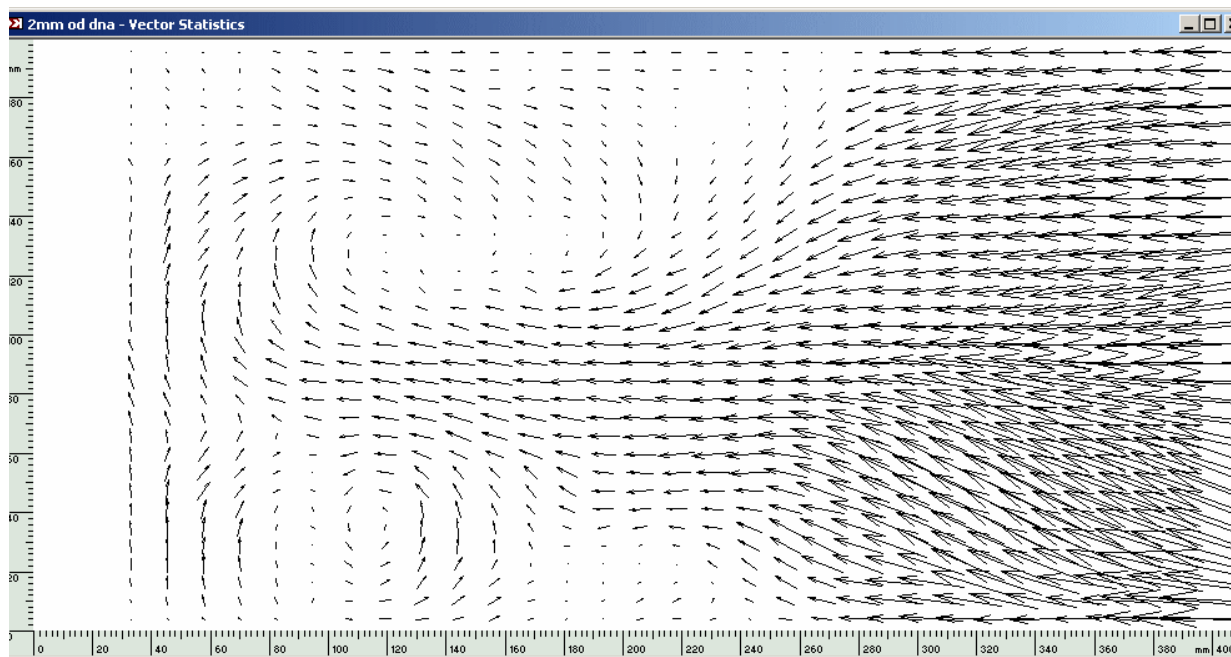
Obr.8 Časově střední obraz průmětů vektorů rychlosti do horizontální roviny 2 mm nad dnem kanálu za schodem výšky 110 mm při tlakovém proudění



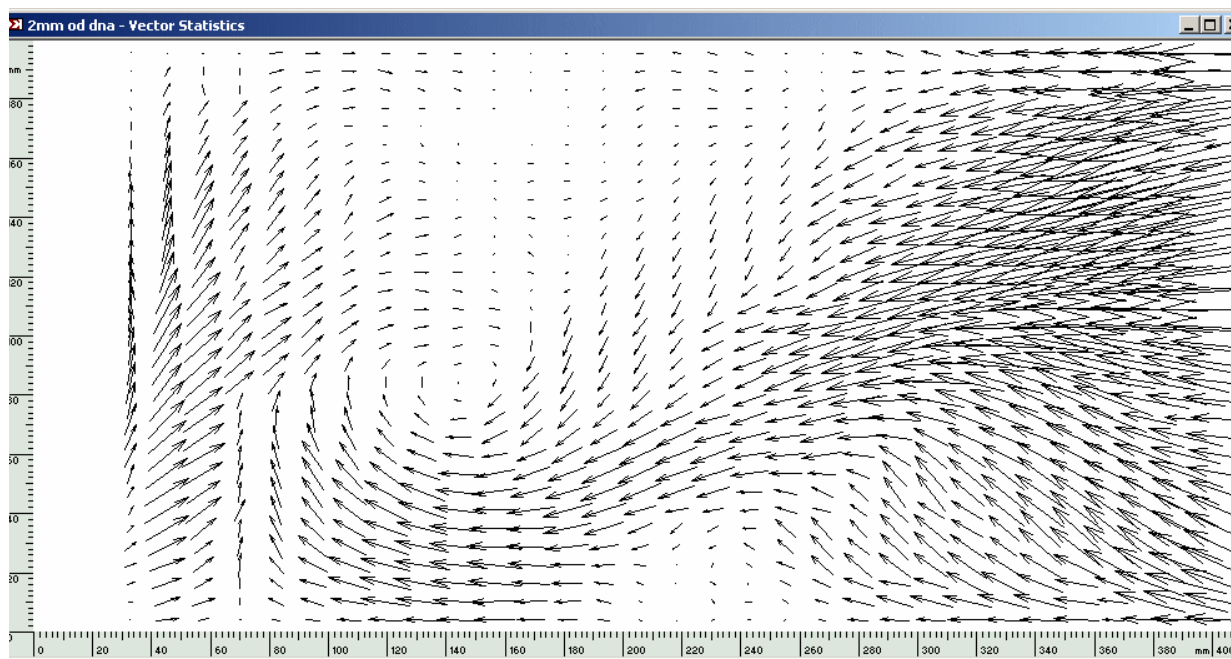
Obr.9 Časově střední obraz průmětů vektorů rychlosti do horizontální roviny 20 mm nad dnem kanálu za schodem výšky 110 mm při tlakovém proudění



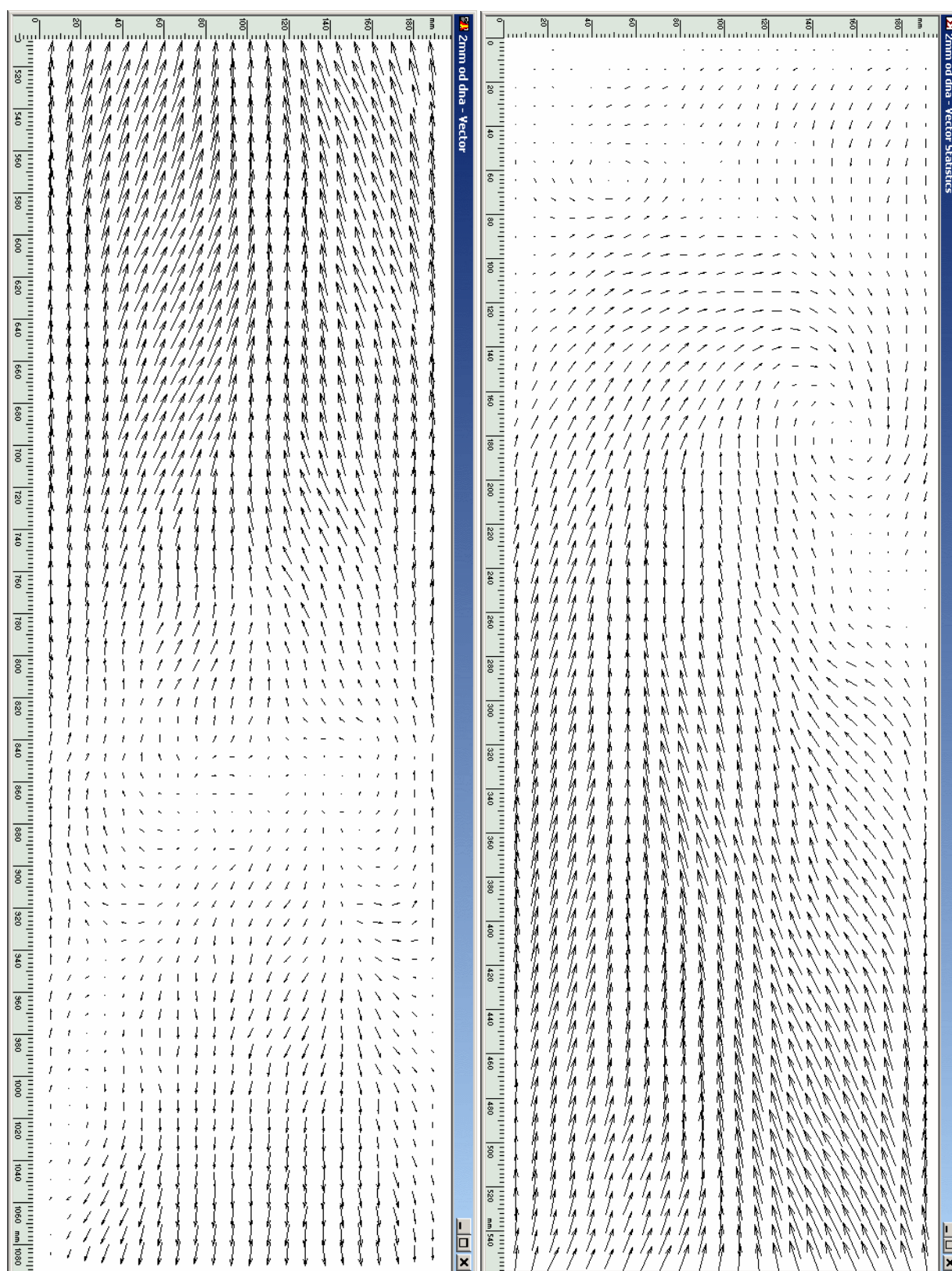
Obr.10 Časově střední obraz průmětů vektorů rychlosti do horizontální roviny 85 mm nad dnem kanálu za schodem výšky 110 mm při tlakovém proudění



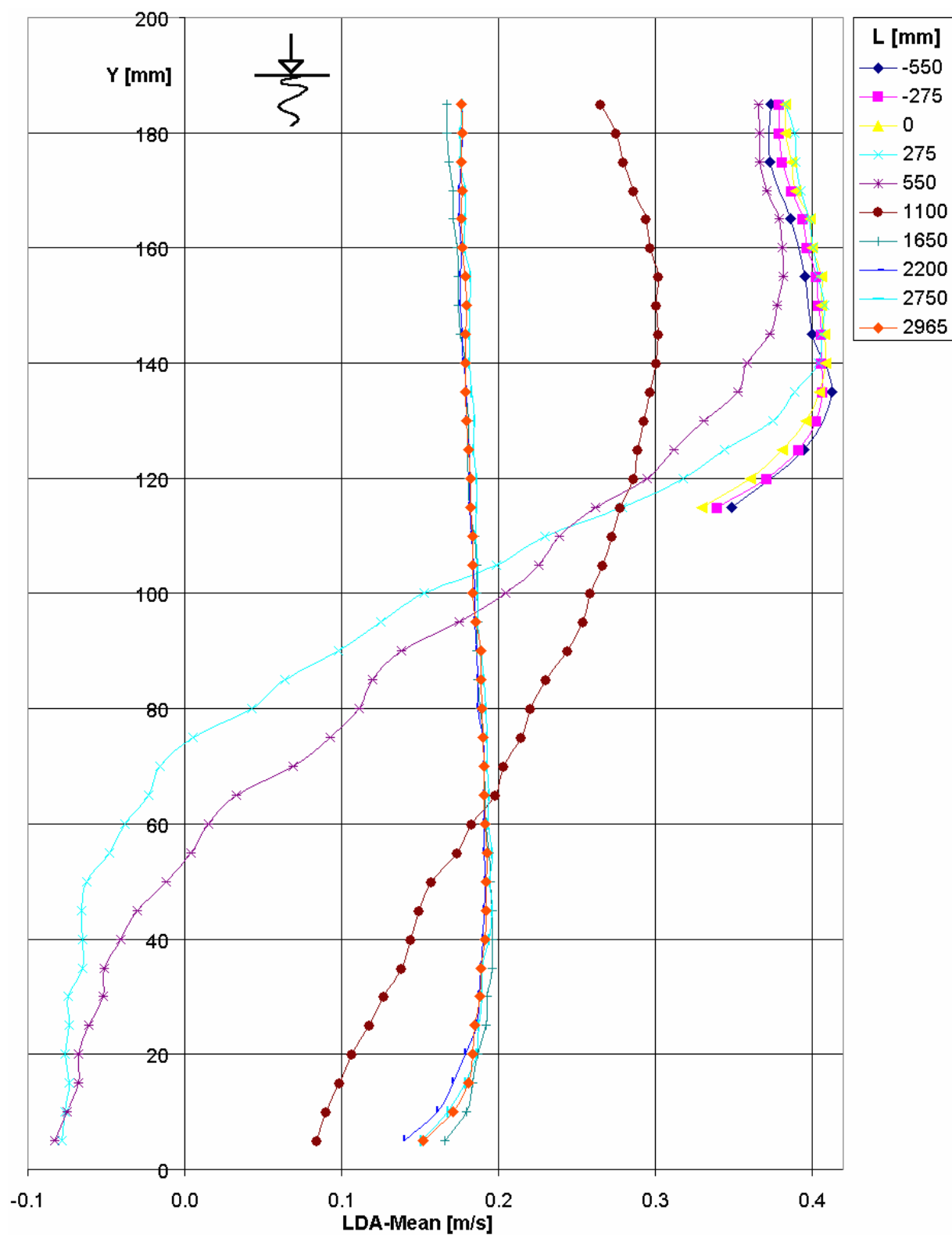
Obr.11 Časově střední obraz průmětů vektorů rychlosti do horizontální roviny 2 mm nad dnem kanálu za schodem výšky 110 mm při tlakovém proudění a snížené rychlosti proudění



Obr.12 Lokální časově střední obraz průmětů vektorů rychlosti do horizontální roviny 2 mm nad dnem kanálu za schodem výšky 110 mm při tlakovém proudění a snížené rychlosti proudění



Obr.13 Časově střední obraz průmětů vektorů rychlosti do horizontální roviny 2 mm nad dnem kanálu za schodem výšky 110 mm při proudění s volnou hladinou, dva na sebe navazující úseky (stupnice na spodním okraji obr. udávají vzdálenost od profilu schodu)



Obr.14 Průběhy podélné složky rychlostí ve svislicích v podélných vzdálenostech L od profilu schodu výšky 110 mm a ležících v rovině symetrie kanálu při proudění o volné hladině