

## FLOW PARAMETERS MEASUREMENT IN THE CURVED DIFFUSER OF THE RECTANGULAR CROSS-SECTION

Zubík. P. \*, Šulc J. \*

**Summary:** *The article deals with measurement of flow parameters in the bend diffuser of the rectangular cross-section and it's linking upstream and downstream straight axis sections. 90° bend diffuser with inner cylindrical wall was tested. For the measurement of mean and pulsation velocity components the contact-less measuring technique was used, such as Laser Doppler Anemometry (LDA) and Particle Image Velocimetry (PIV). Complementary the values of pressure in selected piezometric points on the canal walls were measured. The measurement was carried out in six different flow regimes. The results of this detailed measurement in selected relatively simple element are used for subsequent calibration and verification of mathematical models with appropriate type of turbulence.*

### 1. Úvod

V průběhu druhého roku výzkumného projektu podporovaného Grantovou agenturou České republiky „Měření struktury proudu k verifikaci matematického modelu ve vybraných hydraulických prvcích s možností jejich tvarové optimalizace“ reg. č.: 103/02/0545 byl proveden experiment na kanálovém oblouku s rozšířením z čtvercového na obdélníkový průřez. Účelem experimentu bylo získat vstupní a ověřovací data pro odladění matematických modelů realizovaných na dvou spoluřešitelských pracovištích. Pro daný účel byla vyrobena příslušná část hydraulického okruhu s průhledným modelem předmětného oblouku včetně výstupního úseku. K měření byly použity tři metody: rovinná laserová anemometrie (Particle Image Velocimetry (PIV)) – posloužila k měření rozložení rychlostí ve zvolených dvourozměrných řezech, bodová laserová anemometrie (Laser Doppler Anemometry (LDA)) – měření turbulence rychlosti ve zvolených bodech a měření tlakových poměrů ve zvolených řezech tlakovými odběry ve stěnách modelu. Všechna použitá měřicí technika je součástí vybavení Laboratoře vodohospodářského výzkumu (LVV) Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

Práce provedené v prvním roce daného výzkumného úkolu byly publikovány v příspěvcích Zubík & Šulc (2003), Příhoda & Sedlář (2003) a Rudolf (2003).

### 2. Stavba modelu

Zkušební okruh vybudovaný pro první rok výzkumu byl podstatným způsobem přebudován zhotovením nového kanálového oblouku (předchozí měl konstantní čtvercový průřez)

---

\* 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.

s plynulým přechodem z čtvercového na obdélníkový průřez. Na obr. 1 je fotografie modelu a na obr. 2 je schéma průběhu poproudňícího nárůstu průtočné plochy v oblouku. Vzhledem k záměru použít pro měření rychlostí bezkontaktní optické metody byly pro výrobu modelu oblouku s protiproudňícím a poproudňícím kanálem zvoleny materiály a technologie zajišťující úplnou průhlednost téměř celého modelu. Rozměry modelu jsou uvedeny ve schématu na obr. 3. Celkový přehled provedených měření je uveden v tabulkách č. 1 a 2. Hodnoty naměřené v tlakových odběrech ve stěnách modelu jsou v tabulce č. 3.

### 3. Měření parametrů vstupního pole

Ve vzdálenosti 1520 mm protiproudňě před vstupem do oblouku byl zvolen profil pro měření parametrů vstupního pole. Metodou PIV bylo provedeno 11 sérií měření, v tabulce č.1 označené pořadovým číslem 1 až 11. Následným zpracováním byl získán časově střední obraz rozložení podélné složky rychlosti napříč celým kanálem (obr. 4). Střední (průřezová) rychlost tohoto rychlostního profilu činí 2,0 m/s a pro účely porovnání s jinými nastavovanými režimy proudění ve zkušebním hydraulickém okruhu je označena jako „poměrná průřezová rychlost = 1“.

Ve stejném profilu bylo ve zvolené síti 28 měrných bodů (obr. 5) provedeno měření metodou LDA (v tabulce č.2 pořadové číslo 54). 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 (obr. 6).

### 4. Měření sekundárního proudění

PIV je metoda měření schopná zaznamenat okamžité rozložení průmětů rychlostí do měrné roviny. Pokud je měrná rovina umístěna kolmo na hlavní směr proudění (v daném případě je hlavní směr proudění ve směru hlavní osy kanálu) jsou zaznamenávány pouze relativně malé, ale pro verifikaci významné, složky rychlosti proudění. Tato úloha je pro PIV mnohem náročnější než měření dominantní složky rychlosti. Zvláště v protiproudňícím kanálu před obloukem byly zjištěny tak malé hodnoty sekundárních rychlostí že nebylo možno z nich vyhodnotit konzistentní grafy. Měření tohoto typu jsou v tabulce č.1 pod poř. č. 12 až 34. Měřeno bylo v několika rovinách protiproudňě před obloukem, uvnitř oblouku a poproudňě za ním. Největší sekundární rychlosti těsně za obloukem vykazují značné hodnoty přibližně poloviny průřezové rychlosti (příklad na obr. 7) a zachovávají si velmi významné hodnoty i ve vzdálenosti mnoha násobku šířky kanálu (příklad na obr. 8).

### 5. Měření v oblasti odtržení

Pro verifikaci matematického modelu je obzvláště zajímavá oblast, kde dochází k odtržení proudu od stěny tedy kolem vnitřní boční stěny oblouku. V této oblasti bylo měřeno jak ve vodorovných (v tabulce č.1 pod poř. č. 40 až 53) tak i ve svislých rovinách (v tabulce č.1 pod poř. č. 35 až 39). Pro získání celkového obrazu o této oblasti byla nejprve měřena rychlostní pole přes celou šířku kanálu (poř. č. 40 až 47) a to v sedmi rovinách rovnoběžných se dnem kanálu. Následně bylo provedeno detailnější měření při několika různých průtocích (poř. č. 48 až 53). Příklad jednoho časově středního obrazu rychlostního pole (poř. č. 48) je na obr. 9. U všech rychlostních polí za odtržením je možno pozorovat poměrně značné rozdíly mezi časově středními a jednotlivými okamžitými stavy rychlostního pole (příklad na obr. 10). Velikost oblasti se zpětným prouděním za odtržením proudu od stěny je ve srovnání s předchozím obloukem konstantního průtočného průřezu menší. Je zřejmé, že v daném případě

se významněji než nárůst (difuze) průtočného profilu projevilo zvětšení poloměru vnitřní boční stěny oblouku.

## 6. Závěr

Bezkontaktní měření středních a pulzačních složek rychlostí proudu včetně zobrazení časového vývoje úplných rychlostních polí v definovaných profilech hydraulického okruhu s difuzorovým obloukem pravouhlého průřezu umožnilo detailní analýzu struktury proudu. Rychlostní parametry (bodové i integrální) byly doplněny pro uzavření celkové energetické bilance měřenými tlaky ve vybraných piezometrických odběrech stěn kanálu. Pro experiment byl záměrně vybrán prvek s proměnnými proudovými poměry, kdy struktura proudu je funkcí Reynoldsova kritéria. Měření parametrů byla proto provedena i mimo – „pod“ automodelovou oblastí proudových jevů, což je pro verifikaci matematických modelů obzvlášť cenné.

Výsledky slouží ke kalibraci a verifikaci numerických postupů a nalezení vhodného modelu turbulence. Podrobnosti jsou v článku Příhoda & Sedlář (2004).

Shodná měření parametrů a struktury proudění tlakového i o volné hladině budou realizována na vybraných protékavých prvcích za podpory GA ČR také v letošním roce.

Tabulka 1

Měření PIV (série 30 až 65 okamžitých stavů rychlostního pole s periodou 0,2 nebo 0.07 s)

Poř. č.	Nastavená frekvence pohonu čerpadla	Poměrná střední průřez. rychlost	Orientace měřné roviny	Poloha měřné roviny		Poznámka
1	35 Hz	1	vodorovná	1520 mm před ob.	5 mm od dna	celý průřez kanálu
2	35 Hz	1	vodorovná	1520 mm před ob.	20 mm od dna	celý průřez kanálu
3	35 Hz	1	vodorovná	1520 mm před ob.	40 mm od dna	celý průřez kanálu
4	35 Hz	1	vodorovná	1520 mm před ob.	60 mm od dna	celý průřez kanálu
5	35 Hz	1	vodorovná	1520 mm před ob.	80 mm od dna	celý průřez kanálu
6	35 Hz	1	vodorovná	1520 mm před ob.	100 mm od dna	celý průřez kanálu
7	35 Hz	1	vodorovná	1520 mm před ob.	120 mm od dna	celý průřez kanálu
8	35 Hz	1	vodorovná	1520 mm před ob.	140 mm od dna	celý průřez kanálu
9	35 Hz	1	vodorovná	1520 mm před ob.	160 mm od dna	celý průřez kanálu
10	35 Hz	1	vodorovná	1520 mm před ob.	180 mm od dna	celý průřez kanálu
11	35 Hz	1	vodorovná	1520 mm před ob.	195 mm od dna	celý průřez kanálu
12	35 Hz	1	svislá	před obloukem	1520 mm před ob.	celý průřez kanálu
13	35 Hz	1	svislá	před obloukem	1100 mm před ob.	celý průřez kanálu
14	35 Hz	1	svislá	před obloukem	800 mm před ob.	celý průřez kanálu
15	35 Hz	1	svislá	před obloukem	400 mm před ob.	celý průřez kanálu
16	35 Hz	1	svislá	před obloukem	200 mm před ob.	celý průřez kanálu
17	35 Hz	1	svislá	před obloukem	100 mm před ob.	celý průřez kanálu
18	35 Hz	1	svislá	před obloukem	0 mm před ob.	celý průřez kanálu
19	35 Hz	1	svislá	uvnitř oblouku	30° od výstupu	celý průřez kanálu
20	35 Hz	1	svislá	uvnitř oblouku	45° od výstupu	celý průřez kanálu
21	35 Hz	1	svislá	uvnitř oblouku	60° od výstupu	celý průřez kanálu
22	35 Hz	1	svislá	uvnitř oblouku	50 mm od výstupu	celý průřez kanálu
23	35 Hz	1	svislá	za obloukem	0 mm od výstupu	celý průřez kanálu
24	35 Hz	1	svislá	za obloukem	50 mm od výstupu	celý průřez kanálu
25	35 Hz	1	svislá	za obloukem	70 mm od výstupu	celý průřez kanálu

26	35 Hz	1	svislá	za obloukem	100 mm od výstupu	celý průřez kanálu
27	35 Hz	1	svislá	za obloukem	200 mm od výstupu	celý průřez kanálu
28	35 Hz	1	svislá	za obloukem	300 mm od výstupu	celý průřez kanálu
29	35 Hz	1	svislá	za obloukem	400 mm od výstupu	celý průřez kanálu
30	35 Hz	1	svislá	za obloukem	600 mm od výstupu	celý průřez kanálu
31	35 Hz	1	svislá	za obloukem	800 mm od výstupu	celý průřez kanálu
32	35 Hz	1	svislá	za obloukem	1000 mm od výstupu	celý průřez kanálu
33	35 Hz	1	svislá	za obloukem	1500 mm od výstupu	celý průřez kanálu
34	35 Hz	1	svislá	za obloukem	2000 mm od výstupu	celý průřez kanálu
35	35 Hz	1	svislá	výstup z oblouku	3 mm od p. boční stěny	celý průřez kanálu
36	35 Hz	1	svislá	výstup z oblouku	15 mm od p. boční stěny	celý průřez kanálu
37	35 Hz	1	svislá	výstup z oblouku	40 mm od p. boční stěny	celý průřez kanálu
38	35 Hz	1	svislá	výstup z oblouku	150 mm od p. boční st.	celý průřez kanálu
39	35 Hz	1	svislá	výstup z oblouku	3 mm od l. boční stěny	celý průřez kanálu
40	35 Hz	1	vodorovná	v oblouku	5 mm od dna	celý průřez kanálu
41	35 Hz	1	vodorovná	v oblouku	15 mm od dna	celý průřez kanálu
42	35 Hz	1	vodorovná	v oblouku	50 mm od dna	celý průřez kanálu
43	35 Hz	1	vodorovná	v oblouku	100 mm od dna	celý průřez kanálu
44	35 Hz	1	vodorovná	v oblouku	100 mm od dna	celý průřez kanálu
45	35 Hz	1	vodorovná	v oblouku	150 mm od dna	celý průřez kanálu
46	35 Hz	1	vodorovná	v oblouku	185 mm od dna	celý průřez kanálu
47	35 Hz	1	vodorovná	v oblouku	195 mm od dna	celý průřez kanálu
48	35 Hz	1	vodorovná	v oblouku	100 mm od dna	detail odtržení
49	41 Hz	1,19	vodorovná	v oblouku	100 mm od dna	detail odtržení
50	28 Hz	0,78	vodorovná	v oblouku	100 mm od dna	detail odtržení
51	20 Hz	0,50	vodorovná	v oblouku	100 mm od dna	detail odtržení
52	15 Hz	0,30	vodorovná	v oblouku	100 mm od dna	detail odtržení
53	13 Hz	0,15	vodorovná	v oblouku	100 mm od dna	detail odtržení

Tabulka 2

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

Poř. č.	Nastavená frekvence pohonu čerpadla	Poměrná střední průřez. rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny	Poznámka
54	35 Hz	1	svislá	1520 mm před ob.	celý průřez kanálu
55	41 Hz	1,19	svislá	1520 mm před ob.	celý průřez kanálu
56	28 Hz	0,78	svislá	1520 mm před ob.	celý průřez kanálu
57	20 Hz	0,50	svislá	1520 mm před ob.	celý průřez kanálu
58	15 Hz	0,30	svislá	1520 mm před ob.	celý průřez kanálu
59	13 Hz	0,15	svislá	1520 mm před ob.	celý průřez kanálu

Tabulka 3

Hodnoty tlakových výšek v piezometrických odběrech v bočních stěnách modelu

f [Hz]	v [-]	P1 vlevo [mmH <sub>2</sub> O]	P2 vpravo [mmH <sub>2</sub> O]	P3 vlevo [mmH <sub>2</sub> O]	P4 vpravo [mmH <sub>2</sub> O]	P5 vlevo [mmH <sub>2</sub> O]	P6 vpravo [mmH <sub>2</sub> O]	P7 vlevo [mmH <sub>2</sub> O]	P8 vpravo [mmH <sub>2</sub> O]
		1450 mm před obloukem		650 mm před obloukem		2050 mm za obloukem		3550 mm za obloukem	
13	0.15	195	195	195	195	196	196	195	195
15	0.30	196	197	195	195	198	198	197	197
20	0.50	171	172	167	168	178	179	176	177
28	0.78	180	184	169	170	195	198	192	193
35	1.00	161	168	144	146	188	192	182	187
41	1.19	155	166	128	131	193	199	186	190

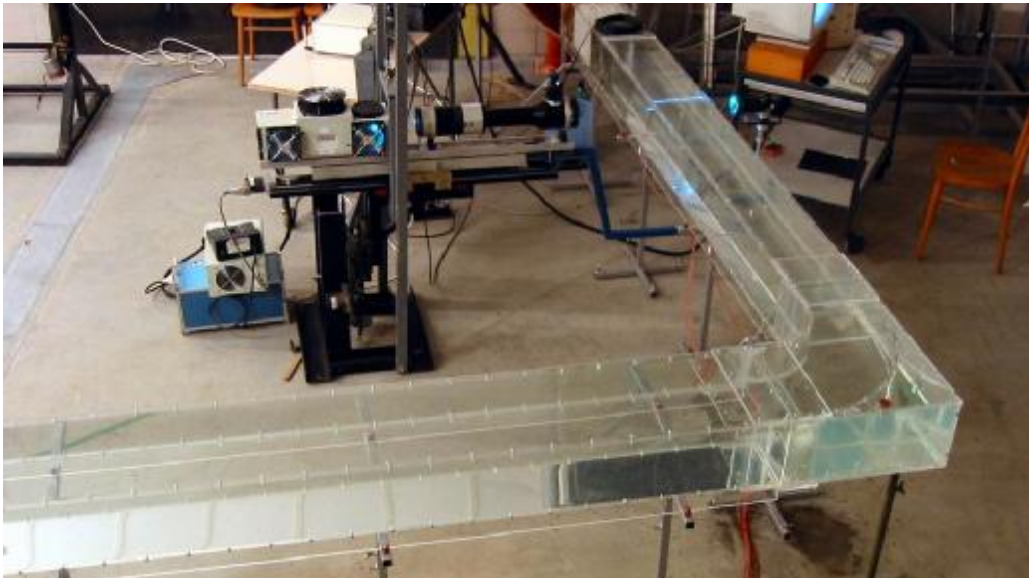
## 7. Literatura

Příhoda J. & Sedlář M. (2003) Prediction of turbulent flow in a curved channel using various turbulence models, in.: *Engineering Mechanics 2003*, Ústav pro teoretickou a aplikovanou mechaniku AVČR, Svratka, s. 286-287, CD s. 271. ISBN 80-86246-18-3

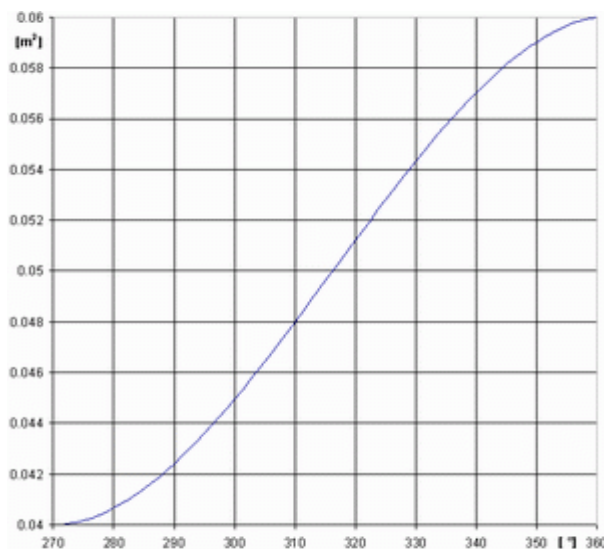
Příhoda J. & Sedlář M. (2004) Ztráty při turbulentním proudění v zakřivených kanálech a difuzorech obdélníkového průřezu, in.: *Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín*, Žilinská univerzita v Žilině, Rajecké Teplice

Rudolf P. (2003) Analysis of flow in a square-sectioned elbow, in.: *Engineering Mechanics 2003*, Ústav pro teoretickou a aplikovanou mechaniku AVČR, Svratka, s. 300-3001, CD s. 148. ISBN 80-86246-18-3

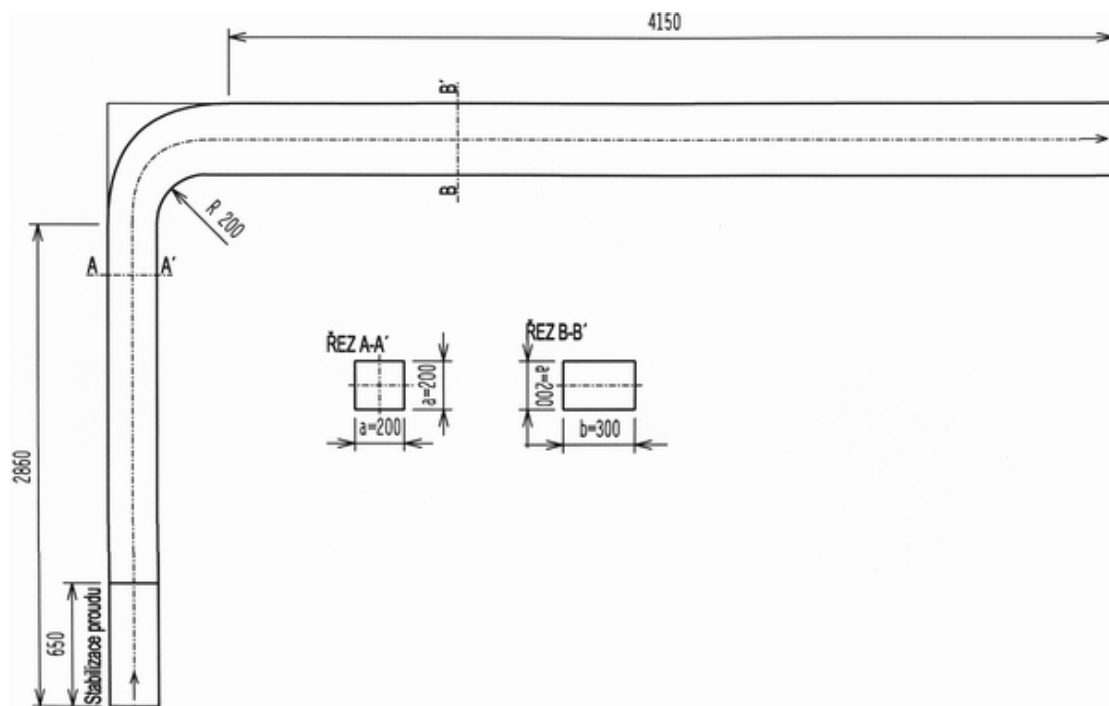
Zubík P. & Šulc J. (2003) The measurement of flow parameters in square cross section bend, in.: *Engineering Mechanics 2003*, Ústav pro teoretickou a aplikovanou mechaniku AVČR, Svratka, s. 410-411, CD s. 153. ISBN 80-86246-18-3



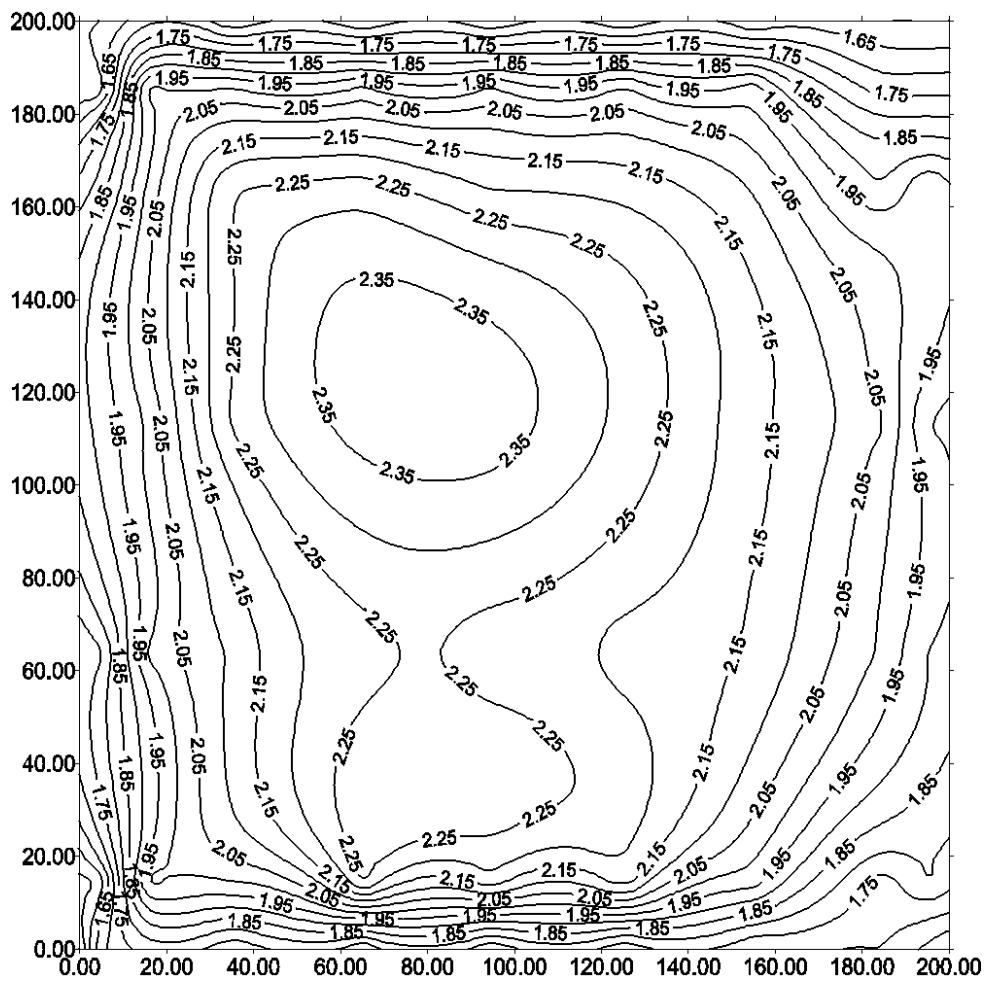
Obr.1 Celkový pohled na model při měření pomocí LDA



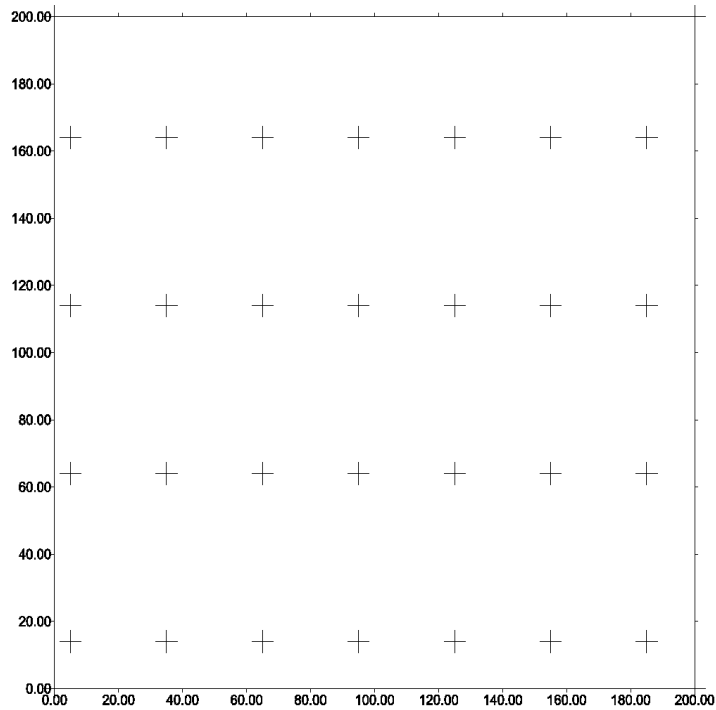
Obr.2 Popravní nárůst průtočné plochy v oblouku



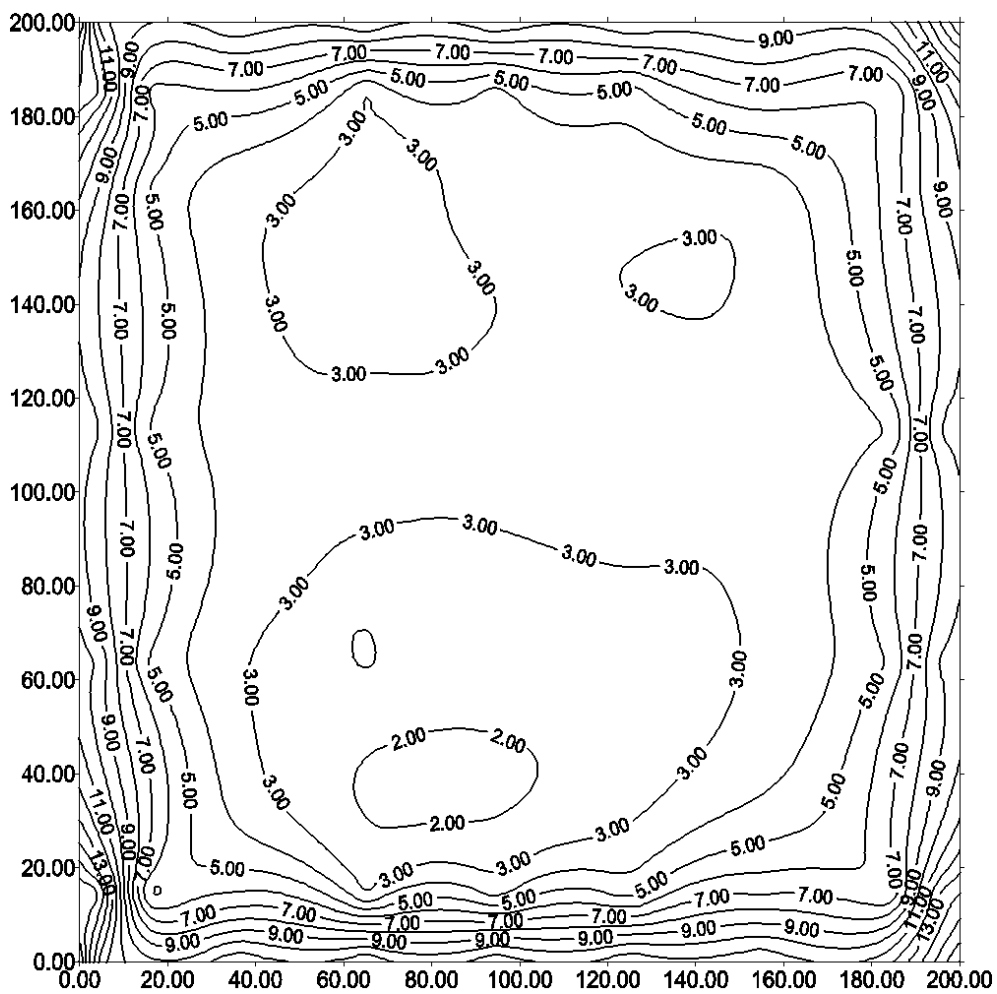
Obr.3 Schéma modelu



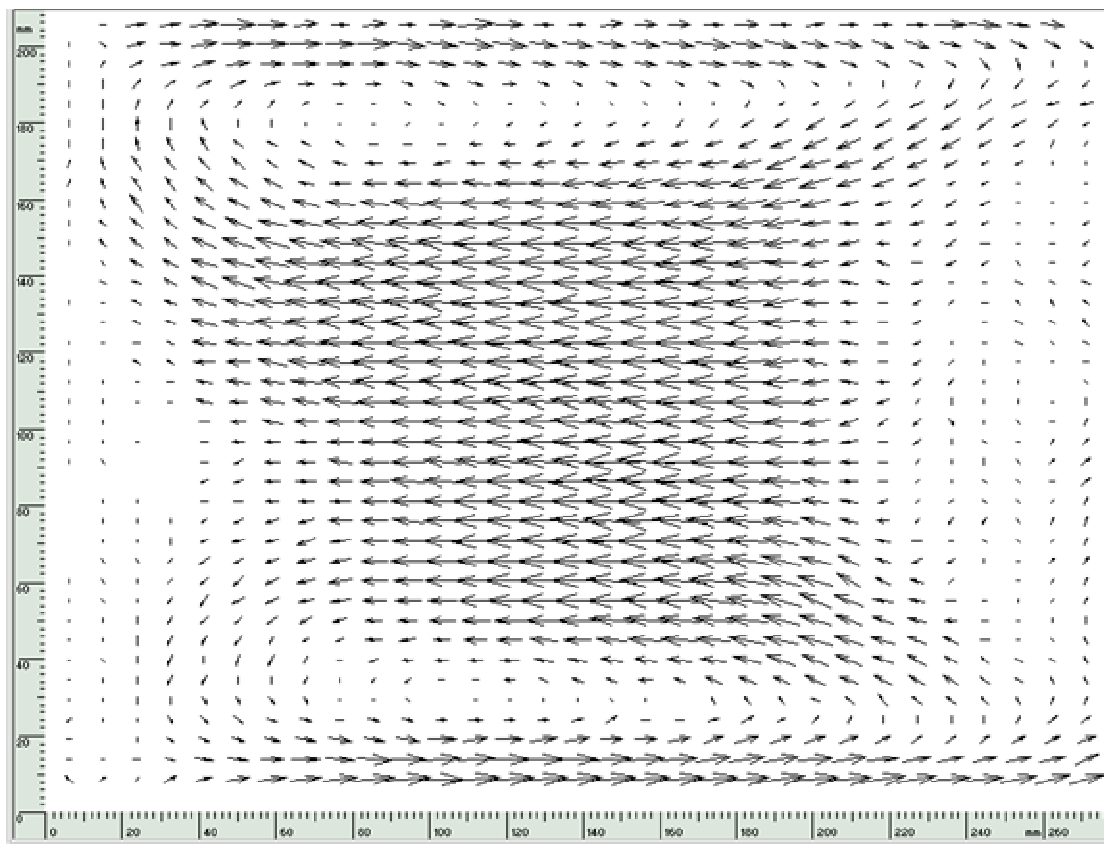
Obr.4 Rozložení podélné složky rychlosti 1520 mm protiproudě před obloukem



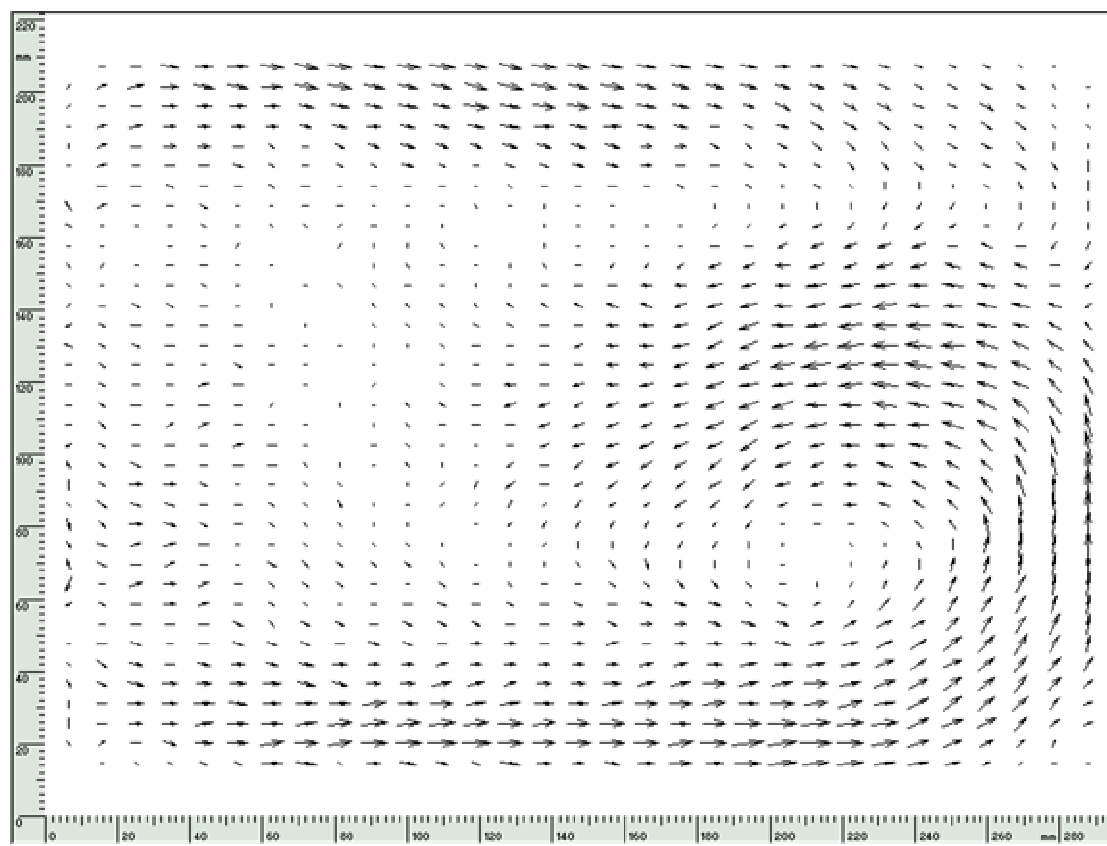
Obr.5 Schéma rozmístění LDA měrných bodů



Obr.6 Rozložení turbulence (v procentech) podélné složky rychlosti 1520 mm před obloukem

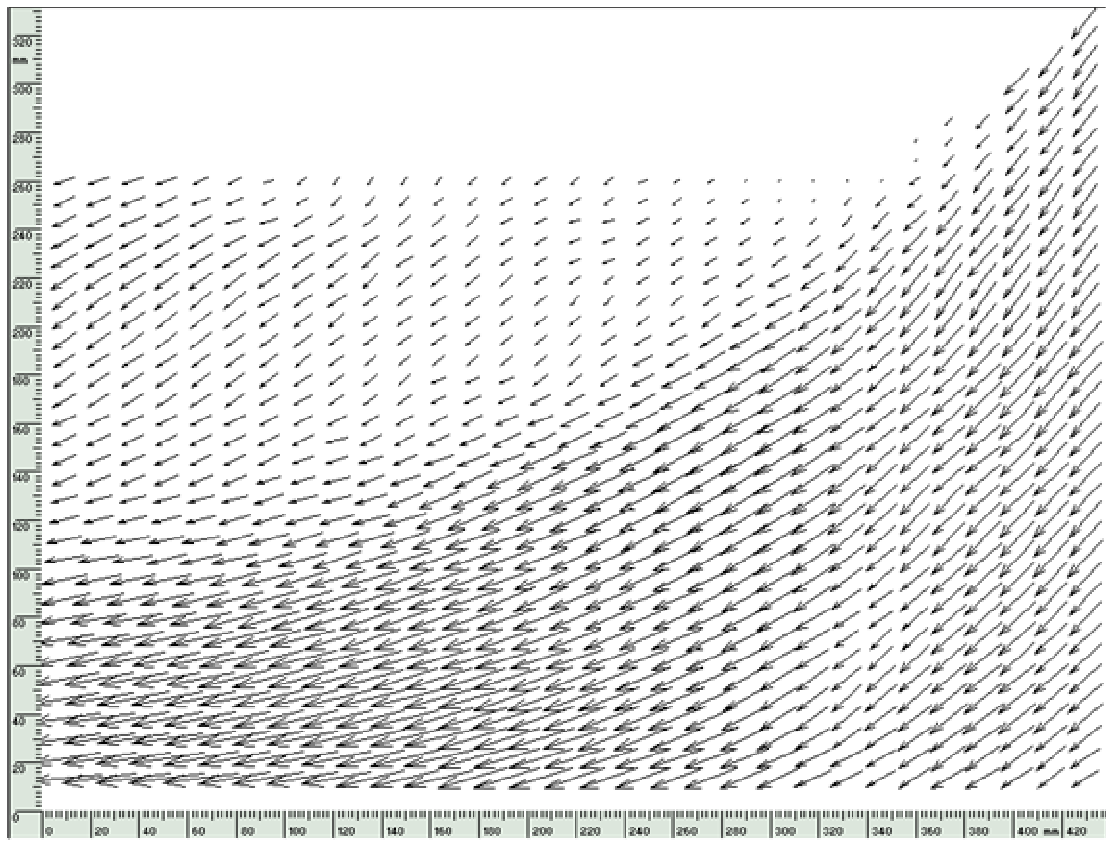


*Obr.7 Sekundární rychlosti na výstupu z oblouku*

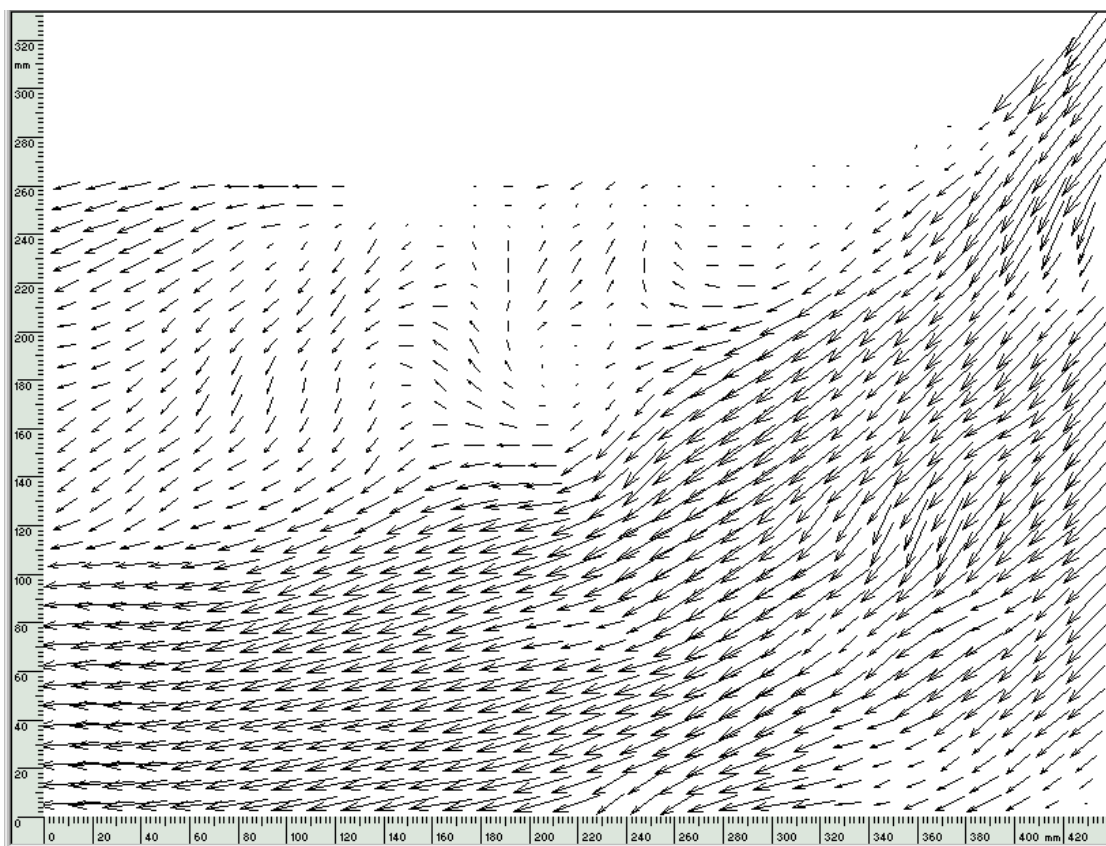


*Obr.8 Sekundární rychlosti 600 mm za obloukem*





*Obr.9 Časově střední obraz odtržení proudu od stěny*



*Obr.10 Jeden okamžitý stav odtržení proudu od stěny*