



FLUID FLOW IN BIFURCATION, MEASUREMENTS AND NUMERICAL MODELING

Jaroslav Štigler*, František Pochylý*, Michaela Nováková*

Summary: *There will be described the measurement of velocity field in bifurcation by laser method PIV in this paper. Results of measurements are compared with results of 3D numerical model fluid flow in bifurcation made by FIDAP software.*

1. Úvod

Problematika proudění v rozvětvení je řešena za podpory grantové agentury České Republiky (GAČR) v rámci grantu č. GA 101/99/P027 s názvem *Třírozměrné nestacionární proudění v rozvětvení s aplikací na biomechaniku*.

Proudění v rozvětvení je poměrně složitý případ proudění, který zasahuje, jak do technické praxe, tak do biomedicíny. Jako takový není ještě dostatečně prozkoumaný. Tento grant je zaměřen hlavně na numerické modelování proudění v potrubí. Pokud však chceme prověřit, zda výsledky získané výpočtem jsou správné, pak je třeba provést experiment a srovnat veličiny vypočtené s veličinami naměřenými. To je cílem tohoto příspěvku. Nejříve bylo prováděno měření na modelu rozvětvení tvaru T, po té bylo provedeno numerické modelování stejného rozvětvení za stejných okrajových podmínek, pomocí softwaru FIDAP. Pole rychlostí bylo měřeno metodou PIV.

Proč se vůbec zabýváme prouděním v rozvětvení? Důvody jsou různé. Z pohledu technického, rozvětvení naruší proud kapaliny a je tak zdrojem ztrát. Je tedy účelné tyto ztráty identifikovat a minimalizovat. Dále pro výpočet potrubních sítí neexistuje vyhovující matematický model, na základě kterého by bylo možné určit tlaky na počátcích jednotlivých větví. V současné době se velmi často používá zjednodušený model, kdy tlak je v rozvětvení konstantní. Na základě měření a výpočtového modelování bylo zjištěno, že tento předpoklad neodpovídá skutečnosti. Tento problém je řešen v [1]. Z pohledu biomedicíny je proudění v rozvětvení příčinou vzniku různých cévních onemocnění, jako je například arteroskleróza. Asi těžko můžeme nějak měnit tvar tohoto rozvětvení, ale porozumění proudění krve v cévách a příčin cévních onemocnění, může vést k tomu, že budeme moci tyto nemoci lépe léčit, nebo budeme schopni jim předcházet. Dalším důvodem proč se zabývat prouděním v cévách je to, že můžeme, snad právem, předpokládat, že tělo vytváří rozvětvení cév tak, aby ztráty při proudění krve byly minimální a aby byly minimální i negativní účinky rozvětvení na krev.

* Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D., VUT FSI v Brně, Technická 2, Brno 616 69, tel.05-4114 2342,
e-mail stigler@khzs.fme.vutbr.cz

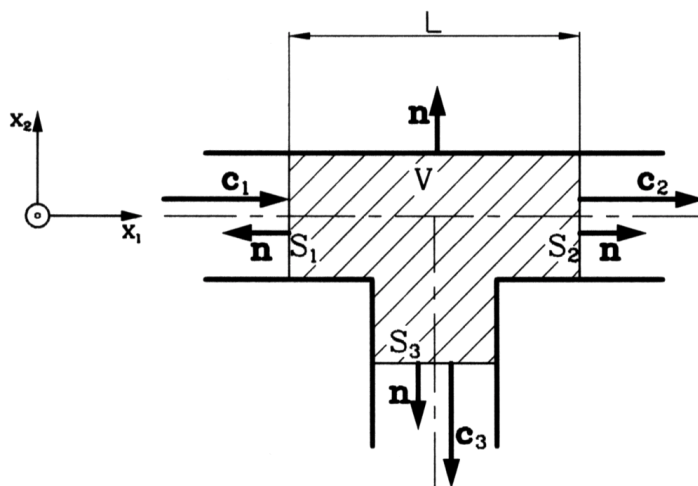
* Prof. Ing. František Pochylý, CSc., VUT FSI v Brně, Technická 2, Brno 616 69, tel.05-4114 2335,
e-mail pochyly@khzs.fme.vutbr.cz

* Ing. Michaela Nováková, VUT FSI v Brně, Technická 2, Brno 616 69, tel.05-4114 2342,
e-mail novakova@khzs.fme.vutbr.cz

2. VYMEZENÍ OBLASTI ŘEŠENÍ PROBLÉMU

Vzhledem k tomu, že existuje mnoho druhů rozvětvení je třeba vymezit jakým rozvětvením se budeme zabývat. Půjde o rozvětvení, které má jednu větev přívodní a dvě větve odtokové. Z důvodů velmi častého výskytu budeme pro začátek uvažovat rozvětvení tvaru T, tak jak je uvedeno na obrázku. Veškeré proudové a geometrické veličiny v jednotlivých větvích budeme označovat následujícím způsobem:

index 1	veličiny v přívodní větvi
index 2	veličiny v odtokové větvi která navazuje na přívodní větev
index 3	veličiny, které se vztahují k odtokové větvi ve směru kolmém na hlavní větev



obr 1. obrázek rozvětvení

3. EXPERIMENT

Pro měření rychlostního pole rozvětvení bylo využito moderní laserové metody PIV, která umožňuje zachytit v daném okamžiku celé rychlostní pole sledované oblasti v určité vhodně zvolené rovině. Nevýhodou je, že měříme vlastně jen průměry rychlostí do roviny měření. Měření bylo prováděno v rovině která je rovnoběžná s rovinou rozvětvení a prochází osou trubek. Toto měření bylo prováděno ve spolupráci s pracovištěm konkrétně s Ing. Pavlem Zubíkem.

Nejdříve si popíšeme podmínky za jakých byl experiment prováděn a postup měření.

Proudové poměry

Vzhledem k tomu, že výsledky by měly být aplikovány na proudění v cévách, tak byl experiment prováděn pro laminární proudění. Z hlediska srovnání s výpočtem má laminární proudění tu výhodu, že není nutné zavádět žádný model turbulence. Experiment byl proveden pro 11 poměrů průtoků tak jak jsou uvedeny v tabulce 1.

Model

Model rozvětvení musel být upraven tak, aby bylo možné na něm provést měření pomocí laseru. Rozvětvení bylo vyrobeno z transparentního plastu. Průměry všech větví byly stejné a to 19 mm. Délky přímých úseků před a za rozvětvením je cca 500 mm což odpovídá asi 28 vnitřním

průměrům trubek. Odbočující větev byla do hlavní větve vlepena, aby hrany byly pokud možno ostré. To však způsobovalo problémy při snímání částic kamerou, protože lepený spoj se po prosvícení laserovou rovinou rozzářil. Tento problém byl vyřešen tak, že byly použity fluorescenční částice, a na snímající kameře byl použit filtr, kterým byly tyto odlesky odfiltrovány. Pro snížení vlivu lomu paprsku při přechodu různými prostředními stěnách rozvětvení, byl model ponořen do vody.

č. měř.	Q1 l/min	Q3/Q1	Re1	Re2	Re3
1	1,4296	0	1595	1595	0
2	1,4973	0,146822	1671	1425	245
3	1,553	0,278733	1733	1250	483
4	1,4404	0,342175	1607	1057	550
5	1,6011	0,430869	1871	876	995
6	1,6766	0,531694	1871	876	995
7	1,6805	0,553352	1875	837	1038
8	1,4091	0,666391	1572	525	1048
9	1,6645	0,814075	1857	345	1512
10	1,3249	0,909634	1478	134	1345
11	1,7249	1	1925	0	1925

tab. 1 přehled poměrů průtoku pro které bylo vykonáno měření

Popis měřicího okruhu

Schéma měřicího okruhu je na obrázku 2. Měřicí okruh se skládá z horní nádrže s přepadem, pro zachování konstantní nátokové výšky, odtud je kapalina vedena do přírodní větve rozvětvení. Model rozvětvení je ponořen do vody z důvodu, snížení vlivu lomu paprsku na rozhraní trubka vzduch. Na obou větvích, které kapalinu z rozvětvení odvádějí jsou umístěny regulační orgány pro nastavení požadovaného průtoku. Na obou odtokových větvích je měřen průtok. Od místa měření průtoku je pak kapalina odváděna do spodní nádrže odkud je znovu čerpadlem dopravována do nádrže horní.

Měřené veličiny

Bylo měřeno pole průmětů vektorů rychlostí do roviny měření. Měření bylo provedeno pomocí metody PIV.

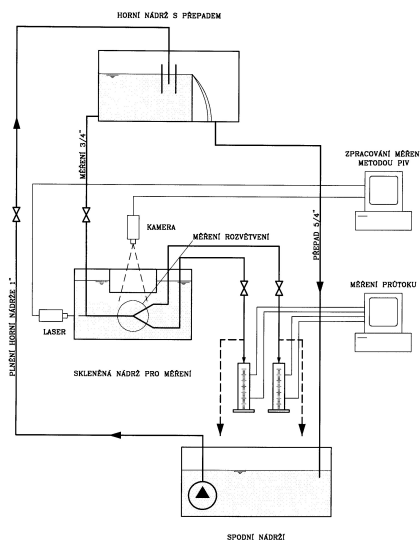
Na každé odtokové větvi byl měřen průtok pomocí objemové metody do odměrných válců, ve kterých byly umístěny kontakty pro možnost přesného měření času nateklého množství kapaliny. Čas byl měřen počítačem, aby byla vyloučena subjektivní chyba.

Pro určení ztrát je třeba měřit i tlaky. Měření tlaků bylo také prováděno, ale citlivost tlakoměrů byla nevhodná, proto bude měření tlaků a následně ztrát provedeno v další etapě experimentu.

Postup měření

Průtoky v odtokových větvích byly nastavovány tak, že při prvním měření byl uzávěr na odbočující větví úplně uzavřen a veškerý průtok byl veden přímou větví. Pak se postupně zvyšoval průtok do odbočující větve a současně se snižoval průtok přímou větví až do jejího úplného uzavření. Přitom byla snaha udržet celkový průtok stále konstantní viz tabulka 1.

SCHEMA MĚŘICÍHO OKRUHU



obr.2 schéma měřicího okruhu

4. VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

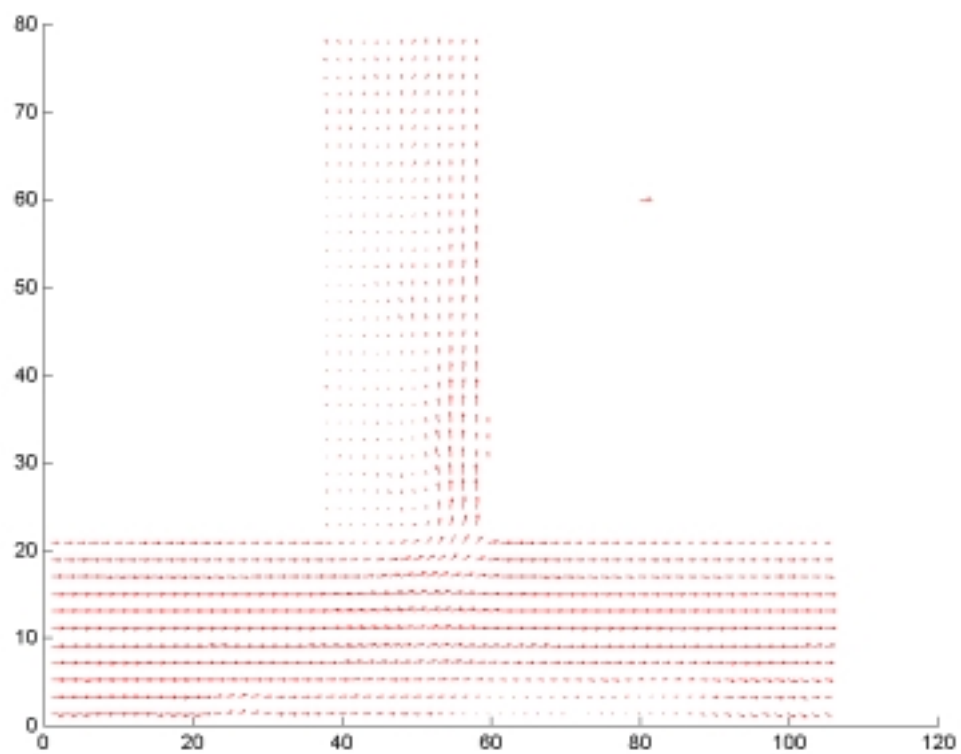
Výpočtové modelování bylo prováděno pomocí softwaru FIDAP. Snahou bylo co nejpřesněji namodelovat stejné podmínky jako při experimentu. Proudění bylo řešeno jako třírozměrné, stacionární, laminární proudění. Síť byla tvořena z šestistěnů. Počet elementů byl 41 640.

Na přívodní větví byla zadáván pístový rychlostní profil, tak aby průtok odpovídal naměřenému průtoku, na přímé odtokové větví byl zadáván parabolický profil tak, aby byl dodržen poměr průtoku jednotlivými větvemi jako u experimentu a ovlivnění proudu bylo co nejmenší.

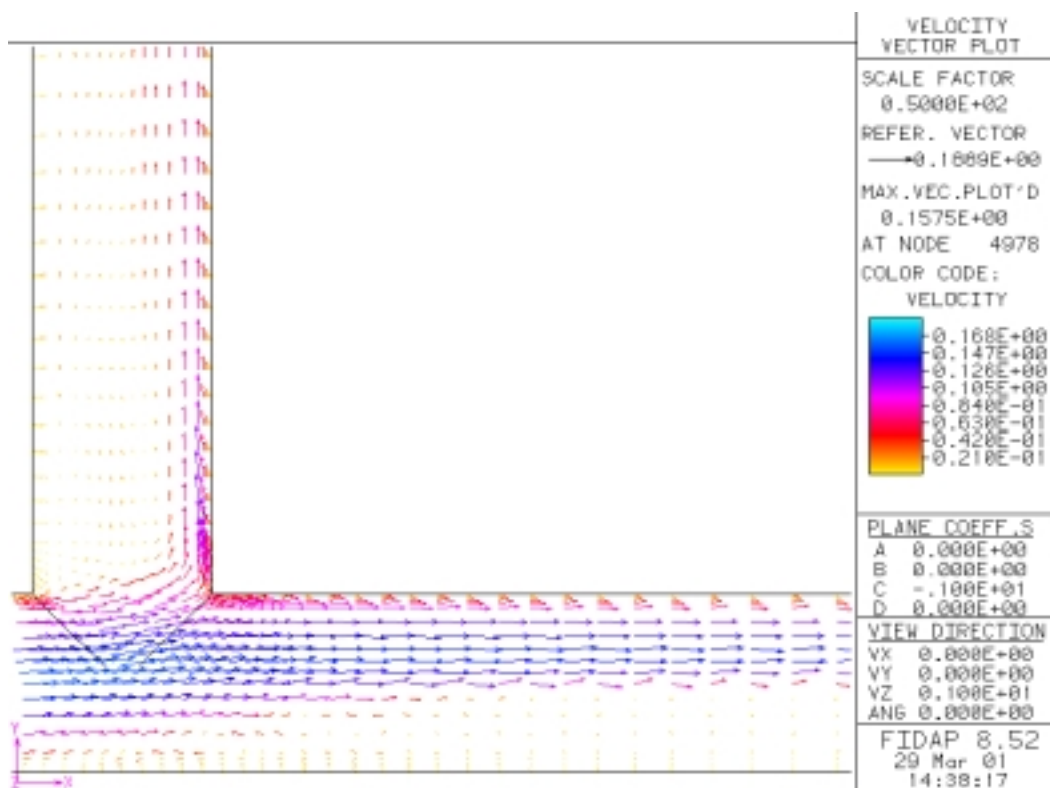
5. SROVNÁNÍ EXPERIMENTU A MĚŘENÍ

Výsledkem měření je zobrazení rychlostního pole v oblasti rozvětvení. Tady je nutné ještě podotknout, že výsledky získané měřením Laserem, je vždy ještě nutno statisticky zpracovat, to může do výsledného vektorového pole vnést chybu. Statistické zpracování se projeví tak, že malé proudové struktury zaniknou. Ovšem je tady možnost prohlédnout snímky částic, které byly při měření vytvořeny a ty nám odhalí každou vírovou strukturu. Nevýhoda je jen v tom, že to není kvantifikováno. Metoda PIV je také nevýhodná pro měření rychlostí v blízkosti stěn. Měřením, získáme, vlastně okamžité rozložení vektorů rychlostí. Měříme tak vlastně nestacionární proudění. Po měření máme k dispozici, jednak sekvenci polí vektorů rychlostí, a jednak sekvenci snímků pohybujících se částic. Z toho lze udělat animaci proudění v rozvětvení, kterou je možno analyzovat.

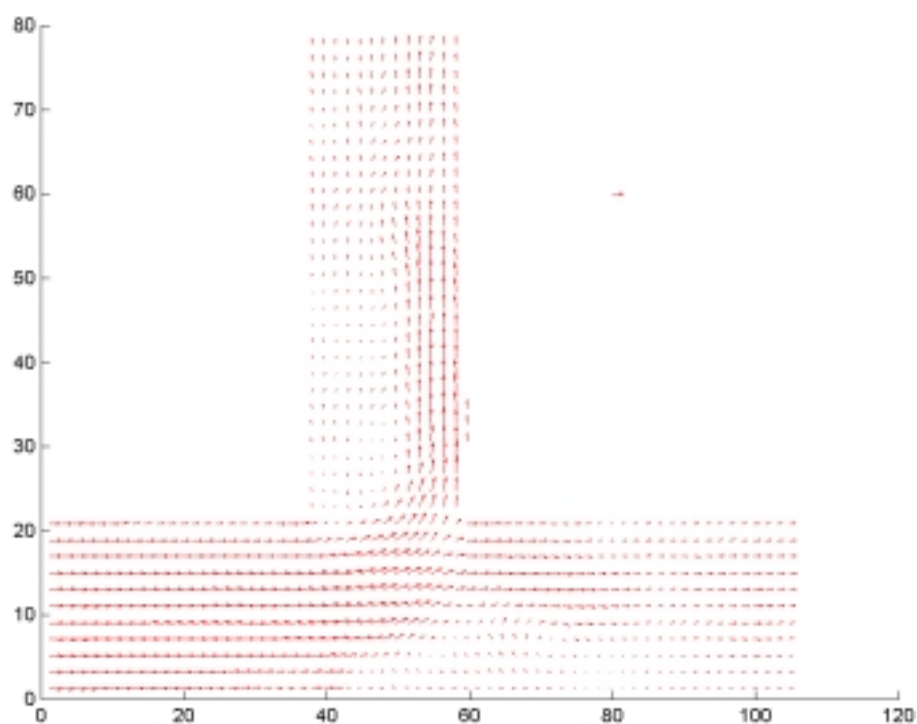
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny výsledky rychlostního pole tak jak byly naměřeny Laserem. U obrázků je vždy uveden celkový průtok a potom poměr průtoků.



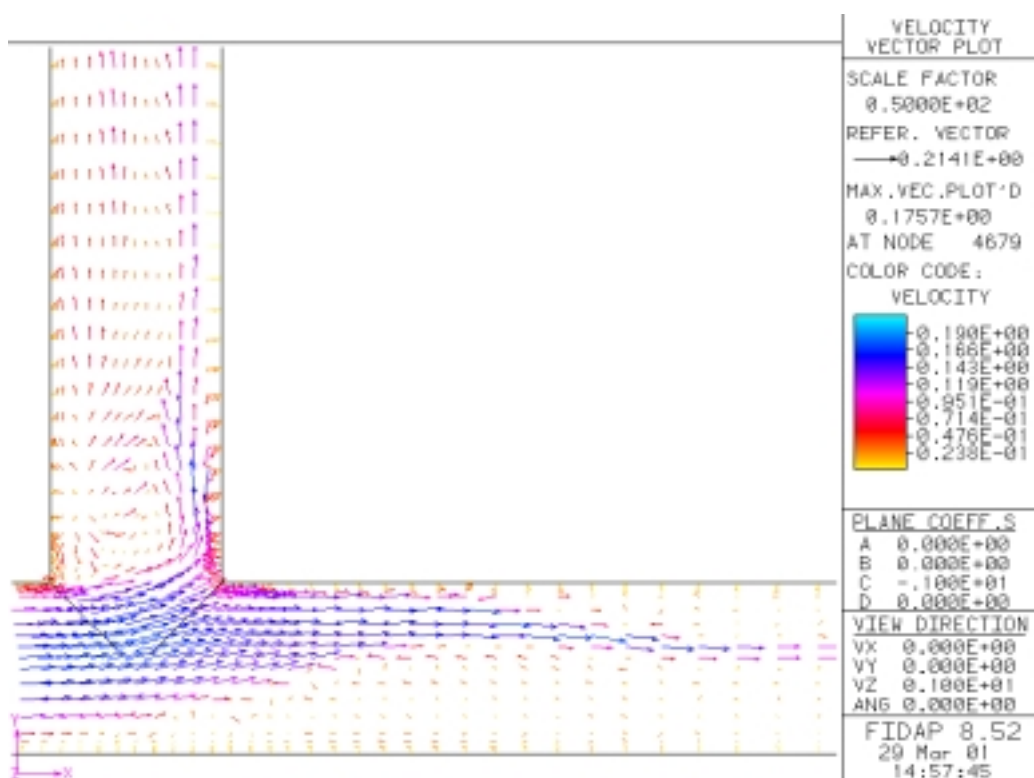
obr.3 Výsledky třetího měření (viz tab.1)



obr.4 Výsledky výpočtů pro srovnání s třetím měřením.



obr.5 Výsledky měření č.6 (viz tab.1)

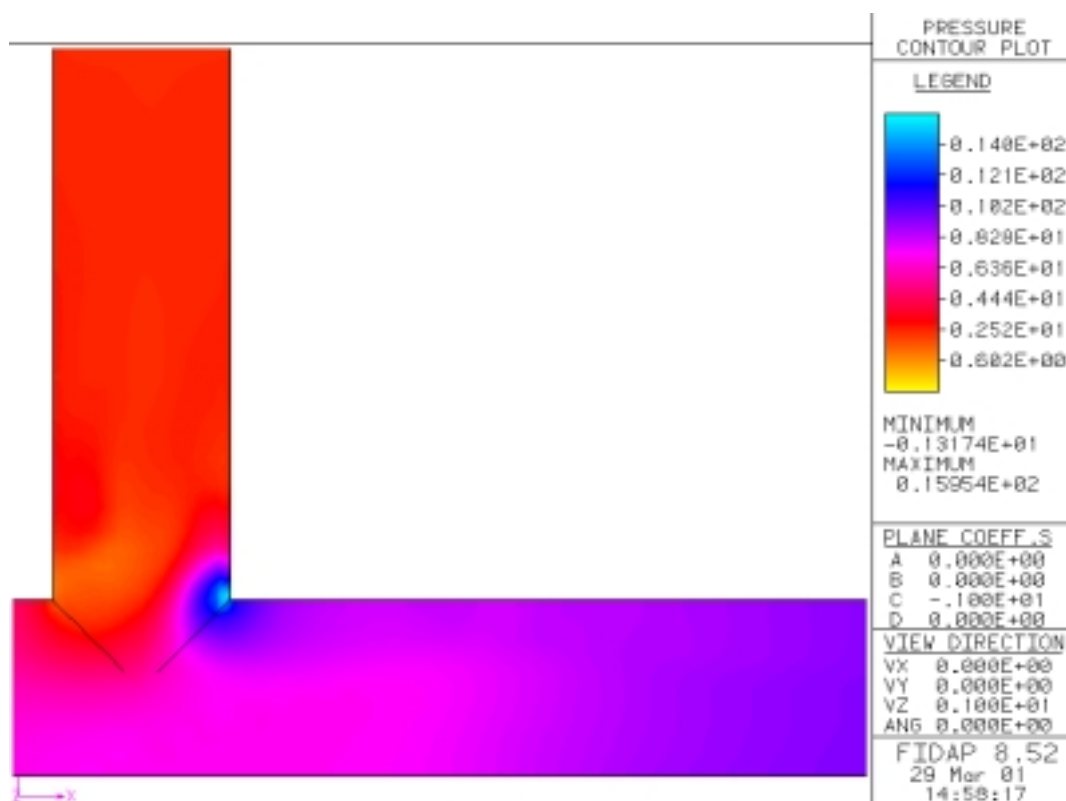


obr.6 Výsledky výpočtů pro srovnání s měřením č.6

Při srovnání měření můžeme sledovat různé jevy. Nejdříve se budeme zabývat oblastmi odtržení proudu. Při proudění v rozvětvení je zjevné, že vedlejší větví musí dojít k odtržení proudu. To je naprosto logické. Už méně předvídatelné je to co se projevilo měřením i výpočtovým modelováním, že k odtržení dochází také v přímé větví za rozvětvením. Je zvláštní, že pokud sledujeme celkový ztrátový součinitel pro rozvětvení, tak budeme-li měnit poměr průtoků tak jak při tomto experimentu, tak ztrátový součinitel klesá do určitého malého průtoku ve vedlejší větví a posléze začne narůstat. Zajímavé je že z výpočtu, které nejsou předmětem tohoto článku vychází, že celkový ztrátový součinitel má minimum právě těsně před takovým poměrem průtoků Q_3/Q_1 , při kterém dojde k odtržení proudu v přímé pokračující větví. Od té chvíle ztrátový součinitel výrazně narůstá. Z toho vidíme, že odtržení v přímé větví má na ztráty velký vliv. V literatuře [4], kde je zkoumáno proudění v rozvětvení cév je uvedeno, že v přímé pokračující větví, k odtržení proudu nikdy nedochází. To je dáno geometrií cév.

Při výpočtech došlo k odtržení při okrajových podmínkách měření č.3. Toto proudění je zobrazeno na obrázku 4. Pokud budeme sledovat pole vektorů rychlostí, získané z měřením laserem, náznaky odtržení se objeví až při měření č. 4. U měření 3 (obr.3) není žádný náznak odtržení proudu v přímé větví patrný. To je však dáno statistickým zpracováním výsledků měření, protože prohlédneme-li si animace snímků částic, tak tam je odtržení patrné již při měření č. 3, stejně jako při výpočtovém modelování.

Na obrázcích 5,6 je ukázka pole vektorů rychlostí pro měření č. 6. Tam už je patrné odtržení v obou případech. Přitom, charakter proudění získaný měřením je velmi blízký vypočteným hodnotám.



obr.7 Rozložení vypočtených tlaků pro měření č. 6

Na obrázku 7, vidíme vypočtené rozložení tlaků. Vidíme, že je potvrzena domněnka, že při modelování rozvětvení v potrubních sítích nelze předpokládat, že tlak je v rozvětvení konstantní. Je proto třeba používat jiný matematický model, jak je uvedeno v literatuře .

6. ZÁVĚR

Na závěr je možné říct, že experiment je v dobré shodě s vypočtenými hodnotami. Je tedy možné říci, že pro laminární proudění je možné předpokládat, že je možné s dostatečnou věrohodností pokračovat v dalším výpočtovém modelování proudění v rozvětvení. Je však třeba podotknout, že zatím nebyly měřeny tlaky a nebyly srovnávány ztrátový součinitelé z naměřených a vypočtených hodnot tlaků. To je předmětem další práce při zkoumání proudění v rozvětvení. Dále výpočtové modelování bylo prováděno pro stacionární proudění. I toto bude při dalších výpočtech zohledněno a budou prováděny výpočty nestacionárního laminárního proudění.

Na závěr je možné říct, že má smysl se zabývat proudění v rozvětvení, protože se nabízí příležitost a možnosti jak navrhovat rozvětvení tak, aby ztráty byly minimální. Snižování ztrát pak vede k úspoře energie, což je dnes celosvětový trend.

7. LITERATURA

- [1] Štigler J., Pochylý F.: O matematickém modelu rozvětvení, Seminar proceedings: Topical Problems of Fluid Mechanics 2001, Institute of Thermomechanics AS CR, Prague 2001.
- [2] Štigler J.: Proudění v rozvětvení. Sborník mezinárodní konference: Sretnutie katedier mechaniky tekutín a termomechaniky. Žilinská univerzita v Žilině (ed.). EDIS-vydavateľstvo ŽU, 2000, s. 158-162, ISBN 80-7100-729-3.
- [3] Kolář V., Vinopal St.: Hydraulika průmyslových armatur. SNTL Praha 1963.
- [4] David N. Ku, Don P. Giddens.: Laser Doppler anemometer measurements of pulsatile flow in a model carotid bifurcation. J. Biomechanics Vol. 20, No 4, pp. 407-421, 1987.
- [5] Sierra-Espinosa F.Z., Bates C.J., O'Doherty T.: Turbulent flow in a 90° pipe junction, Part 1: Decay of fluctuations upstream the flow bifurcation., Computers&fluids, December 1998.
- [6] Sierra-Espinosa F.Z., Bates C.J., O'Doherty T.: Turbulent flow in a 90° pipe junction, Part 2: Reverse fluid at the branch exit. Computers&fluids, December 1998.
- [7] H. Kozarubo, Y. Yanai, T. Naiki: A 3D-LDA Study of the Relation Between Wall Shear Stress and Intimal Thickness in a Human Aortic Bifurcation. J. Biomechanics vol. 118/(273-279), August 1996.
- [8] J.A.Moore, D.A. Steinman, D.W. Hodsworth, C.R. Ethier: Accuracy of Computational Hemodynamics in Complex Arterial Geometries Reconstructed from Magnetic Resonance Imaging. Annals of Biomedical Engineering, Vol. 27, pp.32-41, 1999.
- [9] J. Cao, S. E. Rittgers: Particle Motion Within In Vitro Models of Stenosed Internal Carotid and Left Anterior Descending Coronary Arteries. Annals of Biomedical Engineering, Vol. 26, pp.190-199, 1998.
- [10] C.S. Lee, J. M. Tarbell: Influence of Vasoactive Drugs on Wall Shear Stress Distribution in the Abdominal Aortic Bifurcation: An in Vitro Study. Annals of Biomedical Engineering, Vol. 26, pp.200-212, 1998.
- [11] J.Kořenář, F. Klimeš: Experimental investigation of steady and pulsatory flow through a circular tube with axisymmetric sudden expansion and contraction. Engineering Mechanics, Vol.6, 1999, No.3, p. 147-158.