

## MĚŘENÍ PERIODICKÉHO PROUDĚNÍ METODOU TIME-RESOLVED PIV A LDA

### *Time-Resolved PIV and LDA Measurements of Pulsating Flow*

Jan Matěcha<sup>1</sup>, Jan Novotný<sup>1</sup>, Josef Adamec<sup>1</sup>, Bohuš Kysela<sup>2</sup> a Zdeněk Chára<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a energetiky, Praha

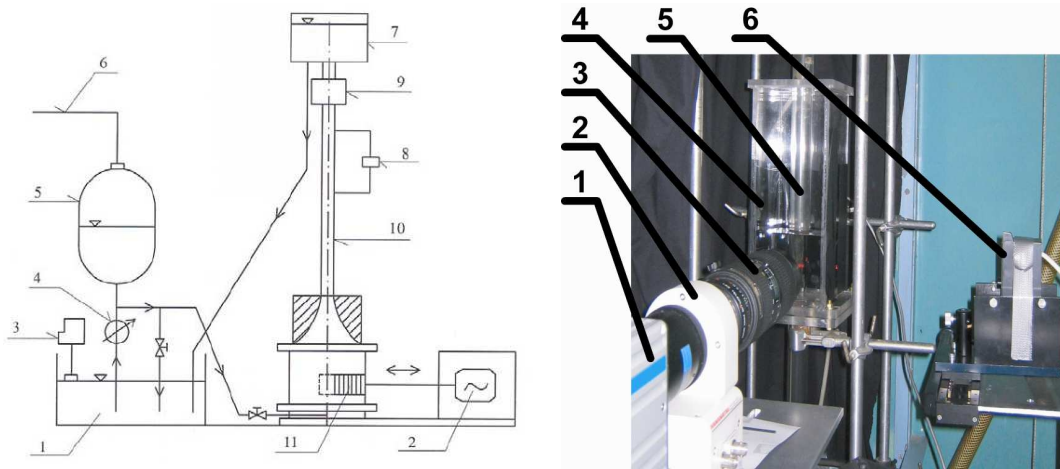
<sup>2</sup>Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i., Praha

### ÚVOD

V článku jsou prezentovány výsledky z měření pulzačního proudění v kruhové trubici konstantního průřezu metodou Time-Resolved Particle Image Velocimetry (TR-PIV) a Laser Doppler Anemometry (LDA). Jsou vyhodnoceny a porovnány proudové charakteristiky pro různé režimy pulzačního proudění.

### EXPERIMENT

Bylo provedeno měření rychlostního pole v kruhové trubici o poloměru  $R = 10$  mm. Pracovní kapalina byla voda. Pulzační proudění bylo generované experimentálním zařízením, které superponuje oscilační a stacionární složku proudění (obr. 1).



Obr 1. Vlevo: Schéma experimentální tratě. 1 - nádrž, 2 - sinusový mechanismus, 3 - hladinový spínač, 4 - čerpadlo, 5 - tlaková nádoba, 6 - přívod tlakového vzduchu, 7 - nádoba s přepadem, 8 - diferenční tlakový převodník Validyne, 9 - elektromagnetický průtokoměr, 10 - trubka s vnitřním průměrem 0.02 m vyrobená z plexiskla, 11 – vlnovec.

Převzato z [1]. Vpravo: Fotografie uspořádání experimentu při TR-PIV měření. 1. – kamera, 2 – vysokorychlostní zesilovač signálu, 3 - objektiv, 4 – nádoba s kapalinou, 5 – trubka, 6 – dioda.

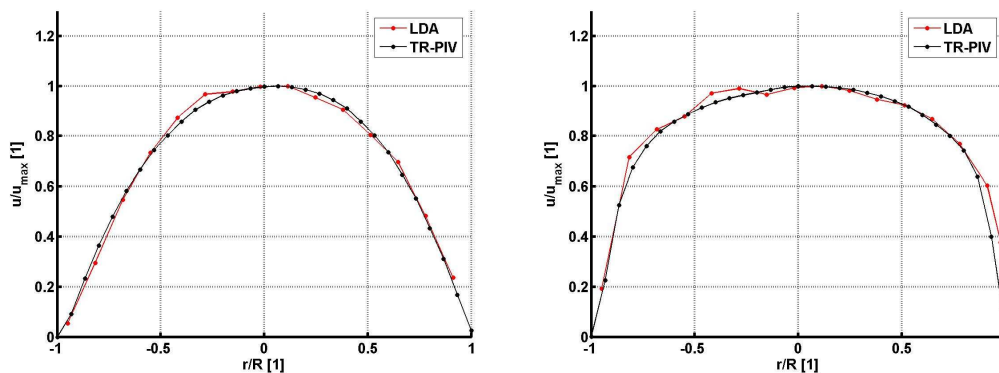
Parametry testovaných režimů proudění jsou shrnuty v následující tabulce.

<b>Stacionární proudění</b>
$Re_S = 1000, 2000, 3000$
<b>Pulzační proudění</b>
$Re_S = 1000, 2000$
$\alpha = R\sqrt{2\pi f} / \nu = 6.7 - 14.4$
$\lambda = Q_{Os} / Q_S = 0.4 - 3.7$

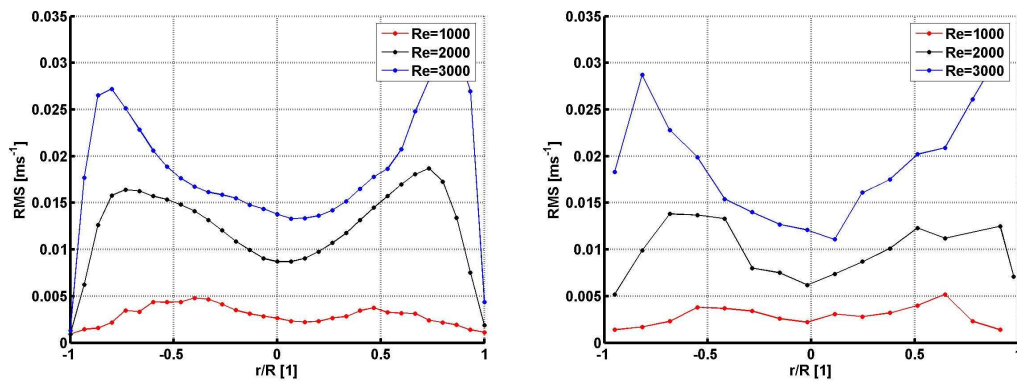
Parametr  $f$  je frekvence pulzací,  $\nu$  je kinematická viskozita kapaliny,  $Re_S$  je Reynoldsovo číslo vypočtené pro střední průtok  $Q_S$ .  $Q_{Os}$  je amplituda oscilační složky proudění.

Pro LDA měření byl použit systém sestávající z vláknové optiky Dantec s výstupní čočkou  $f=310$  mm, argonového laserového zdroje, vyhodnocovací jednotky BSA (Burst Signal Analyzer) fi. Dantec. Měření bylo prováděno v 15 bodech po průřezu s krokem 1.33 mm. V každém bodě byla načítána časová řada v minimální délce 25 period. Z naměřených dat byla pro každou pozici na poloměru vypočtena střední hodnota rychlosti a RMS ze všech měřených period.

Pro TR-PIV měření byla použita kamera NanoSense MkIII s čipem typu CMOS 1024x1200 pixelů, velikost RAM 4GB, vysokorychlostní zesilovač signálu HAMAMATSU C9548. Pro osvětlení měřicí roviny byla použita kontinuální dioda s vlnovou délkou 660 nm. Jako značkovací částice byly použity polyamidové částice o průměru 10  $\mu$ m. Byla měřena oblast v rovině symetrie kanálu o rozměru 22 mm x 4.5 mm, která byla zaznamenána na aktivní ploše čipu o velikosti 1016 x 208 pixelů. Použitá snímkovací frekvence byla v rozmezí 1000 až 2000 Hz v závislosti na měřeném režimu. Pro každý pulzační režim byla naměřena jedna perioda. Vyhodnocení snímků bylo provedeno v systému MATLAB použitím adaptivní korelace. Pro nalezení přesnější polohy signálového peaku byla použita tří bodová sub-pixelové interpolace. Velikost vyšetřované oblasti byla zvolena 128x32 pixelů a velikost překrývání 50%. Při stacionárním proudění byla vyhodnocena střední hodnota a RMS. Při pulzačním proudění byly vyhodnoceny okamžité rychlosti a střední hodnoty vypočtené pomocí klouzavého průměru pro jednu periodu.



Obr. 2 Stacionární proudění: Profily časově průměrované rychlosti naměřené LDA a TR-PIV. Hodnoty rychlosti jsou normovány maximální rychlostí. Vlevo  $Re=1000$ , vpravo  $Re=3000$ .

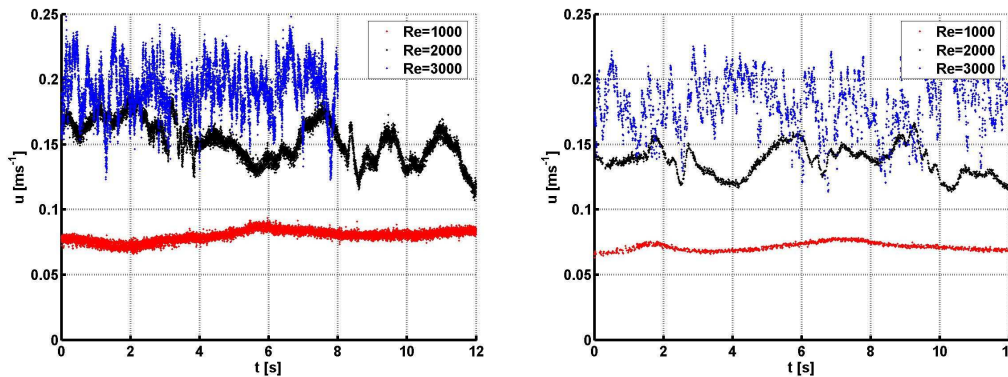


Obr. 3 Stacionární proudění: RMS časově průměrované rychlosti v závislosti na Re. Vlevo TR-PIV, vpravo LDA.

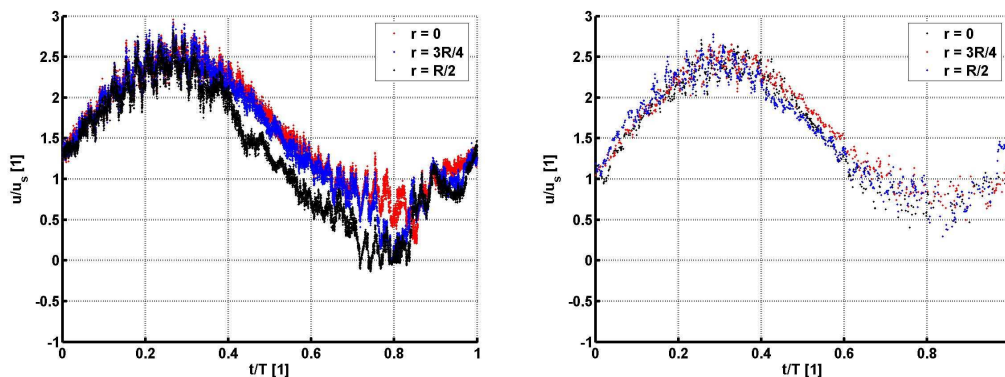
**VÝSLEDKY:**

Na obrázku 2 je porovnání časově průměrované rychlosti naměřené metodami LDA a TR-PIV. Je vidět, že tvar rychlostního profilu je velmi podobný. Rychlostní profil změřený metodou TR-PIV je mírně nesymetrický, což může být částečně způsobeno deformací optické cesty mezi měřenou rovinou a čipem kamery a částečně vlastní nesymetričností proudu, který není plně vyvinutý. Střední kvadratická odchylka z časově průměrované rychlosti v závislosti na Re je na obrázku 3. Hodnoty i charakter průběhu získaný z TR-PIV a LDA je podobný. Nejnižší hodnoty RMS jsou ve středu trubky ( $r = 0$ ) a na krajích trubky ( $r = R$ ). Mezi tím se nalézá maximum, které je pro  $Re = 1000$  přibližně v  $r = R/2$  a se zvyšujícím se Re se posouvá směrem ke kraji trubky (pro  $Re = 2000$  je v  $r = 3R/4$  a pro  $Re = 3000$  je v  $r = 5R/6$ ). Absolutní hodnoty RMS se zvětšují se zvyšujícím se Re.

Obr. 4 ukazuje časový průběh rychlostí měřený oběma metodami pro různé hodnoty Reynoldsova čísla při stacionárním režimu proudění v místě poloměru  $r = R/2$ . Pro vyšší hodnoty Re je výrazné zvýšení velikosti fluktuací rychlosti, což odpovídá hranici přechodu do turbulence. Vzhledem k tomu, že nebylo možné použít obě metody současně, jsou na obr. 4 ukázána vzájemně nezávislá měření. Mírné kolísání rychlosti je vidět i u časového průběhu rychlosti při  $Re = 1000$ , které je pravděpodobně způsobeno principem generování stacionárního toku stlačeným vzduchem, jehož systém je sám o sobě mírně nestacionární. U TR-PIV je patrná vyšší míra šumu, která se projevuje především pro  $Re=1000$  a  $2000$ .



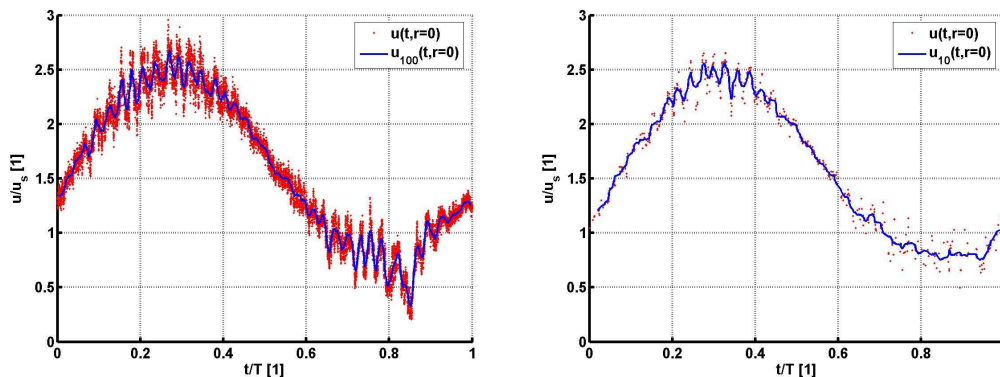
Obr. 4 Stacionární proudění: Průběh rychlosti v závislosti na čase v místě  $r = R/2$  pro  $Re = 1000, 2000, 3000$ . Vlevo TR-PIV, vpravo LDA.



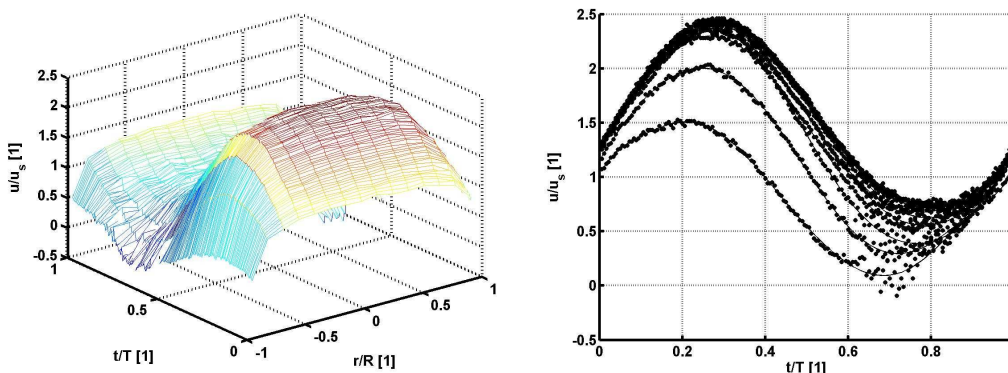
Obr. 5 Pulzační proudění: Průběh rychlosti v závislosti na čase v místě  $r = 0; 3R/4; R/2$  pro  $Re_s = 2000$ ,  $\alpha = 8.86$ ,  $\lambda = 0.7$ . Hodnoty rychlosti jsou normovány střední objemovou rychlostí stacionární složky toku. Vlevo TR-PIV, vpravo LDA.

Na obrázku 5 je průběh okamžitých hodnot rychlosti pro tři různá místa poloměru trubky při pulzačním proudění s parametry  $Re_s = 2000$ ,  $\alpha = 8.86$ ,  $\lambda = 0.7$  pro jednu periodu. Rychlostní průběhy získané metodou TR-PIV a LDA mají podobný charakter. V oblastech s nejvyšší a nejnižší rychlostí oscilační složky toku (nejrychlejší pohyb pístu kulisového mechanismu) se objevuje výrazné zvýšení fluktuací, v oblastech, kde se rychlost oscilační složky blíží nulové hodnotě (píst kulisového mechanismu je v úvrati), se fluktuace zmenšují. Data z TR-PIV jsou pro jeden okamžik periody měřeny ve stejný čas, data z LDA byly získávány postupně pro každou polohu poloměru. Rozdílný průběh rychlostí pro TR-PIV u LDA je dán jiným časem pořízení signálu, vzhledem k tomu, že nebylo technicky možné měřit oběmi metodami najednou. Na obrázku 6 je závislost rychlosti a klouzavého průměru rychlosti na čase v místě středu trubky. Klouzavý průměr je vypočten z 100 bodů pro data z TR-PIV a z 10 bodů pro data z LDA z důvodu různého časového intervalu mezi naměřenými daty z obou metod. Z průběhu klouzavého průměru rychlosti je vidět, že rychlost v oblastech s nejvyšší a nejnižší rychlostí oscilační složky toku kmitá kolem fázově střední hodnoty, což odpovídá průběhům průtoku změřeného elektromagnetickým průtokoměrem.

Střední hodnoty rychlosti vypočtené z dat získaných LDA z dvaceti period jsou na obrázku 7. Průběhy RMS rychlosti v závislosti na čase pro tři místa poloměru jsou na obrázku 8. V průbězích RMS jsou vidět dva vrcholy maximálních hodnot. První v okamžiku nejrychlejšího proudění (píst kulisového mechanismu je v poloze s



Obr. 6 Pulzační proudění: Průběh rychlosti  $u(t, r = 0)$  v závislosti na čase v místě  $r = 0$  pro  $Re_s = 2000$ ,  $\alpha = 8.86$ ,  $\lambda = 0.7$  a klouzavý průměr rychlosti vypočtený: vlevo ze 100 bodů  $u_{100}$  (TR-PIV) a vpravo z 10 bodů  $u_{10}$  (LDA).



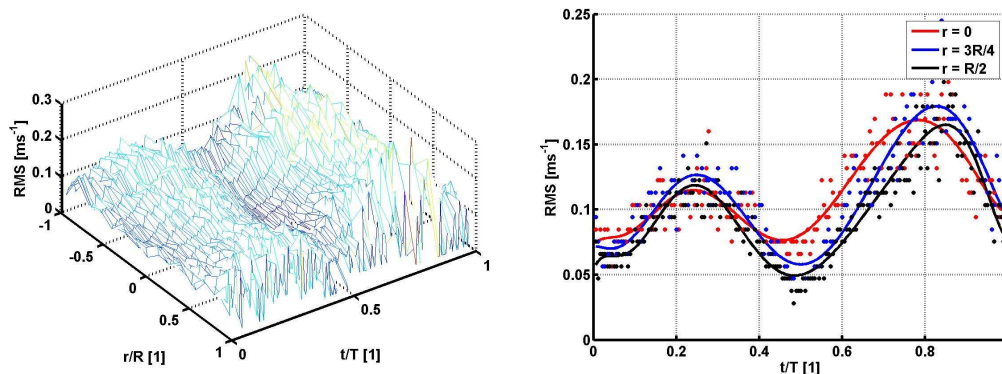
Obr. 7 Pulzační proudění: Průběh střední časové rychlosti v závislosti na čase pro  $Re_s = 2000$ ,  $\alpha = 8.86$ ,  $\lambda = 0.7$  získaný z LDA.

nejrychlejším pohybem). Poloha tohoto vrcholu je pro všechny místa poloměru přibližně stejná. Druhý vrchol je v oblasti za místem s nejnižší rychlostí pulzačního proudění. Píst kulísového mechanismu je v začátku zpomalování fáze, při pohybu jenž způsobuje zpomalování proudění. Poloha druhého vrcholu se mění v závislosti na poloměru. S větší vzdáleností od středu se vrchol objevuje později. Na obrázku 9 je klouzavý průměr rychlosti vypočtený ze 100 bodů získaný z jedné periody proudění změřené metodou TR-PIV. Lze vidět, že pro všechny místa poloměru dochází podobným způsobem ke kmitání kolem fázově střední hodnoty. V oblasti s minimální rychlostí dochází k výrazné nesymetrii rychlostních profilů, což odpovídá i zvýšení hodnot RMS získaných metodou LDA v této fázi cyklu.

### ZÁVĚR:

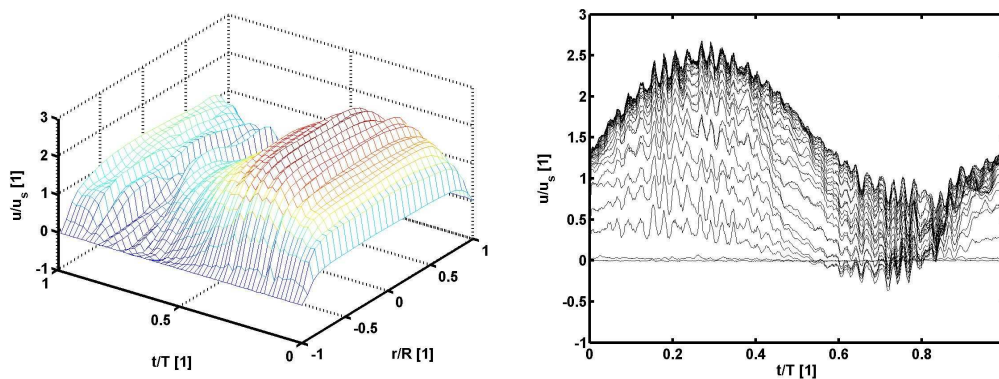
V článku jsou porovnány proudové charakteristiky pro stacionární a pulzační proudění v trubce konstantního průměru získané optickými metodami TR-PIV a LDA.

Metodou TR-PIV byla měřena časová posloupnost maximálně 16000 snímků vzhledem k současným možnostem experimentálního zařízení a příslušného ovládacího programu. Z dat získaných metodou TR-PIV byla získána časová závislost rychlostních profilů při pulzačním proudění pro jednu periodu. Metodou LDA byly získány časové řady rychlosti vždy pro jednu pozici na poloměru. Při pulzačním proudění bylo vyhodnocováno 20 period.



Obr. 8 Pulzační proudění: Průběh RMS rychlosti v závislosti na čase pro  $Re_s = 2000$ ,  $\alpha = 8.86$ ,  $\lambda = 0.7$  získaný z LDA.





Obr. 9 Pulzační proudění: Klouzávý průměr rychlosti  $u_{100}$  vypočtený ze 100 bodů získaný z jedné periody proudění změřené metodou TR-PIV pro  $Re_s = 2000$ ,  $\alpha = 8.86$ ,  $\lambda = 0.7$ .

Pro stacionární proudění byly vyhodnoceny časově střední hodnoty rychlosti, RMS a časové řady v závislosti na  $Re$  oběmi metodami. Pro pulzační proudění byly vyhodnoceny časové řady rychlosti, fázově střední rychlosti a jejich RMS z dat LDA měření, a průběh rychlostních profilů v závislosti na čase pro jednu periodu a klouzávý průměr těchto rychlostí z TR-PIV měření.

Z porovnání výsledků naměřených oběmi metodami vyplývá:

- Z porovnání výsledků hodnot vyhodnocených z naměřených dat metodami TR-PIV a LDA je vidět velmi dobrá shoda pro stacionární proudění. Porovnané rychlostní profily i průběhy fluktuací vykazují je nepatrné rozdíly (viz obr. 2. a 3.).
  - o Prezentovaná data z PIV měření vykazují vyšší úroveň šumu, kterou je možné odstranit použitím jiného algoritmu zpracování dat, což ale výrazně zvýší čas zpracování.
- Výsledky z měření nestacionárních režimů jsou a vyhodnocené rozdíly jsou dané odlišnou vzorkovací frekvencí, množstvím naměřených dat a způsobu jejich měření:
  - o metoda TR-PIV poskytuje kvalitnější data v blízkosti stěny,
  - o metoda TR-PIV v současné době umožňuje změřit pouze jednu periodu při daných parametrech proudění,
  - o při měření LDA je patrná závislost kvality získaných dat na množství částic přítomných v měřeném objemu, což se projevuje především při měření nízkých rychlostí
  - o v oblastech s malými rychlostmi se rychlost sběru dat u LDA měření pohybuje v řádu několika Hz, což výrazně prodlužuje dobu měření. Tento problém u metody TR-PIV nenastává a doba měření je nezávislá na rychlosti proudění.

### PODĚKOVÁNÍ:

Tento výzkum byl podporován grantem GA ČR 101/05/0675 *Teoretická a experimentální optimalizace cévních rekonstrukcí a hlediska hemodynamiky*.

### LITERATURA

- [1] Chára, Z., Hoření, B. (2007) NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PULSATING FLOW, Inženýrská mechanika 2007, Svratka, ČR, 14.-17.5.2007, 101-102, full text CD, ISBN 978-80-87012-06-2.