

Měření proudového pole v pružných modelech

Jan Kolínský

Abstract

Príspevek se zabývá měřením 2D rychlostního pole v pružném modelu válcové trubice. Ze základního principu PIV vyplývají nároky na samotné modely i celou měřicí trať, která je stručně popsána. Dále je popsána metoda výroby modelů, postup měření a zpracování snímků metodou PIV. Poster ukazuje hlavní rozdíly mezi měřením v modelech s tuhou stěnou a pružných modelech.

1. Úvod

V současné době se často využívá k proměřování proudového pole optických metod. Jejich výhodou je, že přímo nezasahují do proudového pole žádnými sondami, které by proudění ovlivňovali. Další výhodou je současný sběr dat z celých oblastí proudu, nejde tedy pouze o měření v jednotlivých bodech, jak je tomu například při konvenčních odběrech tlaku. V současné praxi se optické metody uplatňují jak ve vnější tak ve vnitřní aerodynamice. V obou případech je však nejčastěji používáno modelů dokonale tuhých, pevná geometrie umožňuje nejen snazší sestavení celého experimentu, ale také se týká vyhodnocování naměřených dat.

Jednou z těchto metod je i metoda PIV, kterou jsem využil při měření. Mým záměrem bylo vytvořit metodiku a uskutečnit měření metodou PIV v pružných modelech. Postup byl provázen nejrůznějšími úskalími od samotné výroby modelů až po vyhodnocení jednotlivých snímků. Přesto se mi podařilo uskutečnit ověřovací měření v několika modelech s průkaznými výsledky.

2. Motivace

V odborné literatuře se často diskutuje vliv pružné stěny na proudové charakteristiky uvnitř kanálu. Je zřejmé že určitá zanedbatelná pružnost výrazně neovlivní chování trubice a tedy ani nezmění geometrii a ani výrazně neovlivní pole rychlostí a smykového napětí. Naopak velmi pružné kanály měnící svoji geometrii při působení tlaku zásadně ovlivňují proudové charakteristiky. Z hlediska hemodynamiky, proudění krve cévním systémem, dochází v lidském těle k proudění za nejrůznějších režimů. Mění se nejen průměry cév od aorty až po kapiláry, ale také proudové vlastnosti jako jsou průtok a tlak. Stejně tak i vliv pružnosti cév na proudění krve je v různých částech těla nesterilní.

Standardním postupem je srovnávání teoretických předpokladů s experimenty, což je často prováděno pro dokonale tuhé geometrie modelů. Avšak matematické modely pro proudění v jednoduchých geometriích, které obsahují také určitý model pružnosti stěny zatím nemají odpovídající protějšek na poli experimentů. Právě tento nedostatek mne motivoval k sestavení takového experimentu.

3. Metoda PIV

Particle Image Velocimetry, neboli zkráceně PIV, je měřicí metoda fungující na poměrně jednoduchém principu. Tok částic unášených tekutinou je vyfocen digitální kamerou ve dvou okamžicích bezprostředně jdoucích za sebou. Vzhledem k tomu, že se tyto částice za dobu mezi těmito snímky posunou, známe-li časový interval mezi snímky a vzdálenost posunutí, můžeme vypočítat, jak rychle se tyto částice pohybují. Výsledné rychlosti proudění získané z

takovéto dvojice snímků jsou polem okamžitých rychlostí v oblasti zachycené kamerou. Při použití jedné kamery provádíme měření vždy v jedné rovině a výsledkem je tedy pole složek rychlostí v této rovině.

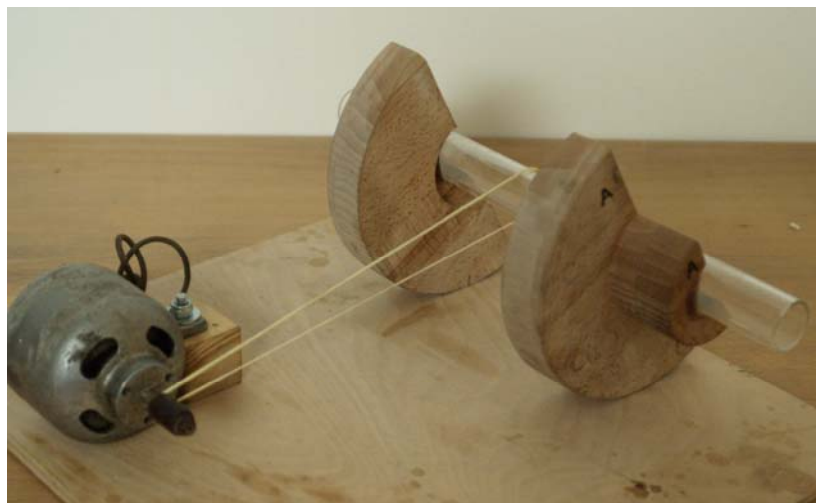
Reálný postup při používání metody PIV se skládá ze dvou hlavních částí; snímání digitálních fotografií a samotného vyhodnocení získaných snímků. Před snímáním fotografií je nutné sestavit celý experiment tak, aby bylo možné získat dostatečně kvalitní signál pro vyhodnocení. Další popis tedy rozdělím celkem na tři části; sestavení experimentu, měření a vyhodnocení.

4. Sestavení experimentu

Experiment měření v pružném modelu se skládá z celé experimentální tratě a dále konkrétně ze samotného modelu, ve kterém proudění proměříme. Model můžeme považovat za měřicí prostor a zbytek tratě za aparaturu, která nám pro měřicí prostor poskytuje patřičné okrajové podmínky.

4.1 Modely

Pro použití metody PIV je zapotřebí, aby modely byly průhledné. Z motivace vyplývá, že jsem se zabíral výrobou pružných modelů. Z různých metod výroby pružných modelů se zabývám výrobou modelů z estanu. Jde o polymer, který lze rozpustit v běžně dostupných rozpouštědlech. Výhodou výroby estanových modelů je jejich relativní technologická nenáročnost oproti například silikonovým modelům, jejichž vulkanizace probíhá za zvýšené teploty. Estan je látka, která po odpaření rozpouštědla i za běžných podmínek dosáhne stejných vlastností, jaké má před rozpuštěním. Směs rozpuštěného estanu se obvykle nanáší na vnitřní stěnu skleněného modelu, po které se nechá roztéci do tenké vrstvy. V případě vhodného odvětrání vnitřního prostoru dojde k odpaření rozpouštědla a na stěně ulpí tenká vrstvička estanu. Tato fáze výroby nejvíce ovlivní výsledný model, největší nárok je zde kladen na rovnoměrné rozlití rozpuštěného estanu po stěnách kopyta a to po celou dobu tuhnutí. Kopyto je proto vhodné upnout do rotačního zařízení, které umožní nepřetržitý pohyb podle všech potřebných os otáčení. Proces nanášení tenké vrstvičky estanu lze opakovat a tak volit tloušťku stěny vznikajícího modelu. Nároky na „kopyto“, do kterého se takto estanový model odlévá se tak redukují na resistenci ke zvolenému rozpouštědлу. Poslední fází výroby estanového modelu je jeho vyjmutí z kopyta.



Obr. 1 Přípravek pro rotaci skleněné trubice

Pro samotné měření jsem vyrobil několik trubic, představujících kanály kruhového průřezu s pružnou stěnou, vyrobené modely měly délku 300 mm a průměr 20 mm. Pro výrobu těchto válcových modelů jsem vyrobil upínací přípravek, umožňující rotaci skleněného válce, ve které jsem tyto modely odléval. Přípravek se skládá ze dvou čelistí, do kterých se vkládá samotné kopyto (skleněná trubice), poté se kopyto spojí řemenem s elektromotorem a ten zajišťuje rovnoměrné otáčky po dobu vysychání rozpouštědla.

Z matematického rozboru problému vyplývá, že nejdůležitější mechanickou vlastností modelu je jeho Youngův modul pružnosti. Ve všech mnou uvažovaných rovnicích se objevuje Youngův modul pružnosti v součinu s tloušťkou stěny. Moje zkušenost mi potvrdila, že je výhodné uvažovat tento součin jako samostatnou vlastnost modelu.

Vzhledem k tomu, že se nepodaří vždy vyrobit model jmenovité tloušťky stěny, a měření tloušťky není příliš přesné, každý z používaných modelů jsem podrobil samostatné zkoušce, která vedla právě k určení součinu Eh .

K deformaci stěny trubice dochází vlivem tlaku, pro změnu poloměru platí

$$\Delta a = \left(\frac{a \cdot a_0}{Eh} \cdot p \right) \quad (1)$$

Tohoto vztahu jsem využil při zkoušení jednotlivých modelů tak, že jsem model připevnil na spodní konec svislé trubice z plexiskla a postupným naléváním vody do trubice tak vytvářel odpovídající tlak v testovaném modelu. Odečítal jsem výšku vodního sloupce a průměr modelu.

V poměrně velkém rozsahu měla tato závislost lineární charakter a tak nebyl problém určit součin Eh ze vztahu (2) odvozeno z (1)

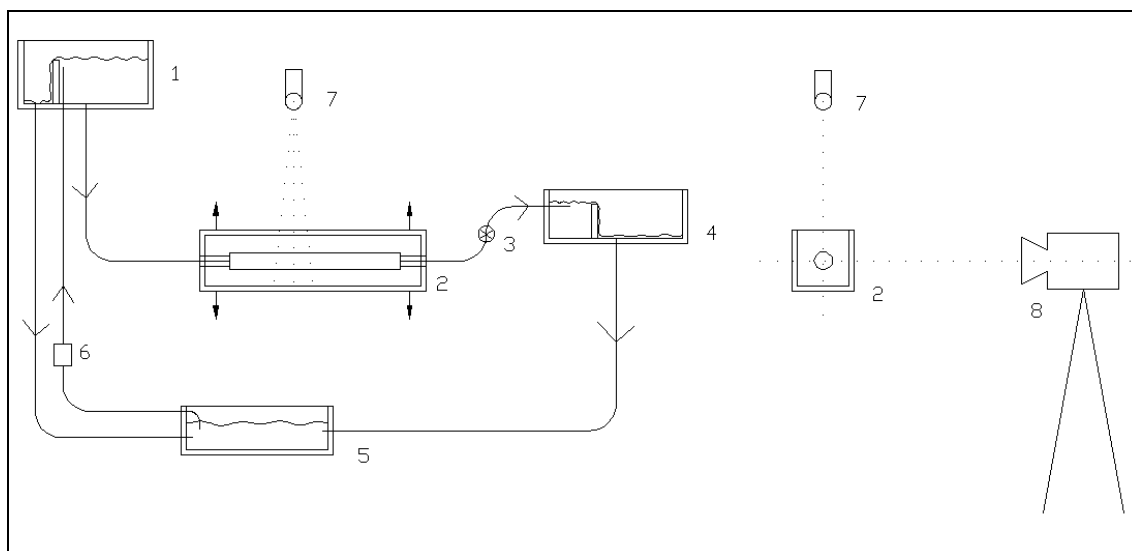
$$Eh = \left(\frac{a \cdot a_0}{\Delta a} \cdot p \right) \quad (2)$$

Mikrometrem lze pak také určit samotnou tloušťku stěny. Vydělením součinu Eh tloušťkou stěny dostaneme i samotný Youngův modul pružnosti, ale jak jsem již zmínil dříve, v samotných výpočtech bude stejně vždy vystupovat v součinu s tloušťkou stěny.

Youngův modul pružnosti mi tak opakovaně vyšel v jednotkách MPa. Největším problémem je pak samotné měření tloušťky stěny mikrometrem, které je vzhledem k poddajnosti estanu zatíženo velkou chybou.

4.2 Experimentální trať

Pro měření metodou PIV v pružné trubici jsem navrhl měřící trať sestavenou podle následujícího schématu



Obr. 2 Schéma tratě: 1 - výtoková nádoba; 2 - měřicí nádoba; 3 - škrťací člen; 4 - koncová nádoba; 5 - rezervoár; 6 - čerpadlo; 7 – dioda; 8 – kamera;

Měřicí trať by měla splňovat požadavky na rovnoměrný tok elastickým členem. Za tímto účelem je koncipována tak, aby mezi vtokem a výtokem byl zachován stálý tlakový spád a průtok tak mohl být regulován pouze škrcením výstupního kanálu za měřicí nádobou.

Výtoková nádoba (1) je opatřena přepadem tak, aby byla neustále zachována výška hladiny určující tlakový spád soustavy. Odtud proudí kapalina do měřicí nádoby (2), cestou se proudění vzhledem k relativně malému průměru a velké délce trubice dobře vyvine. V měřicí nádobě je na dvou protilehlých trnech ustaven elastický člen, kterým kapalina protéká. Měřicí nádoba je koncipována tak, aby bylo možné celý elastický člen zatopit a tím zajistit jeho podporu kapalinou stejné hustoty, jako je hustota kapaliny proudící. Tímto lze dostatečně eliminovat deformaci elastického členu od gravitačních účinků působících na proudící kapalinu. Do budoucna počítám s upravením měřicí nádoby tak, aby v ní bylo možno libovolně nastavovat tlak kapaliny vně elastického členu a tím sledovat vliv transmurního tlaku na proudění elastickou trubicí. Za elastickým členem je v měřicí trati ustaven škrťací člen, jehož úkolem je regulace průtoku celou soustavou. Za tímto členem je koncová nádoba (4) opět opatřena přepadem pro udržení konstantní hladiny. Za přepadem této nádoby je kapalina sváděna do rezervoáru (5), kam je též sveden přepad z výtokové nádoby. Z rezervoáru je pak kapalina čerpána čerpadlem (6) zpět do výtokové nádoby.

Měřicí nádoba (2) je umístěna na polohovatelném držáku, který umožňuje jeho vertikální pohyb, tímto způsobem je možné měnit hodnotu celkového tlaku uvnitř trubice v měřicí nádobě a to nezávisle na celkovém tlakovém spádu soustavy.

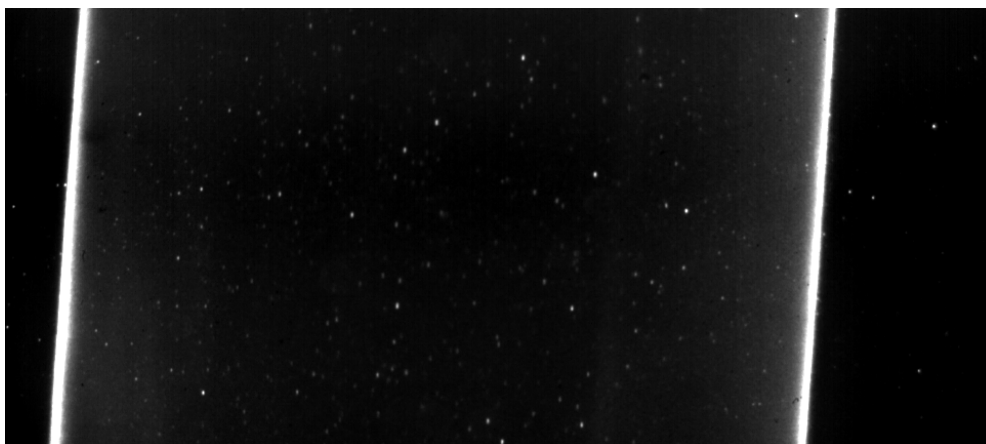
Tato měřicí trať se poměrně dobře osvědčila pro simulaci stacionárního toku, měřicí nádoba (2) byla navržena tak, aby ji bylo možné i s elastickým členem vložit do tratě pro pulzační proudění, která je součástí naší laboratoře. V této trati jsem provedl měření pro sinusový průběh objemového toku, dosažený klikovým mechanismem.

5. Měření

Pro získání samotných snímků jsem použil osvětlení diodou s vlnovou délkou 650 nm, jejíž bodový paprsek jsem rozptýlil pomocí válcové čočky do rovinného světelného nože. Ke snímání obrázků jsem použil kameru NanoSense MkIII 4GB od firmy Dantec Dynamics.

Provedl jsem několik pokusů o dosažení co nejlepších výsledků a to především v oblastech blízkých stěn. Zde se projevil nežádoucí efekt odlesku na stěně při průchodu světelného paprsku.

Další problémem je zachycování drobných bublinek plynu a částic na stěně trubice. Tyto bublinky a částice, které nemění svou polohu, lze při výpočtech metodou PIV odfiltrout, při zpracování se však chovají jako šum a zhoršují poměr signálu a šumu a tím nepříznivě ovlivňují i celkovou kvalitu výsledků.



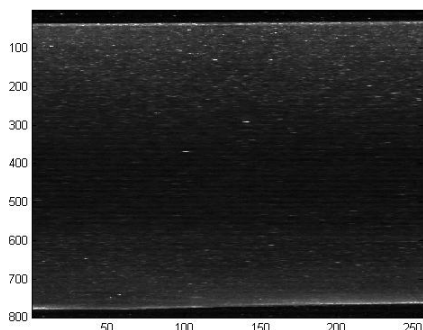
Obr. 3 Snímek pořízený během stacionárního proudění

Z metody zpracování snímků lze uvažovat, že nejvhodnější velikost částic na snímcích je přibližně 2 - 3 pixely a dráha jejich posunutí mezi jednotlivými snímky je vhodná přibližně 5 - 20 pixelů. Částice by měli mít na snímcích kruhový tvar. Podle těchto požadavků je třeba volit dobu expozice a frekvenci snímání fotografií.

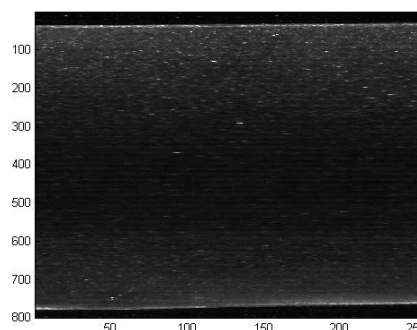
6. Vyhodnocení

Vyhodnocení nasnímaných obrázků by mělo vést k získání vektorů rychlostí. Nejprve se provádí výpočet posunutí v pixelech, poté se tento výsledek násobí měřítkem m/pixel a poté ještě časovým měřítkem vyplývajícím z frekvence snímání. Celou proceduru lze provádět ve speciálních komerčně distribuovaných programech, nebo ji lze naprogramovat například v programu Matlab.

Základním vstupním signálem pro vyhodnocení je dvojice snímků (snímek A a B).

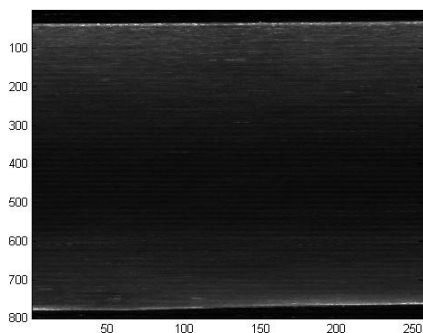


Obr.4 Snímek A

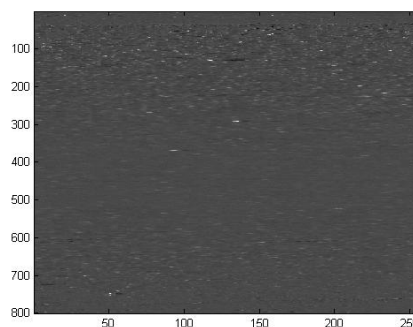


Obr. 5 Snímek B

Vzhledem k tomu, že máme k dispozici i další snímky z této série, můžeme provést filtraci obrázků pomocí odečtení pozadí. Samotné pozadí získáme jako průměrnou hodnotu ze všech snímků této série a toto pozadí odečteme od obou původně vyšetřovaných snímků.

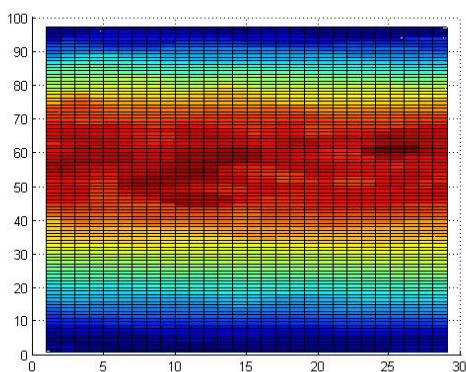


Obr. 6 Pozadí

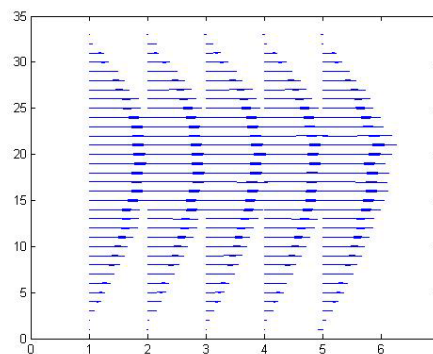


Obr. 7 Snímek A po odečtení pozadí

Tím získáme snímky, které podrobíme PIV analýze. Výsledná pole vektorů posunutí můžeme dále filtrovat a různě zobrazovat. Pro ukázkou je zde provedeno vykreslení vybraných vektorů posunutí šipkami a barevná mapa absolutních velikostí posunutí.



Obr. 8 Absolutní velikost posunutí



Obr. 9 Vybrané vektory posunutí

7. Závěr

Pro stacionární režimy proudění jsem schopen nasnímat a vyhodnotit proudové pole v modelech s pružnou stěnou. Pro nestacionární režimy je vyhodnocování podstatně komplikovanější, ale metoda PIV je i zde schopna poskytnout informace nejen o proudovém, ale lze zároveň vyhodnotit změnu poloměru trubice a tím v podstatě i průběh tlaku. Programování vyhodnocení signálu PIV v trubici s proměnnou geometrií zatím nemám zcela zvládnuté, ale je jistě možné.

Dle matematických modelů se proudové pole liší v tuhé a pružné trubici především v oblastech blízkých stěn, které se v případě pružných trubíc při nestacionárním proudění pohybují. Bohužel právě u stěn lze očekávat zhoršenou kvalitu PIV signálu vlivem odlesku stěny.

Rozhodně mohu konstatovat, že metodou PIV lze v takovýchto modelech měřit a že lze pozorovat změnu geometrie. Takto provedené měření dává především v případech nestacionárního proudění velmi komplexní pohled na zásadní jevy ovlivňující proudění.