

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zmapování proudového pole kapaliny proudící v trubici pomocí
laserové anemometrie (metodou PIV)

Autor: **Petr KLAVÍK**
Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk JŮZA, Ph.D., MBA**
Odborný konzultant: **Ing. Michal DOSTÁL**

Akademický rok 2014/2015

Zadání BP

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Zdeňku Jůzovi, Ph.D., MBA za ochotu, cenné rady a odborné vedení. Také bych rád poděkoval panu Ing. Michalu Dostálovi z firmy Škoda JS, a.s. za věcné připomínky, vstřícnost při konzultacích a rady při zpracování této práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Klavík	Jméno Petr
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“	
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Jůza, Ph.D., MBA	Jméno Zdeněk
PRACOVNÍŠTĚ	ZČU - FST - KKE	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ
NÁZEV PRÁCE	Zmapování proudového pole kapaliny proudící v trubici pomocí laserové anemometrie (metodou PIV)	

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	56	TEXTOVÁ ČÁST	53	GRAFICKÁ ČÁST	3
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX. 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce se zabývá zmapováním proudového pole kapaliny proudící v trubici pomocí laserové anemometrie. Nejprve teoreticky popisuje systém metody PIV, a následně se zabývá návrhem, výrobou a sestavením samotného experimentálního zařízení. Závěrem celé práce je hodnocení a porovnání výsledků, zjištěných měření, s numerickou simulací. Předpokladem celé práce byla využitelnost daných poznatků v praxi.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	metoda PIV, anemometrie, rychlostní pole, Reynoldsovo číslo, experiment, objemový průtok, rychlostní profil, CFD

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Klavík	Name Petr
FIELD OF STUDY	2301R016 „Design of Power Machines and Equipment“	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Jůza, Ph.D., MBA	Name Zdeněk
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR
TITLE OF THE WORK	Mapping of fluid flow field in the tube by the laser anemometry (PIV method)	

FACULTY	Faculty of Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Department of Power System Engineering	SUBMITTED IN	2015
----------------	-----------------------------------	-------------------	--	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	56	TEXT PART	53	GRAPHICAL PART	3
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This bachelor thesis deals with mapping of the fluid flow field in the tube using the laser anemometry. This thesis first theoretically describes the PIV method system, and consequently it deals with the design, development and assembly of the experimental device. The conclusion of this thesis is the evaluation and comparison of the results detected by measuring with the numerical simulation. The assumption of the whole thesis was to efficiently apply the given knowledge in practice.
KEY WORDS	PIV method, anemometry, velocity field, Reynolds number, experiment, volume flow, velocity profile, CFD

Obsah

Seznam použitých veličin.....	10
1 Úvod.....	11
2 Metoda PIV.....	12
Vývoj laserové anemometrie.....	12
Základní princip metody.....	12
2.1 Měření.....	13
2.1.1 Částice pro sycení proudu.....	14
2.1.2 Kamerový systém.....	15
2.1.3 Laser a optika.....	17
2.1.4 Synchronizér.....	20
2.2 Vyhodnocení naměřených dat.....	20
2.2.1 Vzájemná korelace.....	22
2.2.2 Autokorelace.....	24
2.2.3 Metoda dvojnásobné Fourierovy transformace.....	26
2.2.4 Metoda Wienerova-Chinčinova teorému.....	26
2.3 Metody pro vyhodnocení naměřených dat.....	27
2.3.1 Optické metody vyhodnocení PIV záznamů.....	27
2.3.2 Numerické metody vyhodnocení PIV záznamů.....	27
2.3.3 Limity PIV metody.....	30
2.4 Stereoscopic.....	33
3 Postavení měřicí trati.....	34
3.1 Návrh trati.....	34
3.2 Realizace trati.....	41
4 Měření.....	42
4.1 Příprava měření.....	42
4.1.1 Ověření funkčnosti měřicí trati.....	42
4.1.2 Nastavení komponent PIV.....	43
4.1.3 Sycení kapaliny.....	43
4.1.4 Demonstrační měření.....	43
4.2 Měření.....	44
4.3 Vyhodnocení naměřených dat.....	45
4.4 Chyba měření.....	46
4.5 Výsledky.....	46
5 Porovnání výsledků experimentu s CFD.....	50

6	Závěr	53
	Použitá literatura.....	54
	Seznam tabulek.....	55
	Seznam obrázků.....	55

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

Značka veličiny	Jednotka veličiny	Název veličiny
a	[m]	Délka
b	[m]	Délka
h	[m]	Délka
D	[m]	Průměr
S	[m ²]	Obsah
w	[m/s]	Rychlost
w_s	[m/s]	Střední rychlost
t	[s]	Čas
T	[°C]	Teplota
ρ	[kg/m ³]	Hustota
V	[m ³]	Objem
Qv	[m ³ /s]	Objemový průtok
ν	[m ² /s]	Kinematická viskozita
Re	[–]	Reynoldsovo číslo

1 ÚVOD

Již v historii se experiment využíval k ověření různých teorií, a proto byl v minulosti právě experiment jediným možným prostředkem k ověření teorie proudění tekutin. V dnešní době díky rozvoji výpočetní techniky slouží experiment především k ověření numerických simulací. I přesto existují případy, kde se stává experiment nenahraditelným. Experiment dává lepší představu o dějících se procesech než numerické simulace.

Tato bakalářská práce se zabývá zmapováním proudového pole tekutiny proudící v trubici a stanovení rychlostního profilu proudícího média na sestaveném experimentálním zařízení pomocí metody PIV. Cílem práce je také porovnání dvou rozdílných metod zjištění rychlostního pole, experimentální metody PIV a numerické simulace provedené v softwaru Ansys Fluent.

Bakalářská práce se dělí na teoretickou a praktickou část. V první části práce je zpracována teorie experimentální metody PIV. Následující kapitoly se zabývají postavením měřicí tratě, měřením a porovnáním výsledků experimentu s numerickými výpočty.

Návrh experimentálního zařízení není zaměřen pouze na zadanou úlohu, ale bude zamýšlen i pro další využití. Práce slouží k získání nových poznatků týkajících se metody PIV a také oblasti týkající se návrhu, výroby a sestavení experimentálního zařízení. Tyto poznatky lze následně použít při řešení konkrétních problémů v praxi.

2 METODA PIV

Vývoj laserové anemometrie

Anemometrie vychází z řeckého slova „anemos“, které znamená vítr. Jedná se o vědní obor, který zkoumá proudění v tekutinách. Například se jedná o měření rychlosti, tlaku proudění nebo detekování směru proudění. Anemometrickými metodami se rozumí metody měření parametrů proudění tekutin (rychlosti, tlaku, směru, ...) za použití rozličných měřicích přístrojů a zařízení, využívající nejrůznější fyzikální principy. Mezi tyto přístroje patří například čistě mechanické miskové anemometry známé z meteorologických stanic, termoanemometrické sondy, nebo optické metody využívající podstatně složitější principy (PIV, LDA, ...). Tyto optické metody označujeme jako bezkontaktní. Jejich hlavní výhodou je, že do cesty měřeného proudu nekládají žádné měřicí přístroje a neovlivňují průběh měření. Proto se snažíme nekládat do proudu žádné přístroje. Tyto metody jsou vesměs založeny na technologii laseru jako monochromatického zdroje světla, který slouží k pozorování zkoumané oblasti. Tyto metody používají sofistikované optické zařízení v některých případech spojené s vyhodnocovacím softwarem. [7]

Po roce 2000 vyústil vývoj velmi efektivní metody druhu laserové anemometrie, která je v odborné literatuře označována zkratkou PIV - Particle Image Velocimetry. Na rozdíl od laserové dopplerovské anemometrie, která měří rychlost pouze v jednom daném bodě, metoda PIV umožňuje změřit komplikovaná pole v definované rovině měřeného prostoru. Navíc tato technika zaznamenává vývoj v čase a s velmi výkonnou technikou vyhodnocuje zaznamenaná data. Tato metoda má tak velmi dobré předpoklady k použití pro experimentální studium nestacionárních polí. [6]

Základní princip metody

Základní princip této metody je založen na zaznamenání posunutí malých částic, které jsou unášeny proudem tekutiny, a na následném vyhodnocení tohoto posunu v čase. Metoda PIV využívá jako zdroj světla laser. Pomocí laseru a optiky se vytvoří světelný list, který ve sledované oblasti proudového pole osvítlí stopovací částice minimálně dvěma krátkými vygenerovanými laserovými pulsy s časovým odstupem. Polohy osvětlených stopovacích částic jsou zaznamenány pomocí snímacího zařízení, a to na fotografický film, nebo CCD kamerou. Snímací zařízení snímá kolmo osvětlenou oblast proudového pole. Vyhodnocení získaných snímků je založeno na elementární rovnici:

$$rychlost = \frac{vzdálenost}{čas},$$

kde vzdálenost vyjadřuje posun stopovacích částic unášených proudící tekutinou za čas. Výsledkem je, že lze určit směr a rychlost pohybu. Výstup je 2D obraz s polem vektorů. Schéma metody PIV je zobrazeno na obrázku 1. Pro získání 3D obrazu je zapotřebí dvou snímajících zařízení. [6], [7]

2.1.1 Částice pro sycení proudu

Seeding neboli částice. Metoda PIV neměří rychlost proudu (médiu), ale rychlost sytících částic, které jsou unášeny proudem tekutiny. Proto je nutné zabývat se vlastnostmi sycení, které ovlivňují výsledky měření. Stopovací částice mají zásadní vliv na přesnost výsledků měření, neboť jsou zachyceny na snímku a dále jsou počítány jejich rychlosti. Můžeme na ně nahlížet jako na rychlostní sondy.

Částice musí mít dostatečnou velikost, což je hlavní důvod, aby přesně monitorovaly proud tekutiny, musí být co nejmenší, aby spolehlivě mohly sledovat malé turbulence struktury proudu, avšak naopak zase nesmí být moc malé, aby jejich rozptyl světla zachytila snímací technika. PIV metoda požaduje vysoké nároky na intenzitu osvětlení stopovacích částic i na jejich hustotu sycení. Metoda PIV měří a vyhodnocuje celou oblast tenkého světelného řezu vytvořeného pomocí usměrněného laserového paprsku. V celé této oblasti musí být vysoká intenzita světla. Rovina světelného řezu je snímána v kolmém směru. Malé částice, které se používají, rozptylují nejvíce světla v dopředném směru, tj. ve směru zdroje světla. Nejméně světla je rozptýleno do stran. Proto je zapotřebí větší intenzity světla. Rozptyl světla v rovině kolmé na světelný řez je detekován CCD kamerou. Pro vyšší kvalitu zachyceného obrazu je důležité, aby sycení částicemi bylo rovnoměrné a hustota sytících částic byla vyšší. Naopak rozdíl velikosti částic co nejmenší, protože jejich rozdílná plocha by způsobila, že unášené částice v proudu kapaliny by měly rozdílné rychlosti.

Částice by měly mít podobnou hustotu, jako médium, ve kterém jsou rozptýleny, protože by se mohly shlukovat, nebo by nebyly dokonale rozptýleny. [1]

Hlavní požadavky:

- Spolehlivě sledovat tok
- Dobrý rozptyl světla
- Cena
- Neinteragující s použitým médiem
- Neabrazivní

Tabulka 1 Stopovací částice používané při proudění plynů. [8]

Materiál	Průměr částice [μm]	Komentář
Al_2O_3	< 8	Používá se pro značkování plamenů.
Glycerin	0.1 –5	Běžně používané. Velmi dobrý rozptyl světla.
Silikonový olej	1 –3	Má velmi uspokojivé vlastnosti.
TiO_2 prach	0.1 –10	Dobrý rozptyl světla a stabilita při teplotách nad 2500 °C. Pro PIV se moc nehodí.
SiO_2 částice	1 –5	Kulovité částice s velmi úzkým distribučním pásmem. Lepší rozptyl světla než TiO_2 , ale horší než glycerin.
Voda	1 –2	Běžně používané.

Tabulka 2 Stopovací částice používané při proudění kapalin. [8]

Materiál	Průměr částice [μm]	Komentář
Al prach	< 10	Běžně používané.
Bublinky	5 –500	Mohou být použity jen jestliže lze akceptovat dvě fáze v proudící kapalině.
Skleněné kuličky	10 –150	Levné i při velkých rozměrech, ale mají velký rozptyl ve velikostech částic.
Latexové kapky	0.5 –90	Drahé, ale mají velmi dobré vlastnosti.
Mléko	0.3 –3	Levné, ale používá se pouze v malých oblastech.
Borovicové piliny	30 –50	Kulovitý tvar, používá se pro sledování velkých oblastí. Nevýhoda je, že bobtnají.

2.1.2 Kamerový systém

Pro záznam obrazu v PIV technice mohou být polohy stopovacích částic zaznamenány CCD detektorem kamery nebo na snímek pomocí fotoaparátu. Zaznamenání polohy stopovacích částic na snímek pomocí fotoaparátu má své výhody. Fotoaparát dokáže zaznamenat větší hustotu sytících částic, a to až 1.1×10^9 pixelů, protože rozlišení filmu je 300 řádků/mm při rozměrech pole 100 mm x 125 mm. I přes tuto značnou výhodu se dnes tento způsob zaznamenávání nepoužívá, protože převod do digitální podoby je velice zdoluhavý. Tento proces zahrnuje nejprve přetočení filmu ve fotoaparátu, poté vyvolávání filmu a následná digitalizace vyvolaných snímků pro numerické zpracování. Tento zdoluhavý proces je vhodný spíše pro autokorelaci (metoda dvojnásobné expozice), protože počáteční i koncovou polohu stopovací částice zaznamenáme na jeden snímek a ztratíme tak informaci o směru proudění. Možné je též stejným způsobem použít filmovou kameru, která je ale dražší. S nástupem digitálních fotoaparátů a kamer došlo ke zkrácení a ulehčení procesu zpracování snímků. Poskytnutý obraz je přímo v digitální formě pro numerické zpracování. První digitální přístroje neumožnily v krátkém intervalu několik mikrosekund zaznamenat dva snímky po sobě. I nadále zůstal problém s měřením zpětného proudění. [1],[6],[8]

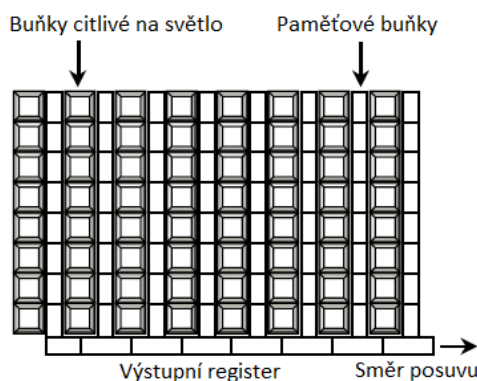
Řešení tohoto problému přinesl až nástup cross-korelační (CCD) kamery. Tyto kamery dovedou v intervalu menším než jedna mikrosekunda zaznamenat a uložit dva snímky po sobě. Tato data poskytují důležité informace o vývoji měřeného proudu v čase. Při použití moderní výpočetní techniky lze on-line zpracovávat získaná data a na obrazovce monitoru sledovat animovaný časový vývoj vektorového pole. I přes tyto výhody CCD kamery mají menší hustotu záznamu. Současné kamery mají maximální rozlišení 2048 x 2048 pixelů, to je přibližně 4.2×10^6 pixelů.

Kamery v metodě PIV slouží k zachycení počátečních a koncových poloh stopovacích částic unášených proudem. Z těchto poloh se určují vektory posunutí. Kamera je při měření umístěna tak, že její osa objektivu svírá s laserovým řezem pravý úhel. Toto platí pouze u konvenční metody 2D vektorového pole. Kamera snímá rozptýlené světlo od stopovacích částic (viz. 2.1.1 Částice pro sycení proudu), které se jeví jako světlé skvrny na tmavém pozadí. [6]

Digitální kamery

Při volbě vhodné kamery je na výběr z několika typů. Starší typy mají rozměry pixelů totožné s jejich roztečí, tzn., mají celorámovou konstrukci čipu. Toto provedení je pouze pro autokorelační analýzu. Výhodou je celoplošná citlivost na světlo a tím i na malé částice nebo na částice, které mají menší rozptyl světla do stran.

Moderní kamery používané v metodě PIV obsahují CCD senzor s architekturou „progressive-scan-interline“, jehož schéma je zobrazeno na obrázku 2. Tyto kamery jsou určeny pro cross-korelaci neboli vzájemnou korelaci. Použití pro autokorelaci není vyloučeno. Progresivní ukládací architektura čipu obsahuje dva typy buněk, a to buňky citlivé na světlo, a stejný počet paměťových buněk, respektive skladovací buňky. Světelné buňky detekují světlo a hned po zachycení světlo převedou do sousedních paměťových buněk, tím dojde k vyprázdnění světelných buněk a tyto jsou připraveny na druhý laserový puls. Po druhém pulsu světelné buňky zase detekují světlo. Paměťové buňky nyní obsahují první snímek s počátečními polohami stopovacích částic a buňky citlivé na světlo obsahují druhý snímek s koncovými polohami stopovacích částic. Oba záznamy jsou sekvenčně přesunuty do výstupního registru a odtud odeslány do paměti počítače nebo vyhodnocovacího hardwaru. Skladovací buňky zabírají místo, neboť neumožňují detekovat světlo a tím vytváří oblast, která zmenšuje schopnost detekovat toto světlo. Tento nedostatek je u některých CCD kamer kompenzován předsazením mikročoček před světelné buňky. Malé cylindrické mikročočky mají větší rozměry než buňky citlivé na světlo. Světlo, které by dopadlo do oblastí skladovacích buněk, je koncentrováno jen na světelné buňky. Tímto lze zvýšit účinnost. [8]



Obrázek 2 Schéma konstrukce CCD čipu. [8]

2.1.3 Laser a optika

Základem pro zachycení stopovacích částic unášených v proudu je důležité vytvořit tenkou světelnou rovinu. Osvětlené stopovací částice v této rovině rozptylují světlo. Část světla je rozptýlena také do strany. Rozptýlené světlo reprezentuje signál. Tento signál je nejčastěji zaznamenán kamerou, popřípadě fotoaparátem, a proto musí osvětlovací technika splňovat následně zmíněné požadavky.

Intenzita světelné energie v měřicí rovině musí být tak velká, aby intenzita světla rozptýleného na stopovacích částicích do roviny snímání kamerou byla dostatečná pro zachycení s požadovanou kvalitou záznamu, tedy bez optického šumu.

Délka světelného pulsu musí být natolik krátká, aby osvětlené stopovací částice urazily co nejmenší dráhu, protože tento pohyb osvětlených částic výrazně ovlivňuje výsledky měření.

Časový interval mezi po sobě jdoucími světelnými pulsy musí být takový, aby pohyb stopovacích částic v proudovém poli byl velice malý. To znamená, že maximální posunutí stopovacích částic v rozdělených vyhodnocovaných oblastech, na které je měřená rovina rozdělena, bylo menší, než je jedna čtvrtina strany této vyhodnocované oblasti.

Poloha a velikost celé měřené roviny musí být přesně definovány.

Způsoby osvětlení proudového pole byly různé. Jako první způsob osvětlení se prováděl pomocí stroboskopické lampy. Tento způsob se moc neujal, protože stroboskopická lampa osvětlí celý měřený prostor a ne pouze jeho jednu rovinu. Použilo se usměrnění s použitím tenké desky s úzkou podélnou drážkou, která vytvořila rovinné osvětlení. Ovšem problém s nízkou intenzitou osvětlení zůstal. Další nevýhodou stroboskopické lampy byla nemožnost oddělit světlo odražené od částic od světelné intenzity okolí. Nevýhody stroboskopické lampy byly odstraněny až s použitím laseru, neboť laser generuje monochromatické světlo. Nejdříve se používaly kontinuální lasery, které se dodnes používají v metodě LDA. Hlavní výhodou těchto laserů je možnost odfiltrovat světelnou intenzitu okolí a důležité je také potřebné osvětlení jedné roviny. Kontinuální laser pracuje nepřetržitě a s tím je spojena zbytečná energetická náročnost. Navíc v PIV metodě je osvětlení proudového pole potřebné pouze po krátký časový sled, kdy se zaznamenává obraz. Proto je tento způsob stálého udržování vysoké intenzity světla neekonomický. Při používání záznamové techniky, která je citlivá na světlo, je nutné u kontinuálního laseru použít zařízení pro pulzující světelný list. Paprsek kontinuálního laseru je přerušován pomocí elektrooptické závěrky a výsledný paprsek je tvarován do světelného listu pomocí speciální optiky. Tento způsob se využívá pro zajištění celočíselného počtu pulsů. U druhého způsobu je paprsek kontinuálního laseru rozmítán rotujícím polygonem, jehož obvod tvoří zrcadla, a tak se vytváří tzv. pseudosvětelný řez. [8], [6]

Elektrooptická závěrka

Elektrooptická závěrka je zařízení, které přerušuje kontinuální laserový paprsek, a tím vytváří světelné pulsy, které se následně pomocí válcové optiky tvarují do tvaru světelného listu (řezu). Schéma tohoto procesu je znázorněno na obrázku 3.



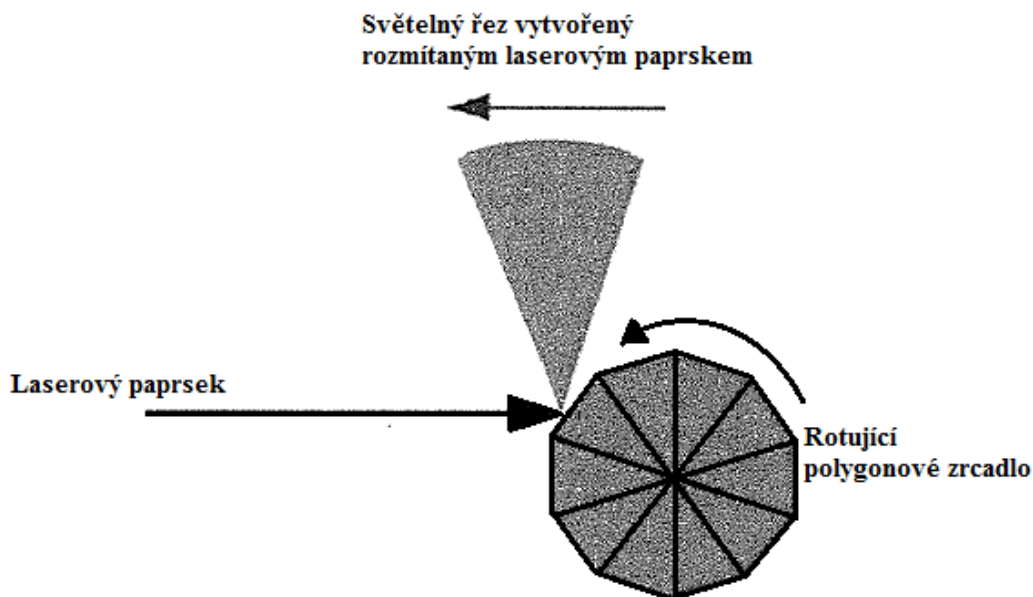
Obrázek 3 Přerušování laserového paprsku pomocí elektrooptické závěrky.

Tento způsob vytvoření světelného řezu má své opodstatnění při podmínkách měření, kdy nízká hustota energie osvětlení a limity časového přerušování paprsku jsou vhodné na studium vodních proudů, pro které se používají relativně větší stopovací částice a rychlosti jsou malé.

Je tedy důležité využít metodu založenou na přerušování laserového paprsku pouze pro studium proudových polí s malými rychlostmi. Jestliže se rychlost proudového pole zvyšuje, musí se délky pulsů a časové intervaly mezi pulsy zkracovat. To významně ovlivňuje nároky na hustotu energie světelného pulsu. [6]

Polygonový skener

Polygonový skener je jiný způsob pro vytvoření světelného pulsu u kontinuálního laseru. Laserový paprsek dopadá na rychle rotující polygon, jehož plochy tvoří zrcadla. Při otáčení polygonu dopadá laserový paprsek vždy na jednu plochu, kterou tvoří již zmíněné zrcadlo. Tímto pohybem laserový paprsek rozmítá do oblouku a laserový paprsek pak osvětluje kruhovou výseč. Čas přeběhu laserového paprsku přes světelný řez je definován rychlostí rotace a obloukovým úhlem. Tento obloukový úhel se určuje z ploch, kterými je tvořen polygon. Schéma tohoto procesu je znázorněno na obrázku 4. [6]



Obrázek 4 Osvětlování polygonovým skenerem.

Pro správnou funkci polygonového skeneru je nutné zajistit synchronizované zapínání a vypínání laserového paprsku, který dopadá na polygon v závislosti na otáčkách a úhlu natočení polygonu. Zapínání a vypínání je zajištěno elektrooptickou závěrkou. Synchronizační jednotka reguluje tyto akční členy a zajišťuje správnou funkci, aby každý snímek zachycený snímacím zařízením byl osvětlen celočíselným počtem přeběhů laserového paprsku.

Tento způsob vytváří přibližně o řád větší hustotu energie než předešlá metoda pomocí elektrooptické závěrky, protože laserový paprsek není roztažen do světelného řezu. Polygonový skener může tedy osvětlovat větší oblast proudu. I přes značné výhody je tento způsob omezen relativně nízkou hustotou energie osvětlení.

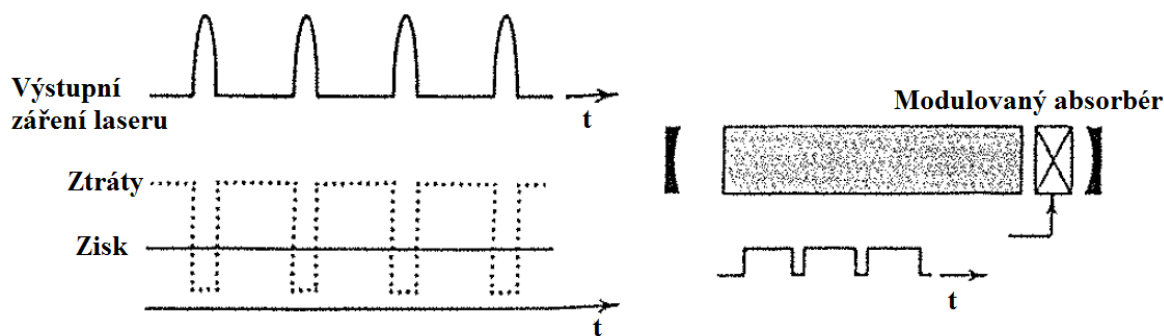
Výhodou použití kontinuálního laseru jsou nižší pořizovací náklady. Avšak jejich zásadní nevýhoda, která je popsána výše, je v dnešní době odsunula na pozici alternativní metody pro studium vodních proudů s nízkými rychlostmi.

Mnoho PIV aplikací má vysoké nároky na osvětlení o vysoké hustotě energie. Těmto nárokům neodpovídají kontinuální lasery, u kterých nelze dosáhnout tak vysoké hustoty energie. Navíc kontinuální laser i při zavedení zařízení pro výrobu pulsujícího světelného listu nesplňuje požadavek na velmi krátkou dobu, kdy se zaznamenává obraz. Všechny výše uvedené nevýhody odstranilo až používání pulsních laserů. Ty vytvářejí krátké pulsy a tím mnohem efektivněji využívají dostupnou světelnou energii. Nejlepší způsob je použití dvoukomorového laseru. Tento laser umožňuje dosáhnout více (dvou) světelných pulsů v měnitelném časovém intervalu mezi prvním a druhým pulsem. [6]

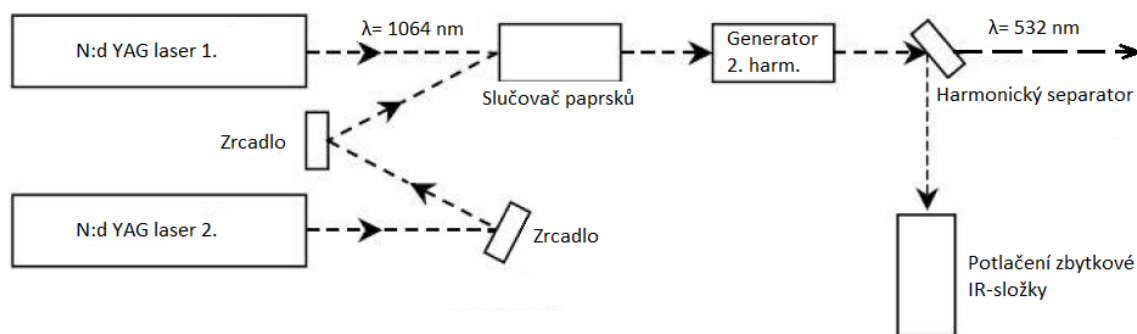
Dvoukomorový Nd:YAG laser

Nd:YAG laser je obecně nepoužívanějším typem pevnolátkového laseru čerpaný impulsní výbojkou. Aktivním materiálem je izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu ($Y_3Al_5O_{12}$) dopovaný ionty neodymu (Nd^{3+}) a z toho vzniká zkratka pro laser, složená z počátečních písmen chemických prvků. Čerpání neboli buzení krystalu se dříve provádělo kryptonovou výbojkou. Tento typ je na ústupu. Nověji se buzení provádí polem polovodičových diod, které mají navíc větší životnost. Nd:YAG krystal a budící prvek jsou umístěny v ohniscích zrcadlové eliptické dutiny. Tento tvar umožňuje maximální přenos od budícího prvku, který se nachází v jednom z ohnisek do Nd:YAG krystalu ve druhém ohnisku.

Nd:YAG lasery emitují infračervené světlo o vlnové délce 1 064 nm. Tento druh světla není pro metodu PIV vhodný, protože zařízení, které se používá na snímání (většina CCD kamer), je na infračervené světlo velice málo citlivé. Dále by bylo nebezpečné používat tento druh světla, který lidské oko nevidí a navíc síla laseru je klasifikována jako nebezpečná. Ze zmíněných důvodů se v PIV používají Nd:YAG lasery pracující v režimu Q-spínání. Jedná se o harmonický oscilátor, který sníží vlnovou délku na hodnotu 532 nm. Jde o citlivější spektrum (modro-zelené) pro zachycení CCD kamerou. Q-spínání se realizuje spínáním ztrát. Tento princip znázorňuje obrázek 5. Protože harmonický oscilátor nemá účinnost 100%, je zapotřebí zbytkové infračervené záření odfiltrovat. To se provádí pomocí harmonického separátoru, který je znázorněn na obrázku 6.



Obrázek 5 Schéma Q-spínání Nd:YAG laseru. [6]



Obrázek 6 Dvoukomorový laser pro PIV.

Činnost laseru začíná buzením krystalu. Při buzení jsou v rezonátoru veliké ztráty. Tyto ztráty mají vliv na oscilace uvnitř rezonátoru. Energie se hromadí v atomech ve formě akumulované inverzní populace. Snížením ztrát se akumulovaná energie vyzáří ve formě krátkého intenzivního pulsu. Většina dnešních laserů je konstruována pro frekvenci pulsů v rozmezí 10 - 20 Hz.

Pro splnění požadavků, které klade metoda PIV, tedy pořízení dvou záznamů v krátkém libovolném časovém rozmezí, slouží použití dvou speciálních Nd:YAG laserů, které jsou doplněny o optickou soustavu tvořenou zrcadly a slučovačem paprsků. Tato soustava vytvoří společnou dráhu obou laserů. Jejich výhodou je, že časový úsek mezi pulsy je libovolný a každý puls má stejnou energii. Výstupní energii paprsků lze zvolit podle aplikace od 10 - 400 mV a to ve velmi krátkém časovém úseku 5 - 10 ns mezi pulsy. Například při použití pro proudění vzduchu je vhodná velikost energie 120 - 400 mV a pro proudění ve vodě je energie pulsu 30 mV, tedy mnohem menší.

Speciální dvoukomorový Nd:YAG laser je univerzální a lze ho uplatnit v celé experimentální mechanice tekutin. Jeho hlavní přínos je pro měření vzdušných proudů o značných rychlostech, kde nahradil méně výkonné kontinuální lasery. [1], [6], [8]

2.1.4 Synchronizér

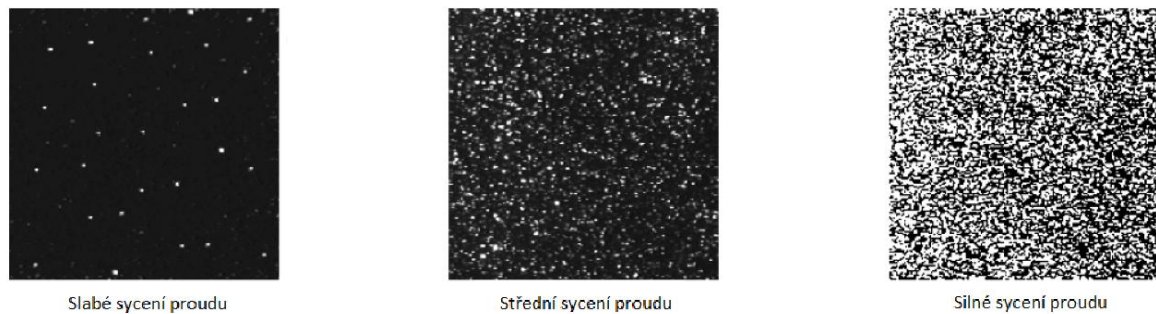
Pro správný průběh měření je nutné správně synchronizovat pulzace laseru se záznamem snímků o poloze stopovacích částic CCD kamerou, a to tak, aby stopovací částice unášené v proudu tekutiny byly nejdříve osvětleny prvním pulsem světelného listu laseru. Světlo, které tyto částice odrazí, je detekováno CCD kamerou, v ideálním případě jako jasný signál ve tvaru kruhu na tmavém pozadí. Signál zachycený CCD kamerou se uloží jako počáteční poloha stopovací částice. Světelný list laseru se vypne a stopovací částice je unášena proudem. Dojde k posunutí kamerového okénka. Spustí se druhý světelný puls laseru a stopovací částice jsou opět detekovány CCD kamerou. Vznikne druhý snímek označený jako koncová poloha stopovacích částic. Tyto dva snímky jsou označeny jako dvojsnímek a jsou použity pro následné vyhodnocení rychlosti proudění. [8]

2.2 Vyhodnocení naměřených dat

Získané expozice v digitální podobě jsou rozděleny na shodné malé pravoúhlé oblasti (interrogation area). Poté se každá oblast analyzuje a stanovuje se průměrné posunutí částic ve všech oblastech. Výstupem metody PIV je obvykle prezentace ve formě vektorové mapy pro měřenou oblast.

K určení vektoru je nutné znát alespoň dvě polohy částice. Proto je důležité, aby se po rozdělení PIV obrazu na jednotlivé vyhodnocovací oblasti nacházely v každé této oblasti nějaké obrazy částic. Podle toho, jaká je koncentrace sytících částic, se vybírá

vhodný algoritmus pro vyhodnocení. Koncentrace má nejen výrazný vliv na výsledky měření, ale především na celý experiment. Druhy sycení proudu v závislosti na koncentraci jsou slabé, střední a silné. Jednotlivé druhy jsou znázorněny na obrázku číslo 7 a níže vysvětleny. [6], [11]



Obrázek 7 Druhy sycení proudu v závislosti na koncentraci sytících částic. [11]

Slabé sycení proudu

Jak již z názvu vyplývá, koncentrace sytících částic v proudu je nízká. U slabého sycení je velmi nízká pravděpodobnost, že nalezneme ve všech vyhodnocovaných oblastech ve stejný čas více jak jeden obraz sytící částice. Zpracování PIV obrazu se provádí jednotlivě v každé vyhodnocovací oblasti. Po zavedení souřadnicového systému X a Y se určí vzdálenost mezi polohami středů u prvního a druhého záznamu. Jestliže použijeme pro záznam obrazu techniku dvojnásobné expozice, pak se ve vyhodnocované oblasti nachází obraz počáteční, ale i koncové polohy částice. Na pořizovaném záznamu se částice jeví jako bílé skvrny (tečky) na černém pozadí. Podle úrovně jasu pixelů u bílé skvrny určíme její vrchol. Vrchol odpovídá středu částice a také projekci polohy v souřadnicovém systému. U techniky dvojnásobné expozice se nachází ve vyhodnocované oblasti tyto dva vrcholy středů částic a projekci do souřadnicového systému je nalezena vzdálenost mezi vrcholy ΔX a ΔY . Tato vzdálenost představuje posunutí obrazu částice v obrazové rovině. Dále se z rovnic:

$$\Delta x = \frac{1}{M} \cdot \Delta X \text{ a } \Delta y = \frac{1}{M} \cdot \Delta Y \quad (2.2-1)$$

vypočte posunutí částice v měřené rovině, kde M je zvětšení záznamové soustavy. Jestliže je znám časový odstup mezi záznamem první polohy a koncové polohy Δt , vypočtou se složky rychlosti v měřené rovině a z nich vektor rychlosti pro danou vyhodnocovanou oblast.

$$u_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ a } u_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} \rightarrow \vec{u} = (u_x, u_y) \quad (2.2-2)$$

Toto platí pro jednoznačné nalezení pouze jedné částice v každé vyhodnocované oblasti. Je velmi malá pravděpodobnost, že by v každé vyhodnocované oblasti byla pouze jedna částice. Ve skutečnosti jsou polohy částic náhodné, v některých oblastech se může nacházet více obrazů částic a v jiných nejsou obrazy částic žádné, a proto realizace tohoto způsobu určení vektoru rychlosti je nejistá.

Důležité je najít v každé oblasti alespoň jeden obraz částice. Hlavní důvod je určení vektoru rychlosti v každé vyhodnocované oblasti. Proto je nezbytné zvýšit koncentraci sytících částic a sytit hustěji proud. Díky větší hustotě se zvýší počet obrazů částic v každé vyhodnocované oblasti. Poté už není možné určit posun každé částice. Hledají se nová řešení - algoritmy.

Střední sycení proudu

Koncentrace sytících částic v proudu je vysoká. V každé vyhodnocované oblasti lze najít alespoň jeden obraz částice neboli v každé oblasti je informace o rychlosti. Tento způsob sycení s sebou přináší problém s určením správného posunutí v oblasti. Důležité je použít správný algoritmus, který určí správné průměrné posunutí v každé oblasti.

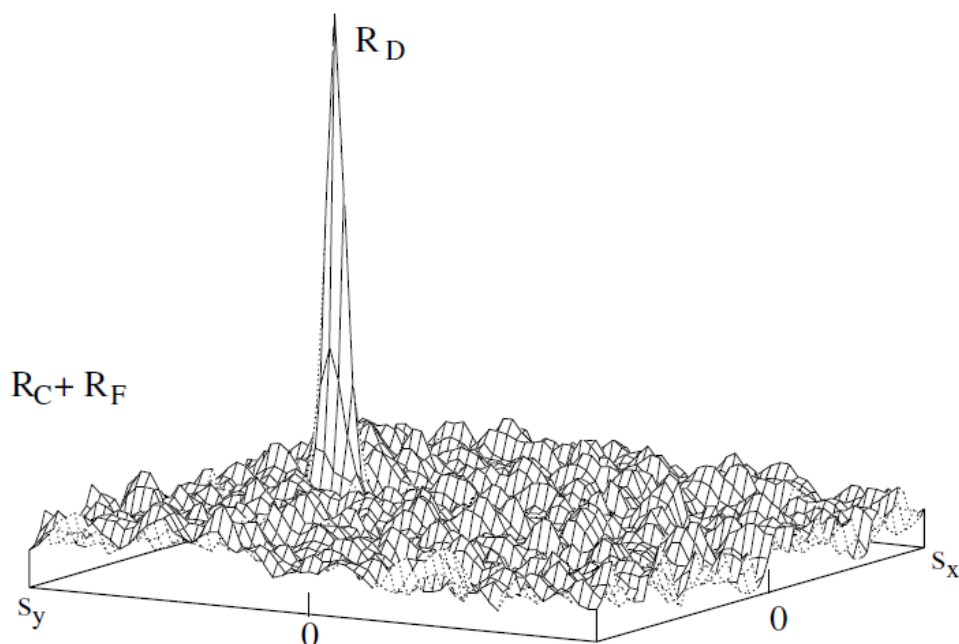
Silné sycení proudu

Koncentrace sytících částic v proudu je velmi vysoká. Záznamové zařízení není schopno rozeznat jednotlivé sytící částice. Obrazem jsou shluky částic, které vytvářejí světlé skvrny s různou koncentrací světla. Tento způsob sycení s sebou přináší také problém s určením správného posunutí v oblasti. Zde algoritmus stanovuje průměrné posunutí skvrn v každé oblasti.

Každý algoritmus má stejnou filozofii. Jeho úkolem je nalézt odpovídající posunutí stopovací částice v obrazové vyhodnocovací rovině, a poté průměrné posunutí v měřené rovině. [1], [6]

2.2.1 Vzájemná korelace

Vzájemná korelace je vhodná technika určena pro vyhodnocení PIV záznamu pořízeného metodou jednotlivých expozic, kde se každý záznam exponuje do samotného obrazu. Výsledkem je plocha peaků v korelační rovině znázorněna na obrázku 8. Každý peak svou výškou a plochou, kterou zaujímá oproti ostatním, určuje, s jakou statickou pravděpodobností došlo ve vyšetřované oblasti k posunutí částic. Každé posunutí je charakterizováno vektorem. Vektor je určen počátečním bodem, který se nachází ve středu nulového (počátečního) peaku a koncovým bodem. Koncový bod je s největší pravděpodobností největší peak. Tento peak má nejpříznivější statické parametry. Po nalezení koncového bodu dostaneme spojnici středu korelační roviny s_D každé vyšetřované oblasti. Nejmenší velikost peaků uvádí součet R_C a R_f nazýván jako korelační šum. Jestliže je znám časový interval Δt , pak je snadné stanovit vektor rychlosti a následně mapu vektorů rychlostí. [8]



Obrázek 8 Vyhodnocení PIV obrazu metodou vzájemné korelace. [11]

V následujícím textu je popsán algoritmus vzájemné korelace. Nejprve definuji symboly, které se budou vyskytovat:

x	polohový vektor v objektové rovině,
X	polohový vektor v obrazové rovině,
$M = \frac{\text{obraz}}{\text{objekt}}$	obraz,
X_1, X_2	středů vyšetřujících paprsků,
d_1, d_2	průměry vyšetřujících paprsků,
$I_{I1}(X), I_{I2}(X)$	intenzity vyšetřujících paprsků,
$\tau_1(X), \tau_2(X)$	propustnost prvního a druhého fotografického záznamu,
$I_{01}(x), I_{02}(x)$	intenzita laserového listu při prvním a druhém záznamu,
$\tau_0(X - Mx_i)$	normalizovaná propustnost obrazu i -té částice (předpokládá se, že obrazy částic jsou identické).

Pro případ jednotlivých expozic dvou samostatných obrazů můžeme zapsat jejich propustnosti jako:

$$\tau_1(X) = \int I_{01}(x) \cdot g(x, t) \cdot \tau_0(X - M \cdot x) dx, \quad (2.2.1-1)$$

kde

$$g(x, t) = \sum \delta(x - x_i(t)) \quad (2.2.1-2)$$

je vzorkovací funkce, která vyjadřuje polohu částic v čase t a

$$\tau_2(X) = \int I_{02}(x') \cdot g(x', t + \Delta t) \cdot \tau_0(X - M \cdot x') dx', \quad (2.2.1-3)$$

kde

$$g(x', t + \Delta t) = \sum_i \delta(x' - x_i'(t + \Delta t)), \quad (2.2.1-4)$$

je vzorkovací funkce, která vyjadřuje polohu částic v čase $t + \Delta t$.

Je vhodné rozložit vzorkovací funkci $g(x, t)$ na střední a flukтуаční část:

$$g(x, t) = C(x) + \Delta g(x, t), \quad (2.2.1-5)$$

kde $C(x)$ reprezentuje koncentraci částic (tj. průměrný počet částic v jednotce objemu), která je časově nezávislá. Pro časovou střední hodnotu flukтуаční složky platí:

$$\langle \Delta g(x, t) \rangle = 0. \quad (2.2.1-6)$$

Dále pro I_1, I_2 platí:

$$I_1(X) = I_{I1}(X - X_1)\tau_1(X) \quad (2.2.1-7)$$

a

$$I_2(X) = I_{I2}(X - X_2)\tau_2(X). \quad (2.2.1-8)$$

Pro stanovení průměrného posunutí částic v případě dvou samostatných obrazů (jednotlivé expozice) se používá vzájemná korelace I_1 a I_2 :

$$R_{12}(s) = \int I_1(X) \cdot I_2(X + s) dX, \quad (2.2.1-9)$$

kde s je separační vektor.

Dosažením rovnic (2.2.1-7) a (2.2.1-8) do rovnice (3.2.1-9) vyjde:

$$R_{12}(s) = \int I_{I1}(X - X_1) \cdot I_{I2}(X - X_2 + s) \cdot \tau_1(X) \cdot \tau_2(X + s) dX \quad (2.2.1-10)$$

S pomocí rovnic (2.2.1-1) a (2.2.1-3) obdržíme:

$$\tau_1(X) \cdot \tau_2(X + s) = \int I_{01}(x) \cdot g(x, t) \cdot \tau_0(X - M \cdot x) dx \cdot \int I_{02}(x') \cdot g(x', t + \Delta t) \cdot \tau_0(X - M \cdot x' + s) dx' \quad (2.2.1-11)$$

a po dosažení (2.2.1-5) pak

$$\begin{aligned} \tau_1(X) \cdot \tau_2(X + s) = & \left(\int I_{01}(x) \cdot C(x) \cdot \tau_0(X - M \cdot x) dx + \right. \\ & \left. \int I_{01}(x) \cdot \tau_0(X - M \cdot x) \cdot \Delta g(x, t) dx \right) \cdot \left(\int I_{02}(x') \cdot C(x') \cdot \right. \\ & \left. \tau_0(X - M \cdot x' + s) dx' + \int I_{02}(x') \cdot \tau_0(X - M \cdot x' + s) \cdot \Delta g(x', t + \right. \\ & \left. \Delta t) dx' \right) \end{aligned} \quad (2.2.1-12)$$

V dalším textu budeme používat následující označení

$$I_{01}(x) = I_{01}, I_{02}(x') = I'_{02} \text{ a } C(x) = C, C(x') = C'.$$

Roznásobením rovnice (2.2.1-12) dostaneme:

$$\begin{aligned} \tau_1(X) \cdot \tau_2(X + s) = & \int I_{01} \cdot C \cdot \tau_0(X - M \cdot x) dx \cdot \int I'_{02} \cdot C \cdot \tau_0(X - M \cdot \\ & x' + s) dx' + \iint \tau_0(X - x) \cdot \tau_0(X - M \cdot x' + s) \cdot I_{01} \cdot I'_{02} \cdot \Delta g(x, t) \cdot \\ & \Delta g(x', t + \Delta t) dx dx' + \iint \tau_0(X - x) \cdot \tau_0(X - M \cdot x' + s) \cdot I_{01} \cdot I'_{02} \cdot (C \cdot \\ & \Delta g(x', t + \Delta t) + C' \cdot \Delta g(x, t)) dx dx' \end{aligned} \quad (2.2.1-13)$$

dosažením rovnice (2.2.1-10) obdržíme:

$$R_{12}(s) = R_C(s) + R_D(s) + R_F(s), \quad (2.2.1-14)$$

kde

$$R_C(s) = \int I_{I1}(X - X_1) \cdot I_{I2}(X - X_2 + s) \cdot \left(\int I_{01} \cdot C \cdot \tau_0(X - M \cdot x) dx \cdot \int I'_{02} \cdot C' \cdot \tau_0(X - M \cdot x' + s) dx' \right) dX, \quad (2.2.1-15)$$

$$R_D(s) = \int I_{I1}(X - X_1) \cdot I_{I2}(X - X_2 + s) \cdot \left(\iint \tau_0(X - x) \cdot \tau_0(X - M \cdot x' + s) \cdot I_{01} \cdot I'_{02} \cdot \Delta g(x, t) \cdot \Delta g(x', t + \Delta t) dx dx' \right) dX, \quad (2.2.1-16)$$

$$R_F(s) = \int I_{I1}(X - X_1) \cdot I_{I2}(X - X_2 + s) \cdot \left(\iint \tau_0(X - x) \cdot \tau_0(X - M \cdot x' + s) \cdot I_{01} \cdot I'_{02} \cdot (C \cdot \Delta g(x', t + \Delta t) + C' \cdot \Delta g(x, t)) dx dx' \right) dX \quad (2.2.1-17)$$

R_C konvoluce průměrných intenzit,

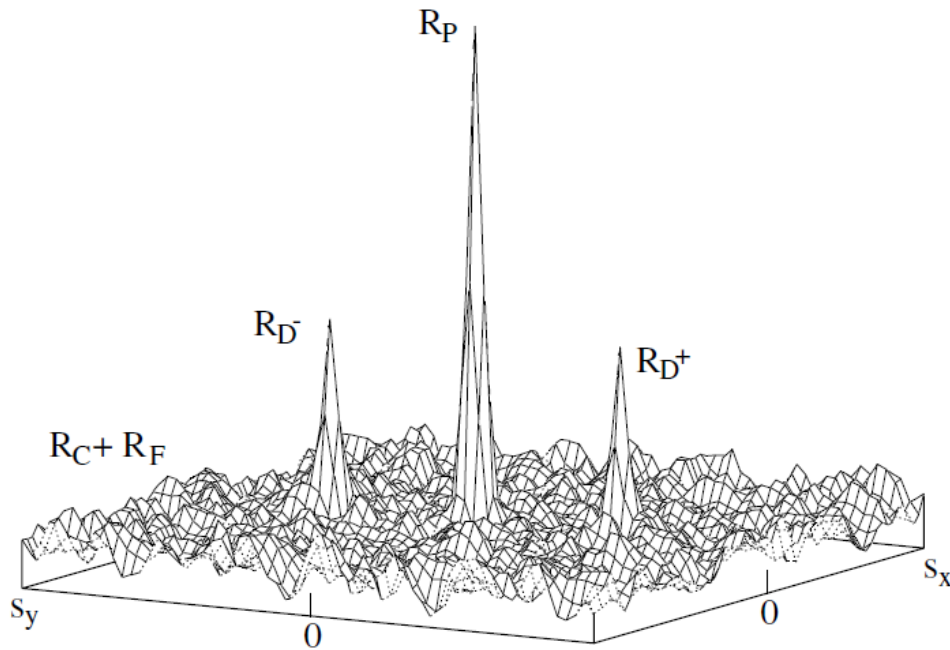
R_F složka fluktuálního šumu korelačního odhadu,

R_D korelace posunutí, které reprezentuje posunutí obrazu. [6]

2.2.2 Autokorelace

Autokorelace je vhodná technika určena pro vyhodnocení PIV záznamu pořízeného metodou dvojnásobné expozice, kde se oba záznamy exponují do jednoho obrazu.

Výsledkem je plocha peaků v korelační rovině znázorněna na obrázku 9. Na rozdíl od vzájemné korelace, autokorelace nabízí dva symetrické vrcholy R_{D+} a R_{D-} k hlavnímu vrcholu R_P . Vzdálenost mezi hlavním vrcholem R_P a jedním z vrcholů $R_{D\pm}$ udává velikost posunutí částice. Z toho je patrná hlavní nevýhoda autokorelace. Tato technika neposkytuje informaci o směru vektoru posunutí. Symetrické vrcholy $R_{D\pm}$ jsou o polovinu menší než velikost vrcholu R_D u techniky vzájemné korelace a současně korelační šum je přibližně dvakrát větší. Korelační šum je součet členů R_c a R_f . [6], [11]



Obrázek 9 Vyhodnocení PIV obrazu metodou autokorelace. [11]

V následujícím textu je popsán algoritmus autokorelace. Symboly vyskytující se v následující části jsou definovány:

x	polohový vektor v objektové rovině,
X	polohový vektor v obrazové rovině,
X_1, X_2	středů vyšetřujících paprsků,
$I_{11}(X), I_{12}(X)$	intenzity vyšetřujících paprsků,
$\tau_1(X), \tau_2(X)$	propustnost prvního a druhého fotografického záznamu,

V případě dvojnásobné expozice PIV záznamu do jednoho obrazu je propustnost výsledného nesaturovaného záznamu aditivní:

$$\tau(X) = \tau_1(X) + \tau_2(X), \quad (2.2.2-1)$$

Intenzita vyšetřujícího paprsku I (pro $I_{11} = I_{12}$) je pak dána rovnicí:

$$I(X) = I_1(X - X_1) \cdot \tau(X), \quad (2.2.2-2)$$

Vhodná technika pro určení průměrného posunutí je v tomto případě autokorelace:

$$R(s) = \int I(X) \cdot I(X + s) dX, \quad (2.2.2-3)$$

Obdobným způsobem, kterým se ukázalo, že vzájemná korelace se skládá ze tří členů $R_{12}(s) = R_C(s) + R_D(s) + R_F(s)$, lze dokázat, že autokorelace vede k rovnici tvořenou pěti členy:

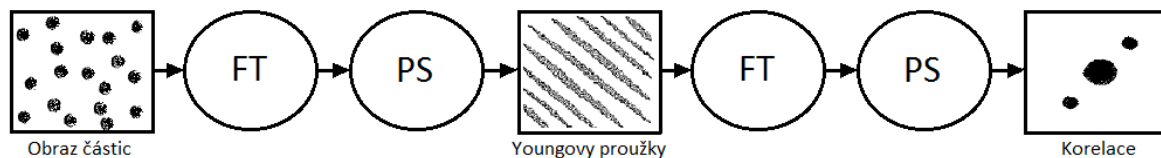
$$R(s) = R_C(s) + R_{D+}(s) + R_{D-}(s) + R_F(s) + R_P(s), \quad (2.2.2-4)$$

kde vrcholy R_{D+} a R_{D-} jsou zrcadlově symetricky umístěné vrcholy korelace posunutí vůči centrálnímu vrcholu R_P .

Ze shrnutí daných poznatků vyplývá, že pro vyhodnocení PIV záznamu je vhodnější technika vzájemné korelace. Tato technika jednoznačně určuje směr posunutí. Hodnota korelačního šumu je menší, což se projevuje na výsledné kvalitě obrazu. Hlavní důvod, proč se upřednostňuje použití techniky vzájemné korelace, je v používání techniky záznamového zařízení. V praxi se používají pro záznam CCD kamery (více v kapitole 2.1.2 Kamerový systém). [6]

2.2.3 Metoda dvojnásobné Fourierovy transformace

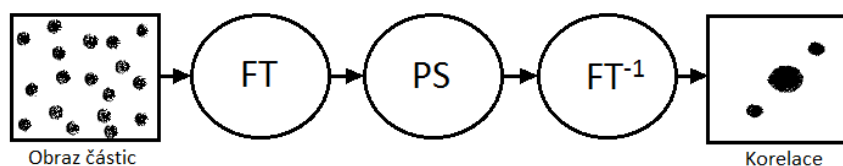
Fourierova transformace se používá pro efektivní výpočet korelace. První možností aplikace na výpočet korelace je metoda dvojnásobné Fourierovy transformace. Tato metoda je vhodnější pro autokorelaci. Vstupem pro autokorelaci je dvojnásobná expozice do jednoho obrazu. Použitím Fourierovy transformace na pořízený obraz dostaneme komplexní funkci. Odmocnina absolutní hodnoty této funkce je tzv. výkonové spektrum, které tvoří ve vyhodnocované oblasti periodicky se opakující strukturu tzv. Youngových proužků, kde normála udává směr průměrného posunutí částic. Velikost posunutí je přímo úměrná vzdálenosti mezi proužky. Z těchto informací nelze stanovit vektor posunutí, proto se použije druhá Fourierova transformace a následně se vypočte výkonové spektrum. Výstupem je jeden centrální vrchol a k němu dva postranní vrcholy, které jsou symetrické. Hodnota vektoru je dána vzdáleností centrálního vrcholu s postranním vrcholem. Tento postup je znázorněn na obrázku číslo 10. [1], [6]



Obrázek 10 Postup při použití metody dvojnásobné Fourierovy transformace.

2.2.4 Metoda Wienerova-Chinčanova teorému

Jedná se o druhý způsob aplikace Fourierovi transformace. Tato metoda lze použít jak pro výpočet autokorelace, tak pro vzájemnou korelaci. Na pořízený záznam se nejprve použije Fourierova transformace, poté se stanoví absolutní odmocnina, neboli Výkonové spektrum, ze kterého se prostřednictvím inverzní Fourierovy transformace získá hledaná funkce. Tato korelační funkce udává ve vyhodnocované oblasti jeden centrální vrchol a k němu dva symetrické postranní vrcholy, jak je patrné na obrázku číslo 11. [1], [6]



Obrázek 11 Postup při použití Wienerova-Chinčanova teorému.

2.3 Metody pro vyhodnocení naměřených dat

Pro vyhodnocení PIV záznamů pomocí Fourierovy transformace lze použít dva odlišné přístupy zpracování, buď optické metody vyhodnocení PIV záznamů, nebo numerické metody vyhodnocení PIV záznamů. V některých případech je vhodné použít kombinaci obou přístupů. [6], [11]

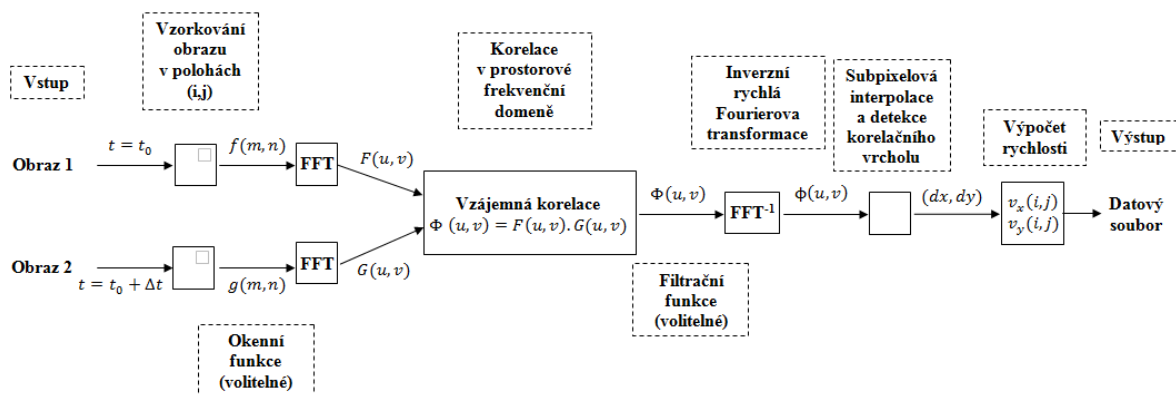
2.3.1 Optické metody vyhodnocení PIV záznamů

Optické metody jsou založeny na optické Fourierově transformaci. V mé práci bude záznam vyhodnocen pomocí numerických metod. Důvodem, proč se optickými metodami nebudu zabývat, je jejich složitost a náročnost při použití. Těmto metodám navíc brání v rozvoji a jejich rozšíření stále se rozvíjející obor výpočetní techniky. Tento obor významně urychlil a usnadnil výpočet korelace pomocí numerických metod. Současné systémy umožňují zpracovat pořízený PIV záznam v reálném čase. [6]

2.3.2 Numerické metody vyhodnocení PIV záznamů

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, numerické metody mají řadu výhod, které z nich v dnešní době dělají perspektivní nástroj pro výpočet korelací.

Pro numerické metody je nejprve potřebné provést PIV záznam obrazu v digitální podobě. Kamery používané pro záznam PIV obrazu digitalizaci poskytují automaticky. Poté je pořízený záznam vyhodnocen. Hlavním cílem je určit průměrné posunutí částic. V kapitole 2.1 bylo uvedeno, že k pořízení záznamu se používá sekvenční pořízení dvou záznamů poloh částic. Vstupní obraz, na kterém je zaznamenána počáteční poloha částic a výstupní obraz, kde jsou zaznamenány částice po uplynutí času Δt . Při vyhodnocení pořízených záznamů se hledá funkce posunutí. Důležité je zaobírat se působením šumu. Toto způsobují částice, které během časového intervalu Δt vstoupí nebo vystoupí z vyhodnocované oblasti. Schéma vývojového diagramu numerického vyhodnocení PIV záznamů je znázorněno na obrázku číslo 12. [6]

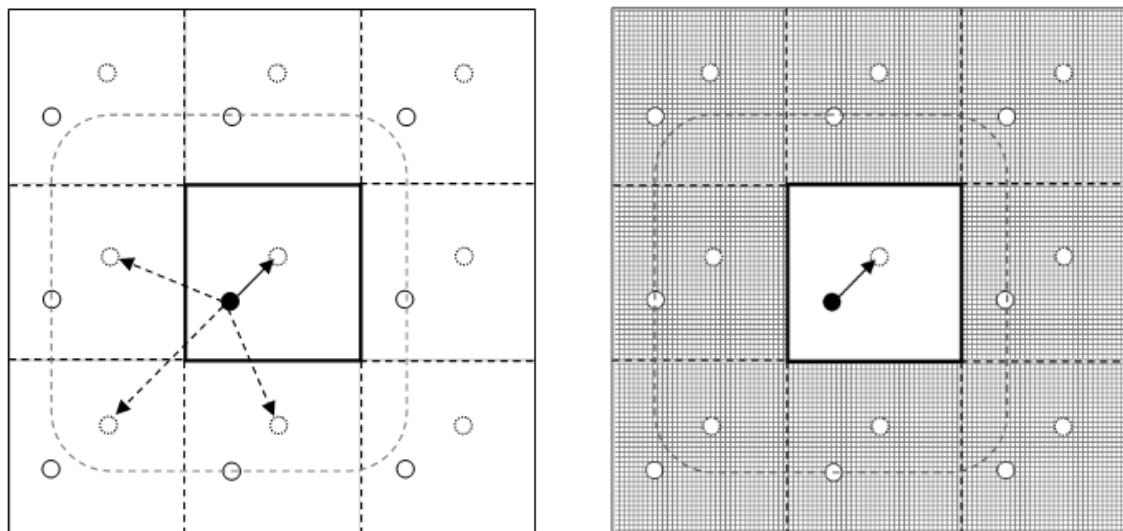


Obrázek 12 Schéma vývoj. diagramu numerického vyhodnocení PIV záznamu.

Okenní funkce

Okenní funkce je speciální funkce, která se aplikuje na vyhodnocovanou oblast a potlačuje obrazy částic, které se nachází na okraji vyhodnocované oblasti. Tato funkce se aplikuje na začátku procesu vyhodnocení PIV záznamů a lze ji označit za vstupní filtr. K vyhodnocení se používá rychlá Fourierova transformace FFT. Metoda je založena na předpokladu obrazové periodičnosti předlohy. Tímto vznikají fantómové korelace neboli cyklické korelace. Na obrázku číslo 12 je vlevo znázorněna produkce cyklické

korelace. Částice podél vyhodnocované oblasti zvyšují možnost nesprávného určení počáteční či koncové polohy. Důsledkem je zvýšení odstupu signálu od šumu. [6]



Obrázek 13 Cyklické korelace.

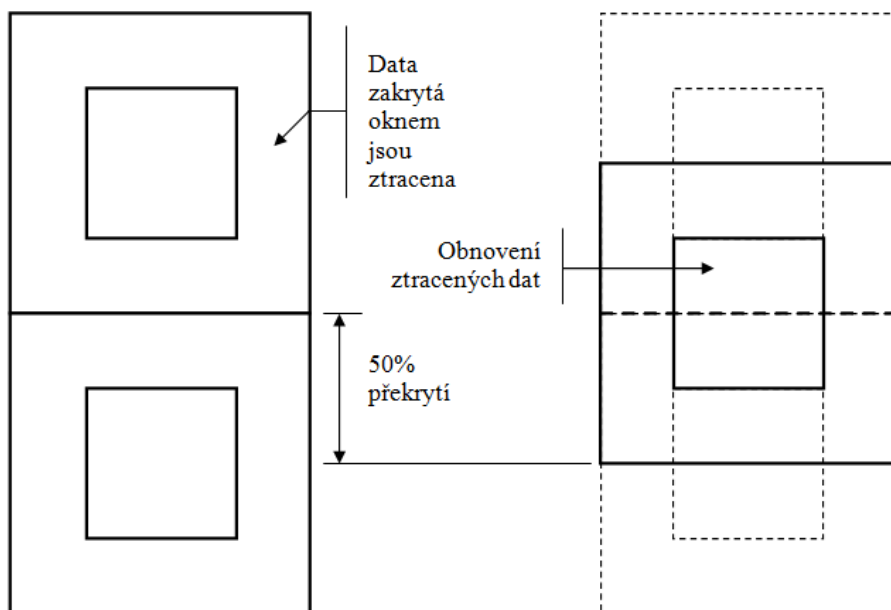
Činnost vstupního filtru popisuje váhová funkce $W(x,y)$, hodnotící PIV obraz podle intenzity šedi. Na obrázku číslo 13 je vlevo dobře znázorněna okenní funkce „top-hat“ $W(x,y)$. Z obrázku je patrné, že tato funkce potlačí částice, které se nacházejí poblíž okraje vyhodnocované oblasti a sníží pravděpodobnost výskytu cyklických korelací. Tato funkce násobí intenzity částic, které se nacházejí ve vyhodnocované oblasti číselnou hodnotou 1. Částice, které se nacházejí poblíž okraje vyhodnocované oblasti, násobí číselnou hodnotou 0.

Gaussovo okno

Jedná se o podobnou funkci jako je Okenní funkce. Rozdíl je v odlišném způsobu násobení intenzity částic. Gaussovo okno násobí intenzitu částic číselnou hodnotou, která je závislá na vzdálenosti od středu vyhodnocované oblasti. Obrazy částic, které se nachází ve středu vyhodnocované oblasti, jsou násobeny číselnou hodnotou 1. Čím je vzdálenost od středu oblasti větší, tím se zmenšuje číselná hodnota, kterou jsou intenzity obrazů částic násobeny. Tato metoda je v praxi při analýze PIV záznamu více používána, protože nedochází ke značnému potlačení intenzity na hranici vyšetřované oblasti. Intenzita se zde exponenciálně snižuje od středu oblasti.

Překrývání vyhodnocované oblasti

Při aplikaci okenní funkce dochází ke ztrátám informací na hranici vyšetřované oblasti. Ztracené informace způsobí zvýšení šumu. Použitím techniky překrývání vyhodnocovaných oblastí lze ztracené informace získat zpět. Schéma techniky znázorňuje obrázek číslo 14. Technika překrývání posouvá vyhodnocovací oblast o 50 % ve vertikálním směru. Aplikace je možná i v horizontálním směru. Při posunutí se vyhodnocovací oblast dostane do oblasti, ve které došlo aplikací okenní funkce ke ztrátě informací. Techniku překrývání lze aplikovat i v případě absence okenní funkce, protože vyhodnocování při okraji vyhodnocované oblasti s sebou nese riziko ztráty páru (viz kapitola 2.3.3 Limity PIV metody). Tato technika zvyšuje pravděpodobnost nalezení většiny dvojic obrazů částic. Nevýhodou techniky může být větší časová náročnost potřebná pro výpočet.



Obrázek 14 Schéma techniky překrývání vyhodnocované oblasti.

Filtrační funkce

Podobně jako okenní funkce, která slouží ke snížení odstupů signálu od šumu, se tato funkce aplikuje po analýze PIV obrazu metodou vzájemné korelace, tedy před inverzní rychlou Fourierovou transformací FFT^{-1} , viz obrázek číslo 12 (Vývojový diagram numerického zpracování PIV záznamu). Při měření kamera zaznamenává informace, které poskytují světelné odrazy na částicích (popsáno v kapitole 2.1.2 Komerový systém). Světlo, které vstupuje do objektivu kamery, není pouze světlo odražené od stopovacích částic unášených proudem média v měřené rovině, ale také světlo pozadí či zrcadlení od optických částí, které tvoří transparentní měřicí část. Tímto se vytváří v korelační rovině šum. Je zapotřebí ho minimalizovat. Čím více je potlačen odstup signálu od šumu, tím více se zajistí dosažení přesného výsledku při určení korelačního vrcholu a následné subpixelové interpolace, popsané v následující kapitole. Pro filtrační funkci je vhodné použít vhodnou pásmovou propust. Tato propust odfiltruje ze signálu nízkofrekvenční a vysokofrekvenční složky.

Subpixelová interpolace

Tato metoda je vhodná pro přesné určení polohy, šířky a výšky vrcholu v korelační rovině. Subpixelová interpolace zpracovává kamerou pořízený obraz. Vyhodnocením obrazu je k dispozici soubor hodnot, které jsou určeny dvojicí souřadnic. V prvním kroku se určí lokální maximum, tedy maximální vrchol v korelační rovině. Tento vrchol má hodnotu dvou souřadnic (x_m, y_m) . Hodnota vrcholu musí být větší než hodnota osmi sousedních vrcholů. Následně se hledá poloha středu vrcholu (x_o, y_o) z lokálního maxima a dvou sousedních bodů. Využívá se robustní parabolické interpolace. Gaussovský vrchol se aproximuje parabolou. Pro použití aproximace se vychází z předpokladu $\exp(x) \approx 1 + x$. Prostřednictvím této funkce se určí přesná hodnota středu vrcholu. Následně lze z těchto informací určit výšku a šířku dvou nejvyšších vrcholů. Jestliže je použita na záznam autokorelace, tak se určí i nejvyšší centrální vrchol. Nižší vrcholy představují šum.

Pro zajištění dobré kvality PIV záznamu jsou stanoveny následující vztahy:

$$\frac{h_1}{h_0} \geq k, \quad 0.5 < k < 0.8$$

$$\frac{h_1}{h_2} \geq k, \quad 1.0 < k < 1.5,$$
(2.3.2-1)

kde h_0 představuje nejvyšší centrální vrchol, h_1 představuje signálový vrchol a h_2 představuje šumový vrchol. [6], [11]

2.3.3 Limity PIV metody

Metoda PIV má z vlastního principu a měřicí techniky různá omezení. Podle způsobu použité měřicí techniky a provedení samotné transparentní části určené pro měření, je zapotřebí zvolit vhodné parametry. Stanovení vhodných parametrů lze získat ze zkušeností z praxe. Navíc je důležité brát v úvahu limity metody PIV. Tento oddíl shrnuje systematické chyby a vhodné parametry doporučené pro minimalizaci těchto chyb. [6]

Ztracené páry

Jednou z častých systematických chyb při měření jsou ztracené páry. Jak z názvu vyplývá, jedná se o ztrátu informace o poloze protějšku částice do páru ve vyhodnocované oblasti. To znamená, že ve druhém záznamu buď do vyhodnocované oblasti nějaká částice vstoupila, nebo ji opustila. Ztráta této informace výrazně přispívá k nárůstu tzv. náhodných korelací a podílí se na zvýšení korelačního šumu. Velikost této systematické chyby se zvyšuje u rychlejších částic. Toto nejen zvyšuje korelační šum, ale navíc snižuje výsledné rychlosti sledované oblasti k nižším hodnotám.

Pro maximální posunutí částic ve vyhodnocované oblasti lze doporučit, aby toto posunutí částic bylo pod jednu čtvrtinu strany vyhodnocované oblasti. Hodnota jedna čtvrtina je stanovena z teoretického rozboru, který provedli Keane a Adrian. [6]

$$|D_{max}| = |v_{max}| \cdot \Delta t \cdot M \leq \frac{d_1}{4} = \frac{N_{int} \cdot d_{pixel}}{4},$$
(2.3.3-1)

Kde je:

D_{max}	vektor maximální posunutí v obrazové rovině,
v_{max}	vektor maximální rychlosti v objektové rovině,
Δt	časový interval mezi prvním a druhým PIV záznamem,
$M = \text{obraz/objekt}$	zvětšení,
d_1	strana vyhodnocované oblasti,
N_{int}	strana vyhodnocované oblasti v pixelech,
d_{pixel}	rozeč mezi sousedními pixely.

Rychlostní gradienty a jejich účinky uvnitř vyhodnocované oblasti

V ideálním případě je proud uvnitř vyhodnocované oblasti homogenní. V tomto optimálním stavu mají všechny stopovací částice stejné posunutí. To znamená, že rychlostní gradient je nulový. Tento popsany ideální případ je ovšem nereálný. V reálném případě dochází k rozdílnému posunutí stopovacích částic a uvnitř vyhodnocované oblasti vznikají narušující rychlostní gradienty. Rychlostní gradienty

snižují odstup signálu od šumu. Tím se snižuje přesnost v určení přesného průměrného posunutí. U rychlejších částic je větší pravděpodobnost, že konečná poloha stopovací částice leží mimo vyhodnocovanou oblast. Hodnota rychlostních gradientů se pak blíží k nule. Problémy rychlostních gradientů je možné zmírnit větší hustotou sycení proudu, dále pak použitím vhodných metod pro analýzu výsledků měření.

Následující podmínka zaručuje 95% pravděpodobnost správně detekovaných vektorů rychlosti.

$$\frac{M \cdot |\Delta u| \cdot \Delta t}{d_1} < 0,03 \equiv 3 \%, \quad (2.3.3-2)$$

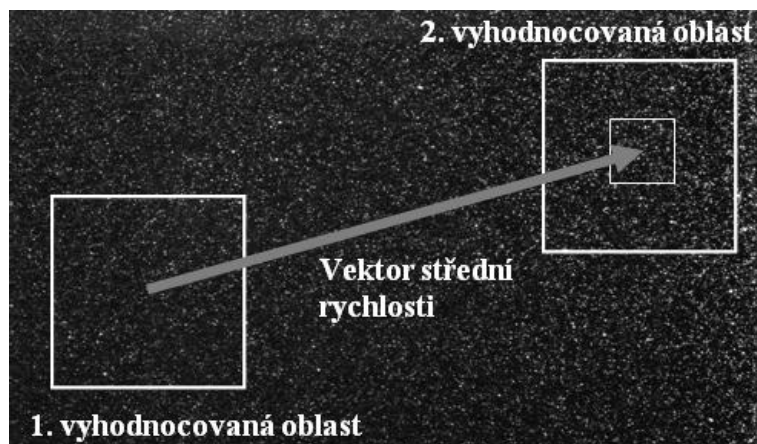
Kde je:

M	<i>obraz/objekt</i>	zvětšení,
Δu		odchylka od průměrné rychlosti,
Δt		časový interval mezi prvním a druhým PIV záznamem,
d_1		strana vyhodnocované oblasti.

Aby byla zaručena takto vysoká pravděpodobnost, musí být odchylky od průměrné rychlosti menší než 3%. Stále existuje riziko 5% pravděpodobnosti určení chybných vektorů. Tyto vektory lze detekovat ve výsledné vektorové mapě a snížit tak pravděpodobnost špatně detekovaných vektorů. [6]

Offset

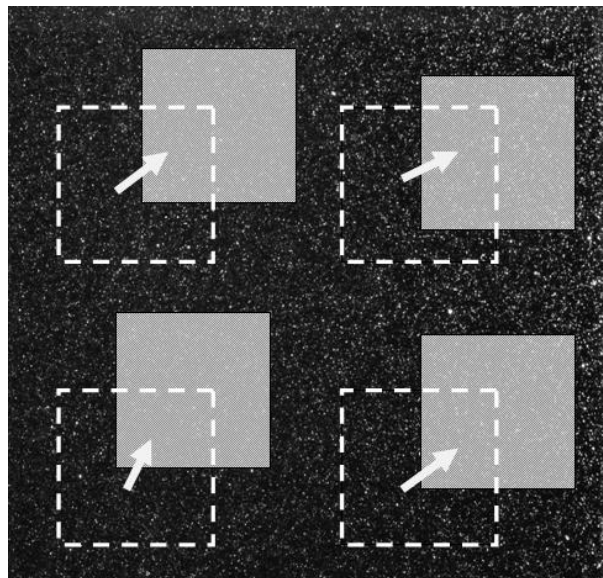
Tato metoda zajišťuje posunutí druhého obrazu vyhodnocované oblasti vůči prvnímu. Velikost posunutí odpovídá průměrnému posunutí unášených částic v proudu. Tento proces výrazně snižuje počet částic, které přejdou přes vyhodnocovací oblast, tzv., „ztracené páry“. Další výhodou této metody je změření velmi malé vírové struktury v proudu s velkou střední rychlostí. Standardní analýza volí kvůli velké střední rychlosti patřičně velkou vyhodnocovací oblast, které náleží jeden vektor odpovídající střední rychlosti proudu. V této oblasti pak není možné detekovat malou vírovou strukturu. Jestliže se aplikuje metoda offset, pak se nastaví posunutí druhého obrazu vyhodnocovací oblasti na hodnotu střední rychlosti proudu. Následně je možné zvolit vhodné rozměry vyhodnocované oblasti a tím zachytit i malé vírové struktury v proudu s velkou kvalitou. Metoda se aplikuje na samotný začátek analýzy pořízených záznamů, často bývá součástí algoritmu vzájemné korelace. Nevýhodou je stejné použití posunutí pro všechny vyhodnocované oblasti. Na obrázku číslo 15 je znázorněno schéma metody offset. [6]



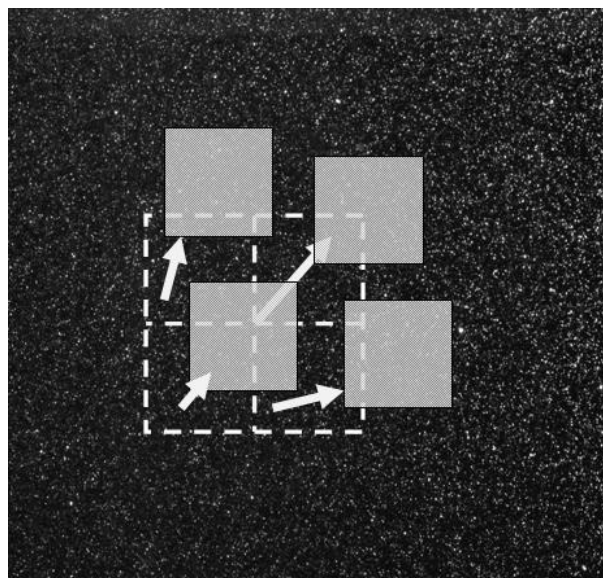
Obrázek 15 Schéma aplikace metody offset.

Adaptivní korelace

Tato metoda svými vlastnostmi úzce navazuje na metodu offset. Metoda odstraňuje nevýhodu stejného posunutí pro všechny vyhodnocované oblasti a uplatňuje pro každou vyhodnocovanou oblast příslušné posunutí. Používá tzv. adaptivní offset. Algoritmus metody provádí opakující se výpočty vzájemné korelace, přičemž pro následující výpočet se použije předchozí výsledek. Výpočet algoritmu se neustále zpřesňuje. Tento algoritmus ve skutečnosti funguje následně. Nejprve se vypočte vzájemná korelace pro pořízený záznam obrazu. Tím se stanoví vektor průměrného posunutí částice a použije se adaptivní offset. V dalším výpočtu se již vzájemná korelace vypočte pro každou vyhodnocovanou oblast a následně se použije adaptivní offset. Tento postup je možné opakovat vícekrát. V praxi postačí pouze jedno opakování. Níže je přiložen obrázek číslo 16, na kterém je znázorněno jedno opakování. Z obrázku číslo 17 je patrné, že každé opakování výpočtu zmenšuje délku strany vyhodnocované oblasti o polovinu. [6]



Obrázek 16 Adaptivní offset.

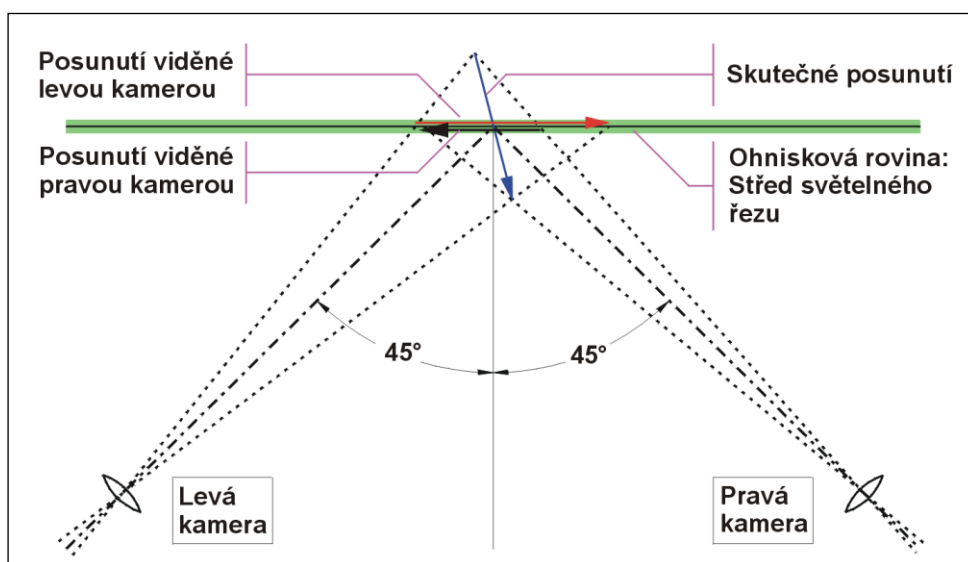


Obrázek 17 Dva průchody algoritmu adaptivní korelace.

2.4 Stereoscopic

Tradiční metoda PIV, umožňuje změřit pouze dvourozměrné rychlostní pole a stanovit vektorovou mapu. Metoda 3D-PIV umožňuje určit i třetí složku rychlosti kolmou k měřící rovině a funguje na stejném principu jako lidské prostorové vidění, respektive stereoskopické vidění. Prostorové vidění umožňuje vnímat trojrozměrnost předmětů, jejich vzdálenost a hloubku v prostoru. Na záznamu se podílejí obě oči, mozek vyhodnocuje a sleduje rozdíly mezi obrazy z obou očí. Jedním okem je člověk schopen přesně rozpoznat pohyby do stran, tedy když se zavede souřadnicový systém, tak v ose x a v ose y . Bohužel není schopen jedním okem dobře odhadnout vzdálenosti, tedy pohyby v ose z . [10], [11]

Princip měření metodou 3D-PIV je podobný jako konvenční dvourozměrnou metodou. Posunutí částic se měří shodně, pouze se používají pro záznam dvě kamery. Obě kamery snímají proudové pole, ale každá pod jiným úhlem. Ze záznamů lze určit všechny tři složky vektoru posunutí. Nejpřesnější výsledek posunutí lze obdržet, když osy objektivů obou kamer jsou vychýleny o 45° od roviny kolmé k měřené rovině proudového pole. Lze použít i jiné hodnoty úhlu vychýlení, například když je omezen přístup při měření. Tato úprava snižuje přesnost výsledku měření. Praxí bylo zjištěno, že kvalitní výsledky lze provést i při úhlech snímání $\pm 30^\circ$. Princip měření je znázorněn na obrázku číslo 18.



Obrázek 18 Schéma uspořádání 3D-PIV metody. [8]

Metoda 3D-PIV s sebou nese řadu obtíží, základem je správně zaostřit obě kamery. To znamená, že objektová rovina musí být zaostřena v celé obrazové rovině kamery. Technickým řešením je naklonění roviny CCD senzoru vzhledem k rovině objektivu kamery. Tímto se všechny tři roviny protínají v jedné přímce v rovině. Další odlišností je stanovení vektorů v 3D vektorové mapě. Jelikož obraz snímají dvě kamery, vznikají tím pádem dvojice 2D posunutí. Pro určení 3D vektoru je zapotřebí stanovit 3 složky posunutí. Pro výpočet jsou dány 4 rovnice o 3 neznámých. [6], [11]

3 POSTAVENÍ MĚŘICÍ TRATI

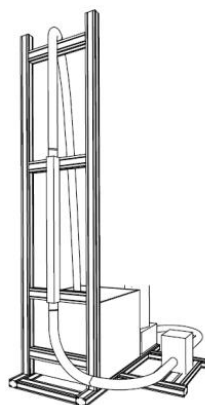
Experiment, nebo též vědecký pokus, lze obecně považovat za soubor jednání či pozorování, kterým lze ověřit nebo vyvrátit danou hypotézu nebo poznatek o příčinných vztazích. V mechanice tekutin je pojem experiment velice rozšířený, neboť i přes velmi značný rozvoj výpočetní techniky nejsme dosud schopni řešit složité úlohy zabývající se prouděním tekutin. Experiment je velmi nákladný, ale i přesto je v mnoha případech nepostradatelný. [3], [4]

Pro zmapování rychlostního pole tekutiny proudící v trubici a stanovení rychlostního profilu proudícího média bylo nejprve nutné navrhnout, vyrobit a poté sestavit experimentální zařízení, na kterém lze danou úlohu naměřit.

3.1 Návrh trati

Experimentální PIV zařízení muselo splňovat několik požadavků. Základní požadavek vyplýval ze samotného zadání této úlohy pro dosažení kvalitních výsledků měření. Mimo jiné byl kladen důraz na budoucí využitelnost zařízení. Dalšími faktory ovlivňující návrh trati byly nízké náklady, snadná obsluha při měření a transformace celé konstrukce.

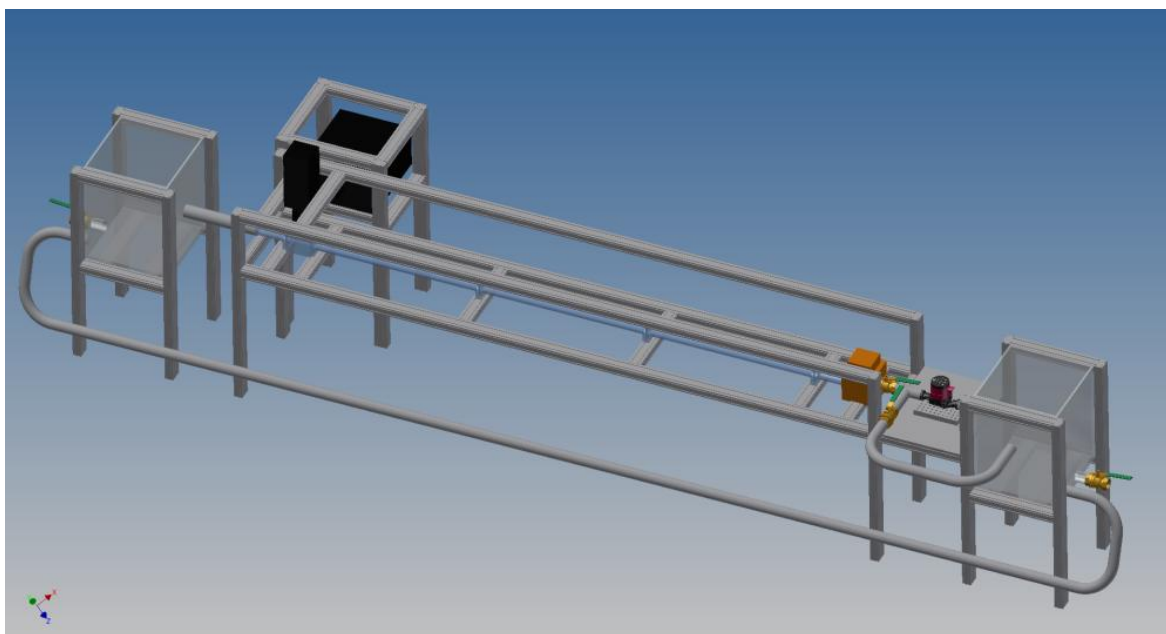
Pro splnění úlohy musí experimentální zařízení generovat ustálené, stacionární proudění. Výsledný proud v transparentní trubici určené pro měření pomocí metody PIV musí být snadno regulovatelný. Ustálené proudění je důležité nejen vytvořit, ale také zachovat v celé měřené části. Statika proudu je ovlivněna každou poruchou zanesenou do proudu. Jako médium pro úlohu byla zvolena kapalina, tedy voda H_2O . Při tvorbě návrhu bylo nutné splnit podmínky úlohy a navíc vyhovět výše uvedeným požadavkům na zařízení. Následně byly vytvořeny tři odlišné návrhy. První návrh měřicí trati znázorněný na obrázku číslo 19 vynikal velmi nízkými náklady a snadnou konstrukcí. Tento návrh nesplňoval podmínku ustáleného proudění a snadné regulace průtočného množství v transparentní trubici. Druhý návrh měřicí tratě znázorněný na obrázku číslo 20 vynikal snadnou transformací celé konstrukce a plynulou regulací průtočného množství, ale neumožňoval udržení konstantní hladiny v horní nádobě. Poslední, třetí návrh měřicí tratě znázorněný na obrázku číslo 21, splňoval všechny požadavky, kromě generování kvalitního ustáleného proudu. [3], [4]



Obrázek 19 První návrh měřicí trati.

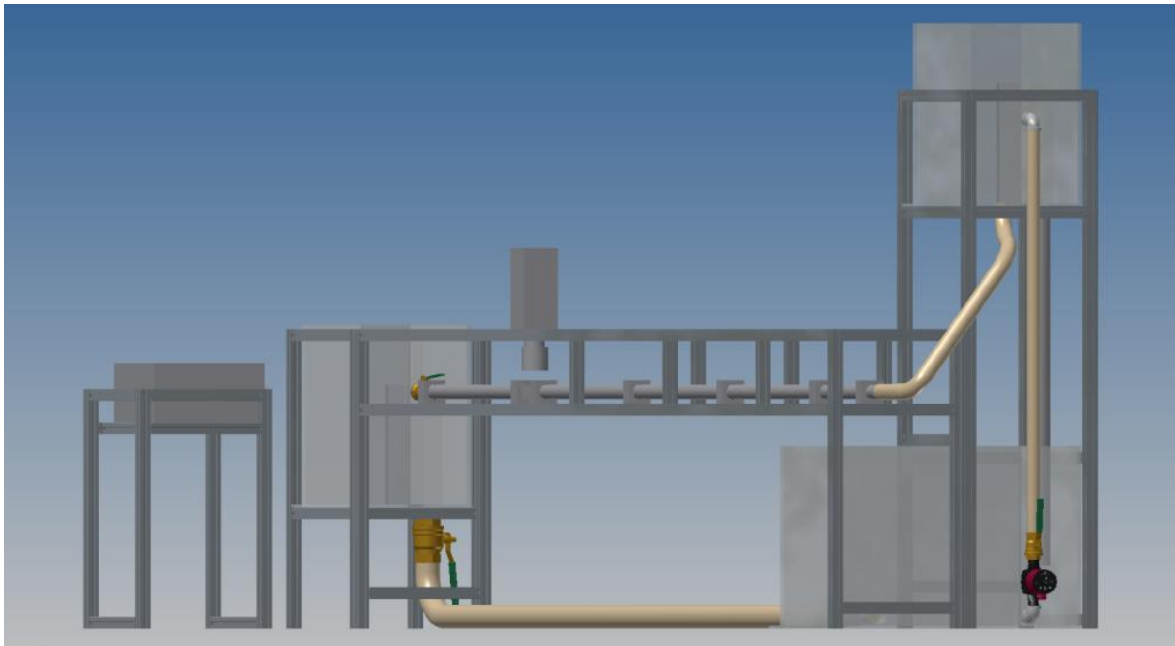


Obrázek 20 Druhý návrh měřící trati.



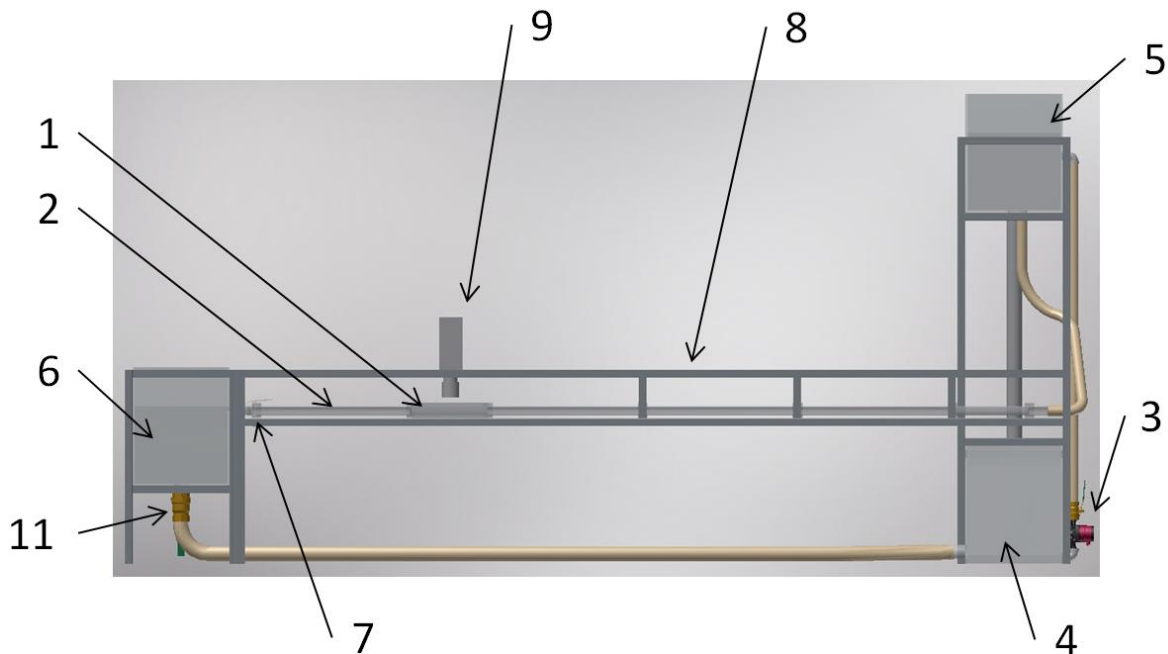
Obrázek 21 Třetí návrh měřící trati.

Všechny tři rozdílné návrhy měřící tratě negenerují kvalitní ustálené proudění v transparentní trubici. Po získání nových poznatků byla z předchozích návrhů vytvořena finální podoba experimentálního zařízení. Tento návrh splňuje veškeré požadavky kladené na měřící trať. Finální podoba návrhu měřící tratě je znázorněna na obrázku číslo 22.



Obrázek 22 Finální návrh měřicí trati.

Experimentální PIV zařízení tvoří propojená sestava tří nádob zakomponovaných do konstrukce z hliníkových profilů. Měřicí vodní trať je poháněna spádem kapaliny, a to tak, že na vstupu do měřicí transparentní trubice a na jejím výstupu se nachází dvě velké nádoby, které svojí konstrukcí udržují uvnitř nádob konstantní výšku kapaliny. Rozdílné výškové umístění nádob, respektive rozdíl výšek hladin, vytváří hydrostatický tlak, který poté se ztrátami určuje rychlost proudící kapaliny v trubici. Ztráty se regulují speciálním kulovým ventilem na výstupu z trubice. Cirkulace kapaliny do horní nádoby je zajištěna oběhovým čerpadlem umístěným ve třetí hlavní nádobě. Kapalina, která přeteče přes přepadové příčky, je samospádem svedena do třetí hlavní nádoby. Je-li zařízení nečinné, lze veškerou kapalinu shromáždit v této hlavní nádobě. Na potrubí je nainstalováno několik kulových ventilů pro snadnou regulaci kapaliny ve všech částech a pro snazší obsluhu při měření. Finální návrh měřicí trati má všechny předpoklady generovat ustálené proudění. Pro zachování ustáleného proudění byla navržena speciální sestava transparentní trubice. Výhodou finálního návrhu je mimo jiné snadná a rychlá přestavba celé konstrukce, a tím se rozšiřuje použitelnost pro veliké spektrum úloh. Při tvorbě finálního návrhu měřicí tratě se počítalo se snadnou obsluhou při měření. V následující části jsou popsány jednotlivé komponenty celé měřicí tratě. Na obrázku 23 jsou zaneseny pozice jednotlivých komponent pro lepší přehled. [3], [4]



Obrázek 23 Finální návrh měřicí tratě.

1-Transparentní část, 2-Trubice, 3-Oběhové čerpadlo, 4-Hlavní nádoba, 5-Horní nádoba s přepadem, 6-Dolní nádoba s přepadem, 7-Redukční ventil, 8-Rám z hliníkových profilů, 9-Záznamové zařízení, 11-Kulový ventil

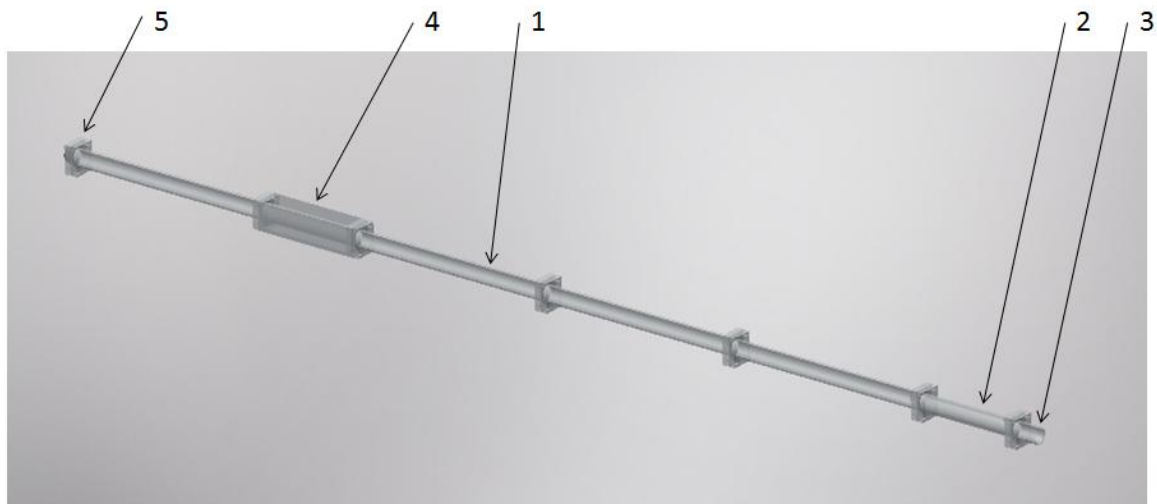
Transparentní trubice

Jako první rozměr byl stanoven vnitřní průměr kruhové trubice. Bylo důležité zvolit vhodný průměr, aby měřený transparentní prostor byl dostatečně veliký, a zároveň bylo nutné splnit i vyšší rychlosti kapaliny v trubici. To znamená, že s rostoucí hodnotou průměru trubice se zvyšuje hodnota objemového průtoku, a tím roste spotřeba kapaliny. Z praxe byly doporučeny hodnoty od Ø30 mm a výše. Do bezrozměrného vztahu Reynoldsova čísla byly postupně dosazeny hodnoty pro laminární proud. Ze vztahu byla vyjádřena střední rychlost

$$Re = \frac{w_s \cdot D}{\nu} \rightarrow w_s = \frac{Re \cdot \nu}{D}. \quad (3.1-1)$$

$$Q_v = S \cdot w_s \quad (3.1-2)$$

Z rychlosti bylo vypočteno průtočné množství pro představu o spotřebě kapaliny. Na základě mnoha výpočtů, dostupných materiálů a jejich rozměrů byla zvolena hodnota vnitřního průměru transparentní trubice na Ø40 mm se silou stěny 5 mm a za materiál trubice extrudované plexisklo. Celá sestava transparentní trubice byla navržena tak, aby bylo možné variabilně měnit vzdálenost od vstupu do trubice k transparentní měřicí části. V experimentální praxi je známo, že k dosažení kvalitního proudu v trubici se musí navíc zajistit vstupní a výstupní délka v trubici. Minimální hodnota vstupní délky je 40 x D (vnitřní průměr trubice) a pro výstupní délku je to hodnota 20 x D. Celá sestava transparentní trubice se skládá ze čtyř úseků délky 800 mm, jednoho kratšího úseku délky 400 mm, vstupní transparentní části pro připojení k hadici a transparentní měřicí části. Celková délka transparentní trubice je 4 000 mm. Všechny části mají na konci přilepené příruby pro spojení. Sestava je znázorněna na obrázku číslo 24.



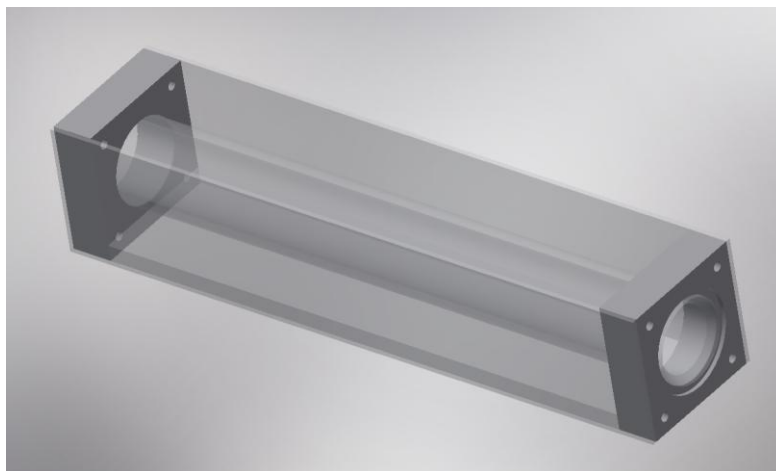
Obrázek 24 Sestava transparentní trubice.

1-Transparentní část I800, 2-Transparentní část I400, 3-Vstupní transparentní část I100, 4-Transparentní měřicí část I300, 5-Příruba,

Bylo důležité, aby sestavené části transparentní trubice na sebe správně dosedly a byly vystředěny v ose symetrie trubice. Každá nerovnost při špatném sestavení výrazně ovlivní proud kapaliny uvnitř trubice. Dále bylo nutné, aby kapalina ve spojích neunikala. Bylo zvoleno technické řešení, které splňuje všechny výše zmíněné požadavky. Čela každé části trubice byly pomocí soustruhu zarovnané na jedné straně pod úhlem 45° z vnitřní části a na druhé straně, z vnější části, také pod úhlem 45° . Tímto bylo umožněno jednotlivé transparentní části při montáži snadno vystředit. Příruby byly kvůli ceně slepeny z několika částí. Při montáži byly použity těsnící o-kroužky umístěné mezi přírubami. Po dotažení vždy čtyř šroubových spojů bylo dosaženo správného vystředění trubic a utěsnění spojů. [3], [4]

Transparentní měřicí část

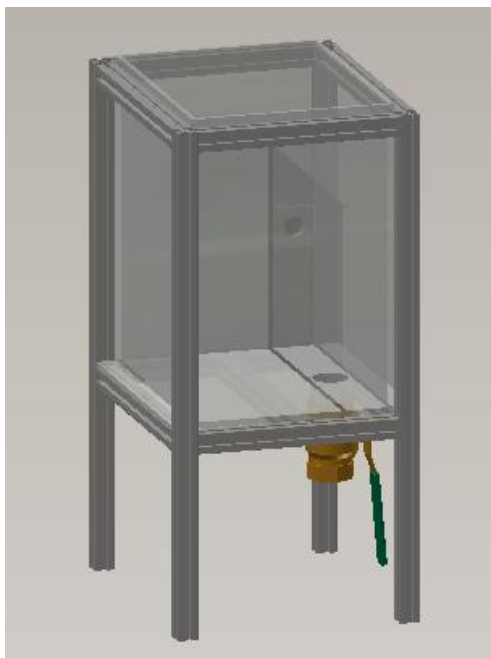
Návrh transparentní měřicí části byl obtížný. Tato komponenta musela splňovat veškeré podmínky kladené metodou PIV, dále vyrobitelnost, nízké výrobní náklady a podmínku smontovatelnosti s transparentní trubicí. Návrh, který splňoval všechny zmíněné podmínky, je zobrazen na obrázku číslo 25. Jedná se o část transparentní trubice s přírubami, na které jsou přilepené tenké desky z plexiskla. Při měření je do prostoru nalitá kapalina uzavřena a utěsněna pomocí horního víka. Kapalina slouží jako výplň prázdného prostoru a zajišťuje vhodné optické vlastnosti pro měření metodou PIV. Při návrhu bylo doporučeno použít při měření destilovanou vodu. [3], [4]



Obrázek 25 Transparentní měřicí část.

Nádoby

Byly navrženy tři nádoby – hlavní nádoba, horní nádoba s přepadem a dolní nádoba s přepadem. Hlavní nádoba byla navržena tak, aby pojala všechnu kapalinu v celé trati. Při plném naplnění byla podmínka, aby výška hladiny byla níže, než výška podstavy dolní nádoby s přepadem. Jen tak lze zajistit samospád kapaliny do hlavní nádoby. Horní nádoba s přepadem je svým tvarem podobná dolní nádobě s přepadem, liší se jen svými rozměry a vstupními otvory pro napojení. Tyto nádoby byly konstruovány tak, aby zajišťovaly konstantní výšku kapaliny s ohledem na nízké výrobní náklady. V nádobách byla instalována vložena příčka. Tato příčka rozdělila nádobu na dvě části. Ve větší části je zajištěn konstantní objem kapaliny, tedy konstantní výška sloupce kapaliny. Kapalina, která přes ni přeteče, je zachycena v druhé části nádoby, odkud je svedena zpět do hlavní nádoby. Rozměry nádob byly určeny na základě hodnoty objemového průtoku. Po stanovení vnitřního průměru transparentní trubice byl vypočten objemový průtok pro vyšší rychlosti, které odpovídají hodnotám Reynoldsova čísla větších než $3 \cdot 10^5$. Toto bylo důležité pro správné dimenzování celého zařízení. Pokud by nádoba měla malý objem, tak větší množství kapaliny přitékající do ní by výrazně ovlivnilo konstantní výšku hladiny a navíc by nebylo možné uvažovat ustálené proudění. Nádoby byly svými rozměry dostatečně dimenzované na větší objemové průtoky. Hlavní nádoba byla umístěna na gumové podložce na podlaze. Horní nádoba a dolní nádoba s přepadem byly umístěny do konstrukcí na zpevněné podstavě. Materiálem, použitým na nádoby, bylo zvoleno transparentní plexisklo. Na obrázku číslo 26 je znázorněna sestava dolní nádoby s přepadem umístěné v rámu. [3], [4]



Obrázek 26 Dolní nádoba s přepadem v rámu.

Regulace průtoku kapaliny

Pro regulaci průtoku kapaliny v trubici byl zvolen speciální regulační kulový ventil Ivar.TopBall 6/4" umístěný na výstupu z transparentní trubice. Tento ventil má rozdílnou konstrukci ovládacího mechanismu. Místo přímé vazby mezi pákou ventilu a kulovým prvkem pro regulaci má lineární převod, kdy mezi plným otevřením a plným uzavřením je 270° . Další výhodou je speciální silonové uložení kulového redukčního prvku v tělese ventilu, které nezpůsobuje kmitání kulového prvku.

Čerpadlo

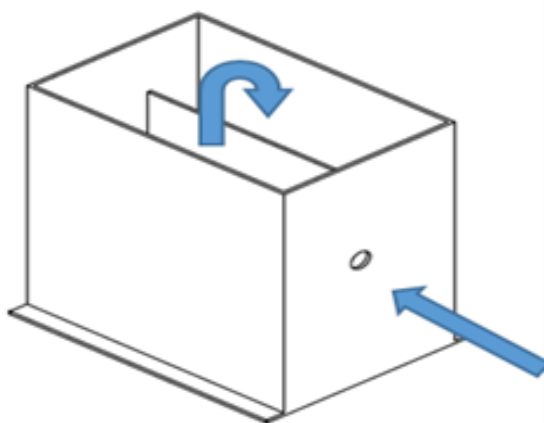
Při návrhu bylo zvoleno oběhové čerpadlo Grundfos ALPHA2 25-40, které bylo umístěné u dna hlavní nádoby a pomocí hadice bylo propojené s horní nádobou. Čerpadlo pouze dopravuje kapalinu z hlavní nádoby do horní.

Rám

Celá konstrukce byla navržena z hliníkových profilů o rozměru 40x40 mm s šířkou drážky 8 mm. Konstrukce byla navržena tak, aby byla dostatečně tuhá. Bylo také důležité použít co nejméně materiálu při zachování dané tuhosti a dále byla koncipována pro umožnění snadné přestavby zařízení. Délka celé konstrukce činí 4 800 mm, šířka je 960 mm a výška je 2 200 mm.

Měření objemového průtoku v trubici

Při návrhu bylo důležité vyřešit problém se zjištěním střední hodnoty rychlosti kapaliny v trubici. Při nízkých hodnotách Reynoldsova čísla je v trubici velmi malá rychlost kapaliny. Takto malá rychlost je obtížně běžnou technikou změřitelná. Indukční průtokoměry, které jsou finančně dostupné, ji změří s velikou chybovostí. Ultrazvukové průtokoměry jsou velmi nákladné. Pro experimentální zařízení byla zvolena „kýblová“ metoda, která je velmi přesná, ale nepohodlná. Tato metoda spočívá v měření objemu kapaliny, která přiteče do nádoby umístěné na výstupu z transparentní trubice za časový úsek. Jestliže je znám průměr potrubí, lze snadno vypočítat průměrnou rychlost v trubici. Pro tuto metodu byla upravena dolní nádoba s přepadem, kde na výstupu z přepadové komory byl umístěn kulový ventil. Jestliže se kulový ventil uzavře, kapalina, která se jinak samospádem vrací zpět do hlavní nádoby, zůstává v přepadové komoře. Na stěně nádoby byla umístěna číselná stupnice. Výška, do které za daný časový úsek kapalina vystoupá, udává po vynásobení plochy podstavy přepadové části objem vyteklé kapaliny. Na obrázku číslo 27 je znázorněné schéma „kýblového“ toku kapaliny v nádobě. Tato metoda je velmi jednoduchá a levná. [3], [4]



Obrázek 27 Schéma toku kapaliny v nádobě

Příslušenství

Celé zařízení se skládá ze tří nádob, které jsou různě propojeny. Pro napojení hadice na nádoby bylo navrženo použít PVC průchodky, které se jednoduchou montáží prostrčí připravenými otvory v nádobách, protikusem dotáhnou a utěsní. Na průchodky bylo nalepené PVC příslušenství a kulové ventily. Propojení dolní nádoby s hlavní nádobou bylo patřičně dimenzováno. Vnitřní průměr hadice a kulového ventilu byl zvolen

na hodnotu $\varnothing 75$ mm. Tento rozměr zajišťuje, že kapalina při vyšších hodnotách objemového průtoku snadno oteče z přepadové komory do hlavní nádoby. [3], [4]

Modely CAD systému a následně vytvořené výrobní výkresy lze nalézt na přiloženém CD.

3.2 Realizace trati

Po dokončení a schválení finálního návrhu byly vytvořeny výrobní výkresy jednotlivých komponent. Pro přehled a plánování byl vytvořen seznam se všemi komponentami. Nejprve bylo nutné najít firmu, která dokáže vyrobit komponenty z plexiskla a dále firmu, která vyrobí celou konstrukci rámu. Po zjištění materiálu, doby a ceny výroby byly objednány ostatní komponenty. Z důvodu potřeby snížení nákladů bylo celé zařízení kompletováno pomocí vlastních sil na Fakultě strojní, Západočeské univerzity v Plzni. Při kompletaci byl nejprve sestaven hlavní rám pro transparentní trubici. Pro vyšší tuhost byly použity při montáži hliníkové úhelníky. Poté byl sestaven rám pod dolní nádrž s přepadem a rám pro horní nádrž s přepadem. Na rámy byly nainstalovány stavitelné prvky pro vyrovnání celého rámu do roviny. Vyrobené nádoby z plexiskla byly zkompletovány s příslušenstvím a upevněny do rámu. Celé zařízení bylo umístěno v laboratoři na Katedře energetických strojů. Následně byla složená sestava transparentní trubice umístěna do rámu a pomocí plastových úhelníků ukotvena. Poté byly nainstalovány zbylé hadice, čerpadlo a speciální redukční ventil. Na závěr byly všechny spoje zkontrolovány a dotaženy. [3], [4]



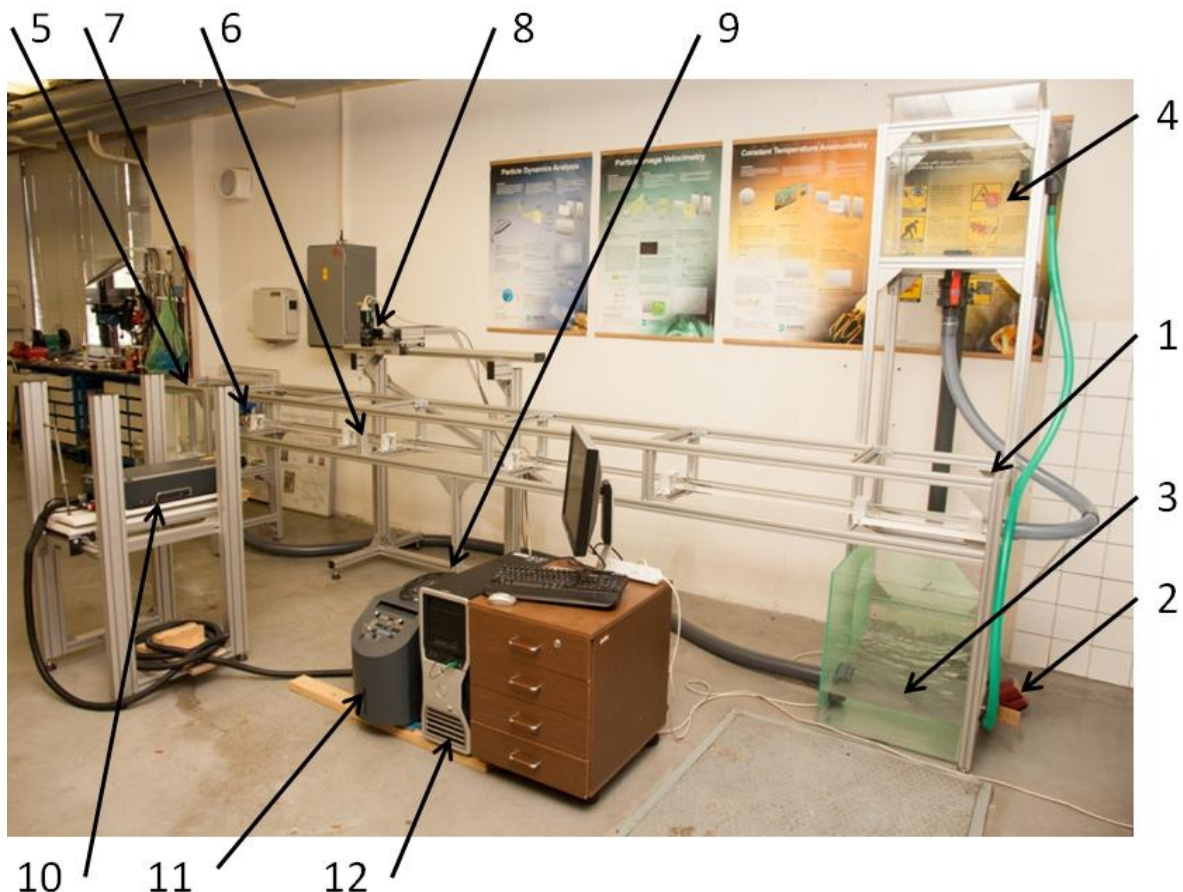
Obrázek 28 Kompletace jednotlivých částí měřící trati.

4 MĚŘENÍ

4.1 Příprava měření

4.1.1 Ověření funkčnosti měřící trati

Po sestavení celé konstrukce měřící trati a kompletaci všech komponent bylo zařízení naplněno kapalinou. Následně byl proveden krátký test na těsnost všech spojů a na správnou funkčnost celého celku. Nejprve byla ověřena funkčnost oběhového čerpadla a správná činnost všech kulových ventilů. Na závěr byl proveden test na zjištění maximální možné rychlosti, která může být v trubici dosažena, to znamená, že oběhové čerpadlo bylo puštěno na plný výkon. Redukčním ventilem byl postupně zvyšován průtok v trubici. V horní nádobě byla sledována konstantní hladina, tedy jestli není přepad nulový. V koncové nádobě se pomocí „kýblové“ metody měřil maximální objemový průtok trubici. Po testu, kterým byl ověřen maximální výkon čerpadla, následovala možnost plynulé regulace pomocí speciálního kulového ventilu Ivar.TopBall. Ventilem se postupně otáčelo a každá změna pootočení byla změřena „kýblovou“ metodou. Pomocí testů byla ověřena správná činnost celého experimentálního PIV zařízení. Při testování nebyla nalezena žádná netěsnost a zařízení bylo shledáno funkčním. Následně mohl začít proces přípravy na měření. K experimentálnímu PIV zařízení byly nainstalovány komponenty PIV systému Dantec. Celá sestava je znázorněna na obrázku číslo 29.



Obrázek 29 Sestava celého experimentálního PIV zařízení.

1-Rám z hliníkových profilů, 2-Oběhové čerpadlo, 3-Hlavní nádob, 4-Horní nádob s přepadem, 5-Dolní nádob s přepadem, 6-Měřící transparentní část, 7-Redukční ventil, 8-Kamera, 9-Transmitter, 10-Laser
11-Ovládací stanice laseru, 12-Počítač

4.1.2 Nastavení komponent PIV

Nejprve byl nainstalován rám z hliníkových profilů s pohyblivým upevněním pro kameru. Po vyrovnaní rámu byla upevněna kamera. Následně byl upevněn rám z hliníkových profilů s pohyblivým upevněním pro laser. Po vyrovnaní rámu byl nainstalován laser. Laser byl propojen speciálním vodičem a hadicemi s ovládací stanicí, ve které je zabudováno vodní chlazení laseru. Dále byly nainstalovány zbylé komponenty, jako počítač s příslušenstvím a synchronizér. Vše bylo propojeno pomocí příslušných vodičů. Po zkontrolování správnosti zapojení celého celku byl nejprve spuštěn počítač a následně software *DynamicStudio* v.2.30 firmy Dantec.

V první řadě bylo nezbytné co nejlépe nastavit kameru. Nejprve byl nastaven obraz snímané oblasti. S kamerou se postupně pohybovalo pro dosažení co nejvyšší kvality obrazu. Nejvyšší kvalita obrazu byla při umístění objektivu ve vzdálenosti 235 mm od osy symetrie transparentní trubice. Zbylé směry byly nastaveny tak, aby snímaná oblast byla symetrická k šířce trubice a v polovině délky transparentní měřicí části trubice. Po nastavení kamery do správné polohy a zaostření obrazu, byla provedena kalibrace kamery v systému *DynamicStudio*.

Po odladění snímaného obrazu byla nastavena laserová rovina. Podobně jako s laděním kamery se pohybovalo s laserem, a to pomocí pohyblivého upevnění, které dovoluje jemné nastavení konečné polohy. Nejprve se nastavila výška světelné roviny tak, aby byla v ose symetrie transparentní trubice, poté byla nastavena vzdálenost ohniska laseru od osy transparentní trubice na hodnotu 585 mm. Na závěr bylo manipulováno s laserem tak, aby jeho osa protínala osu kamery, tedy v polovině délky transparentní měřicí části trubice.

Použité komponenty

- Kamera s CCD senzorem (FlowSense 4M), rozlišení 2048 x 2048 pixelů
- Objektiv - Nikon AF Micro Nikkor 60mm f/2.8D
- Laser - dvoudutinový Nd:YAG laser Solo - 200TX, 2 x 200 mJ, 15Hz

4.1.3 Sycení kapaliny

Po nastavení PIV komponent byly do kapaliny přidány sytící částice. Kapalina se nacházela jen v hlavní nádobě. Tato nádoba slouží mimo jiné k rozmíchání sytících částic. Nejprve byly sytící částice rozmíchány v malém množství kapaliny a postupně byly přidány do nádrže. Rozmíchané částice byly přidávány v malém množství tak, aby bylo dosaženo požadované koncentrace sytících částic v kapalině. Později byla promíchaná kapalina v nádrži vpuštěna do celého oběhu. Bylo vytvořeno pár snímků pro objektivní zjištění množství sytících částic v kapalině. Pro sycení kapaliny byly použity částice HGS-10 (Hollow Glass Spheres) od firmy Dantec. Tyto skleněné částice jsou duté a mají průměr 10 μm . Výhoda nízké hmotnosti a kulový tvar zajišťuje dokonalé kopírování proudu kapaliny a předurčuje kvalitní výsledky měření.

4.1.4 Demonstrační měření

Následně byl naplněn měřicí prostor kolem transparentní trubice kapalinou a zakrytován horním víkem z plexiskla. Všechny odrazové plochy v měřicí oblasti byly z hlediska bezpečnosti zakryty pomocí tmavé textilie.

Před demonstračním měřením byl nastaven redukční ventil a čerpadlo na 3. stupeň výkonu pro měření. Kontrolním měřením byl objeven problém s odrazy světla do snímané roviny. Tyto světelné odrazy se ve snímané rovině zobrazují jako velké bílé plošky a sytící částice unášené proudem nejsou kvůli těmto bílým ploškám identifikovatelné. Při použití těchto

chybných měření by po analýze byly výsledky nepoužitelné. Světelné odlesky vznikají při dopadu laserového paprsku na plochu plexiskla, kde se část světla odráží i šíří více směry. Pomocí tmavých matných prvků, kterými byl měřený prostor zamaskován, byly světelné odrazy odfiltrovány. Poté bylo experimentální PIV zařízení připravené k měření. [3], [4]

4.2 Měření

Experimentální PIV zařízení již bylo připravené k samotnému měření. Tato kapitola popisuje měření, při kterém byla naměřena data. Před každým měřením byla nejprve naměřena teplota kapaliny pomocí infračerveného teploměru PTSI9A1 IAN100042 značky PowerFix. Způsob měření teploty je znázorněn na obrázku číslo 30.



Obrázek 30 Měření teploty kapaliny pomocí infračerveného teploměru.

Poté byla nastavena hodnota průtočného množství v transparentní trubici. Nejprve byla nastavena hodnota na stupnici redukčního ventilu a následně byla pomocí „kýblové“ metody hodnota objemového průtoku v trubici ověřena. Ukázalo se, že pomocí stupnice na redukčním ventilu nelze přesně nastavit hodnotu průtoku v trubici, a proto pomocí „kýblové“ metody byla požadovaná hodnota doladěna. V následujících vztazích je popsán výpočet Reynoldsova čísla z naměřených hodnot. Kinematická viskozita je závislá na teplotě a její hodnota byla vždy odečtena z tabulek podle aktuálně naměřené hodnoty teploty. Naměřené hodnoty pro jednotlivá měření jsou zaznamenány v tabulce číslo 3.

$$Q_v = \frac{V}{t} = \frac{h \cdot (a \cdot b)}{t} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot w_s \rightarrow w_s = \frac{h \cdot (a \cdot b) \cdot 4}{t \cdot \pi \cdot D^2} \quad (4.2-1)$$

$$Re = \frac{w_s \cdot D}{\nu} \quad (4.2-2)$$

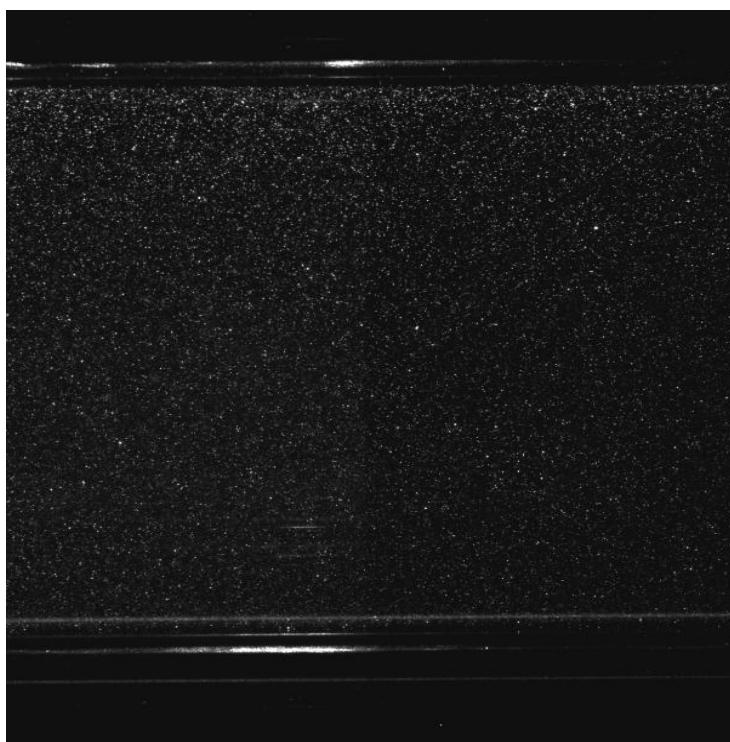
Po nastavení požadované hodnoty Reynoldsova čísla bylo možné začít s měřením. Pomocí funkce *Preview* bylo před samotným měřením provedeno krátké měření, sloužící k ověření vhodně nastavených parametrů v softwaru *Dantec DynamicStudio*. Parametry jsou čas mezi pořízením jednoho dvojsnímku (čas mezi dvěma pulsy laseru) a počet dvojsnímků pro jedno měření. Parametr času byl při každém měření rozdílný, protože je závislý na rychlosti kapaliny v trubici. Po kontrole vhodně nastavených parametrů již bylo provedeno měření, které bylo následně uloženo do paměti PC.

Celkem bylo provedeno 5 měření při různých hodnotách průtoku v trubici i různých teplotách kapaliny. Měření probíhala ve dvou dnech a teplota v laboratoři nebyla

konstantní. Při měření bylo vždy uloženo 200 dvojsnímků. Podmínky, při kterých probíhala měření, jsou uvedeny v tabulce číslo 3. Na obrázku číslo 31 lze vidět jeden pořízený snímek. [3]

Tabulka 3 Naměřené hodnoty pro jednotlivé měření.

Měření	Teplota T [°C]	Výška sloupce h [mm]	Čas t [s]	Reynoldsovo číslo [-]
1.	17.2	38	180	1194
2.	17.6	54	180	1713
3.	17.9	94	180	3010
4.	18.4	155	180	5011
5.	18.9	303	180	9985



Obrázek 31 Záznam PIV obrazu.

4.3 Vyhodnocení naměřených dat

Pořízené záznamy z každého měření byly zhlédnuty. Snímky na kterých byly objeveny vady, např. shluk částic nebo nečistoty v kapalině, které negativně rozptylují světlo z roviny světelného řezu do roviny objektivu kamery, byly odstraněny (těchto snímků bylo jen velmi malé množství). Tyto snímky by negativně ovlivnily výsledky měření. Po odstranění nekvalitních snímků byla provedena na zbývajících záznamech analýza.

Nejprve byla použita funkce *Masking*, kterou byly u každého snímku oříznuty oblasti okolo proudového pole. Následně na upravené záznamy byla použita Adaptivní korelace (viz kapitola 2.3.3), jejímž výsledkem je vektorové pole pro každý snímek. Pomocí funkce *Vector Statistic* byla z výsledků Adaptivní korelace vytvořena jedna vektorová mapa. Tato vektorová mapa je výsledek jednoho měření. Z výsledku funkce *Vector Statistic* byl pomocí funkce *Profile Plot* vygenerován rychlostní profil. Tento postup analýzy naměřených dat byl aplikován na každé měření. [3]

4.4 Chyba měření

Tato kapitola se věnuje rozdělením chyb měření. Při měření vzniká rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou měřené veličiny. Tento rozdíl se nazývá chyba měření a vzniká u každého měření. Je velká řada vlivů, které mají vliv na odchylku měření. Při měření je žádoucí provádět samotné měření i následné vyhodnocení s co nejmenšími chybami. Podle příčin vzniku jsou chyby rozděleny na hrubé, soustavné a nahodilé.

Hrubé chyby

Tento druh chyb vzniká často při nepozornosti, chybné obsluze či selhání měřicí aparatury, nesprávným odečítáním naměřených hodnot nebo chybným zapsáním výsledků měření, apod. Hrubé chyby není možné korigovat a je třeba je ze zpracování odstranit. Vždy je zapotřebí měření opakovat.

Soustavné chyby

Soustavná chyba je dána především přesností měřicího přístroje a metodou použitou při měření. Tato chyba se přičítá k naměřené hodnotě a při opakovaném měření za stejných podmínek má konstantní hodnotu. Je možné, že tato hodnota je závislá na čase nebo na cyklech měření v důsledku stárnutí měřicího přístroje. Pokud je chyba známa, lze ji matematicky korigovat. Občas může být obtížné tento typ chyby odhalit.

Nahodilé chyby

Nejčastěji uvažujeme o součtu velkého množství malých rušivých vlivů, které ovlivňují výslednou hodnotu. Nahodilou chybu nelze zcela odstranit a z jednoho měření ji nelze ani stanovit. Lze ji odhadnout pouze při opakovaném měření pomocí statistického zpracování naměřených hodnot. Minimální počet měření pro statistické zpracování je 5-10. Maximální počet měření bývá omezen časem, náklady, apod. Více než 100násobné opakování zpravidla již výrazněji nezpřesňuje výsledek. V případě této práce bylo při měření naměřeno 200 dvojsnímků, které byly dále analyzovány. [2], [9]

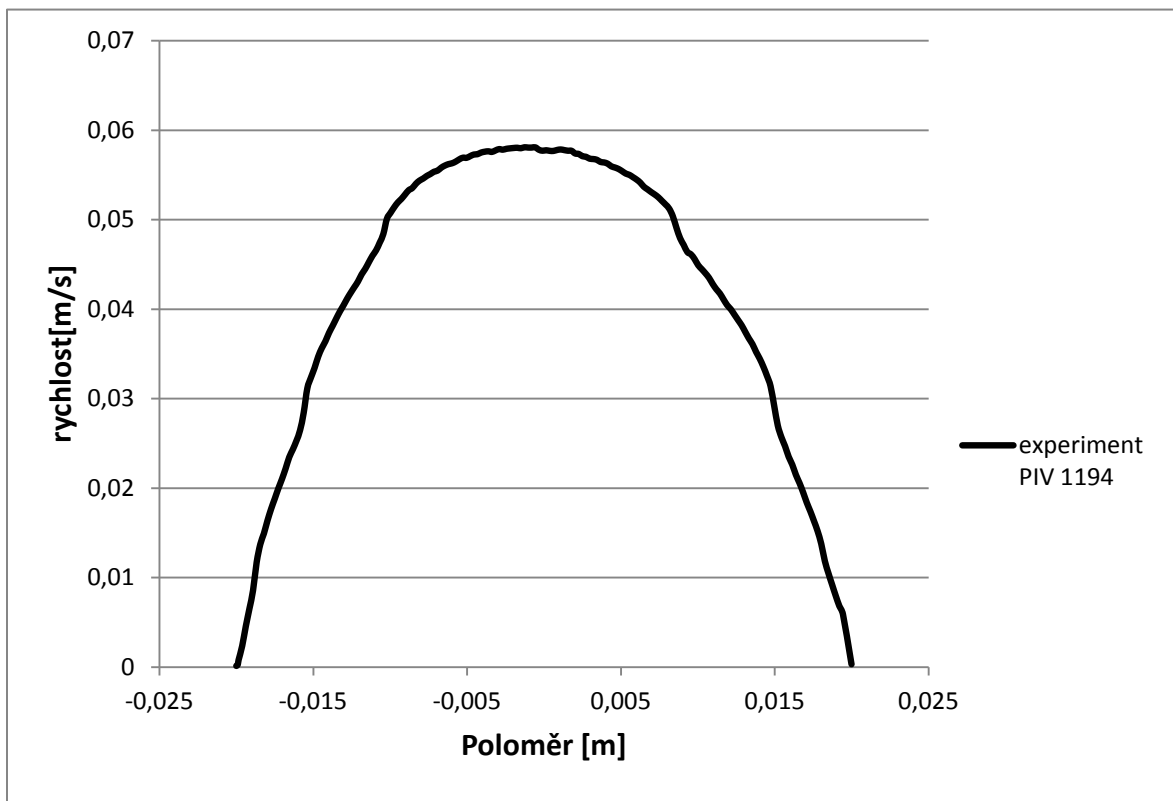
Problematika týkající se chyby měření je velmi složitá a není cílem této práce, a proto je zde uvedeno pouze základní rozdělení a vysvětlení.

4.5 Výsledky

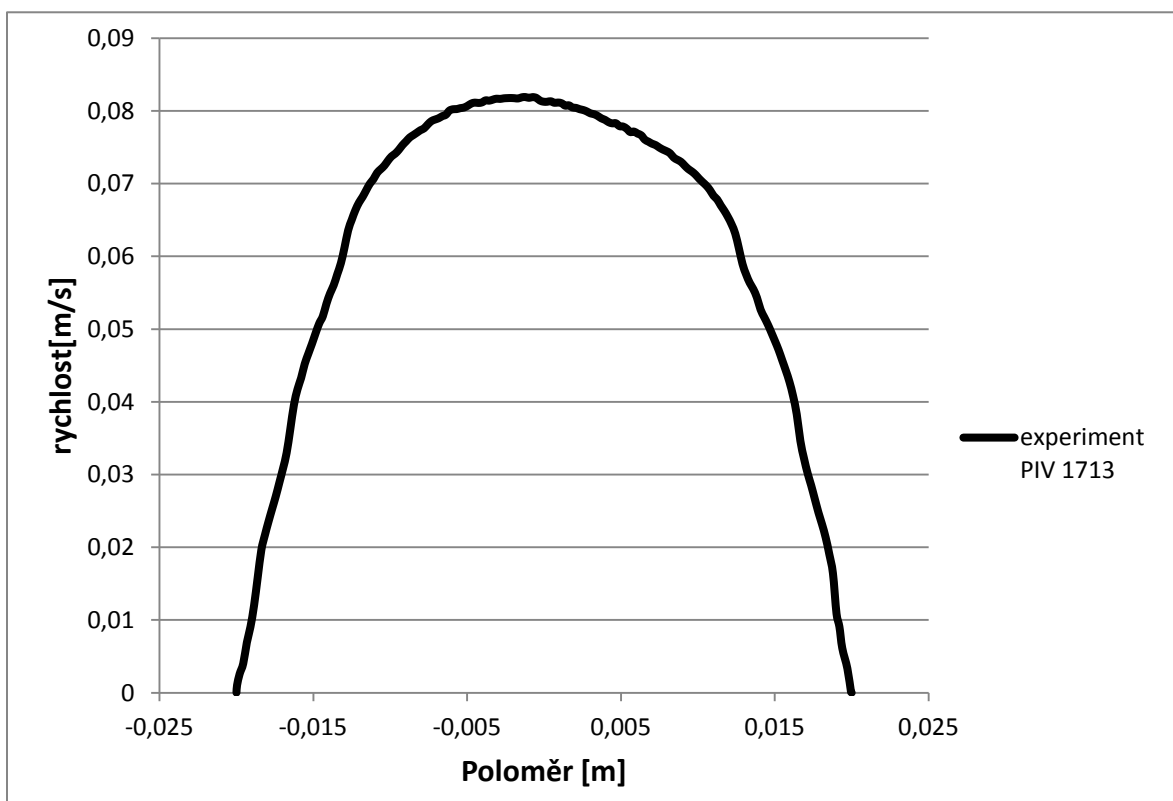
Tato kapitola se zabývá zhodnocením analýzy naměřených dat. Celkem bylo provedeno pět měření pro různé hodnoty Reynoldsova čísla, viz tabulka číslo 3. Výsledek každého měření je znázorněn ve formě grafu rychlostního profilu, který byl vytvořen pomocí funkce *Profile Plot* v *DynamicStudio*. Obrázky rychlostních profilů jsou znázorněny níže. Hodnota Reynoldsova čísla byla stanovena pomocí „kýblové“ metody. Jak se ukázalo, při každém měření nebyla shodná teplota proudící kapaliny. Navíc odečítání výšky sloupce kapaliny, která přeteče přes přepadovou příčku, nelze provést s přesností větší než je 1 mm, a proto vypočtená hodnota Reynoldsova čísla z naměřených hodnot byla pouze orientační. Z obrázků 32 a 33 rychlostních profilů je patrný laminární rychlostní profil. Pro přechodovou oblast proudění je Reynoldsovo číslo definováno v intervalu od 2320 až do 4 000. Z obrázku 34 rychlostního profilu je patrné, že pro hodnotu $Re = 3\,010$ bylo v tomto případě dosaženo stále laminárního proudění. Rychlostní profil pro laminární proudění má parabolický tvar. Hodnota Reynoldsova čísla se zvyšuje se zvyšující se rychlostí. V proudě se začínají vytvářet malé struktury vírů, které s rostoucí rychlostí narůstají. Rychlostní profil pro turbulentní proud má u stěn velký gradient rychlosti a ve středu trubice se vytváří plochá část. Na obrázků 35 a 36 rychlostních profilů je již

vidět průběh turbulentního proudění. Na obrázku 36 je vidět, jak je obtížné zachytit velmi nízké rychlosti u stěny.

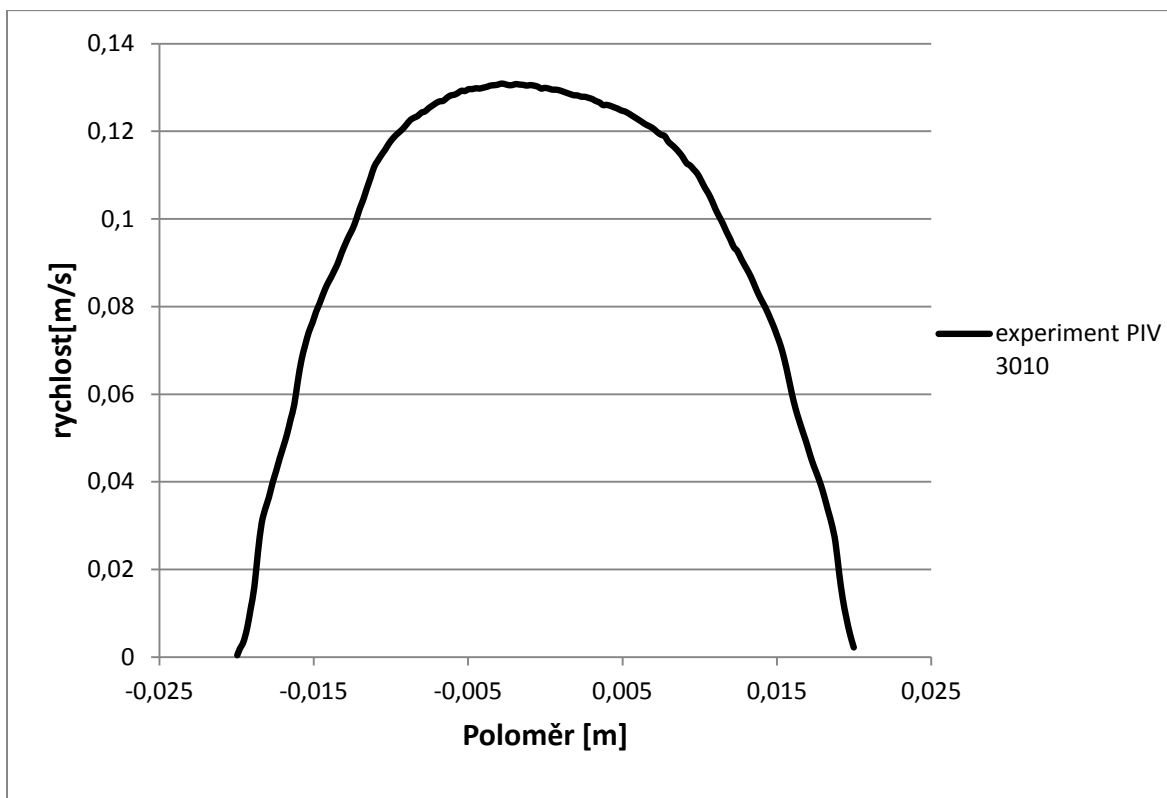
V následující kapitole jsou rychlostní profily porovnány s CFD výpočty.



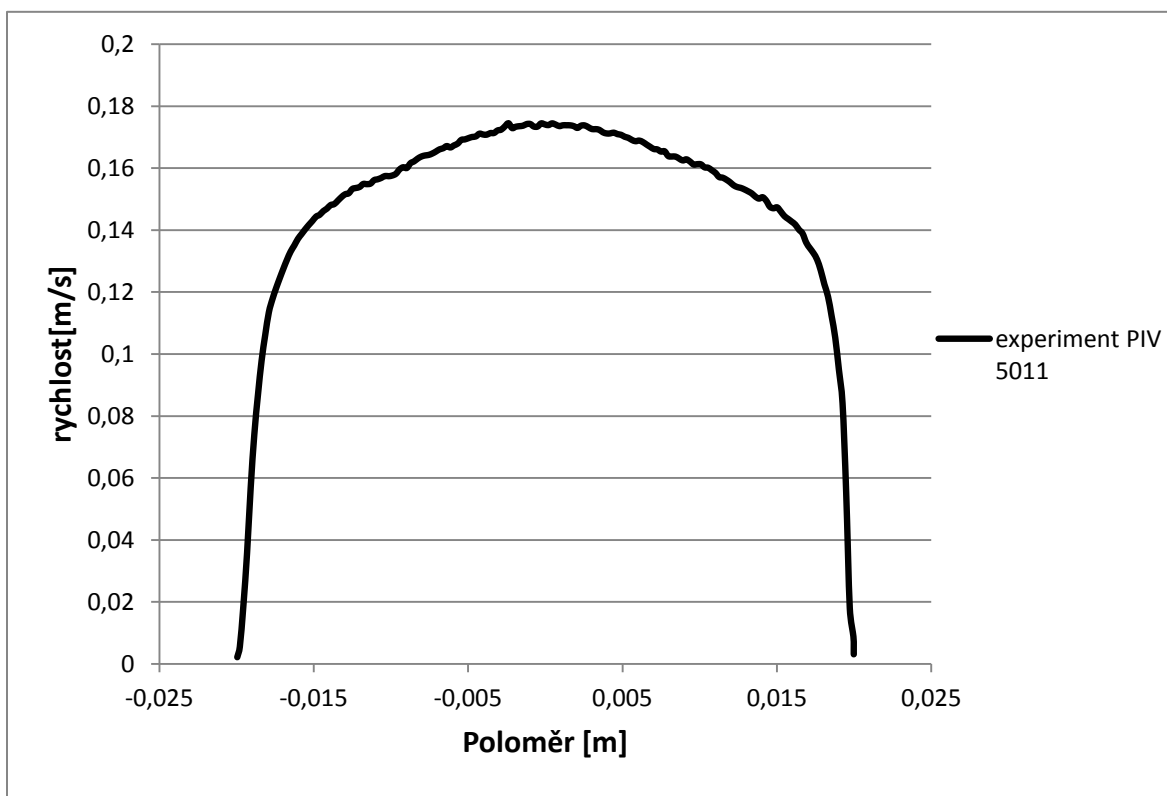
Obrázek 32 Rychlostní profil pro hodnotu $Re = 1194$.



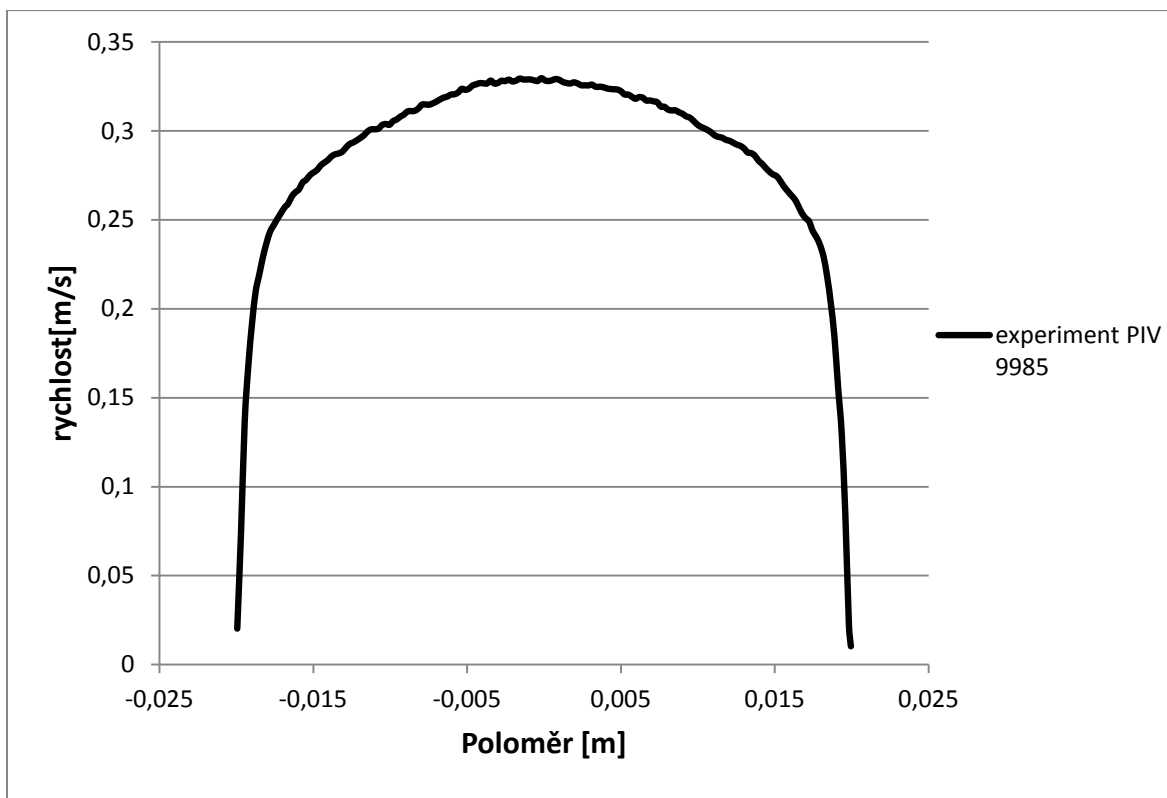
Obrázek 33 Rychlostní profil pro hodnotu $Re = 1713$.



Obrázek 34 Rychlostní profil pro hodnotu $Re = 3\ 010$.



Obrázek 35 Rychlostní profil pro hodnotu $Re = 5\ 011$.

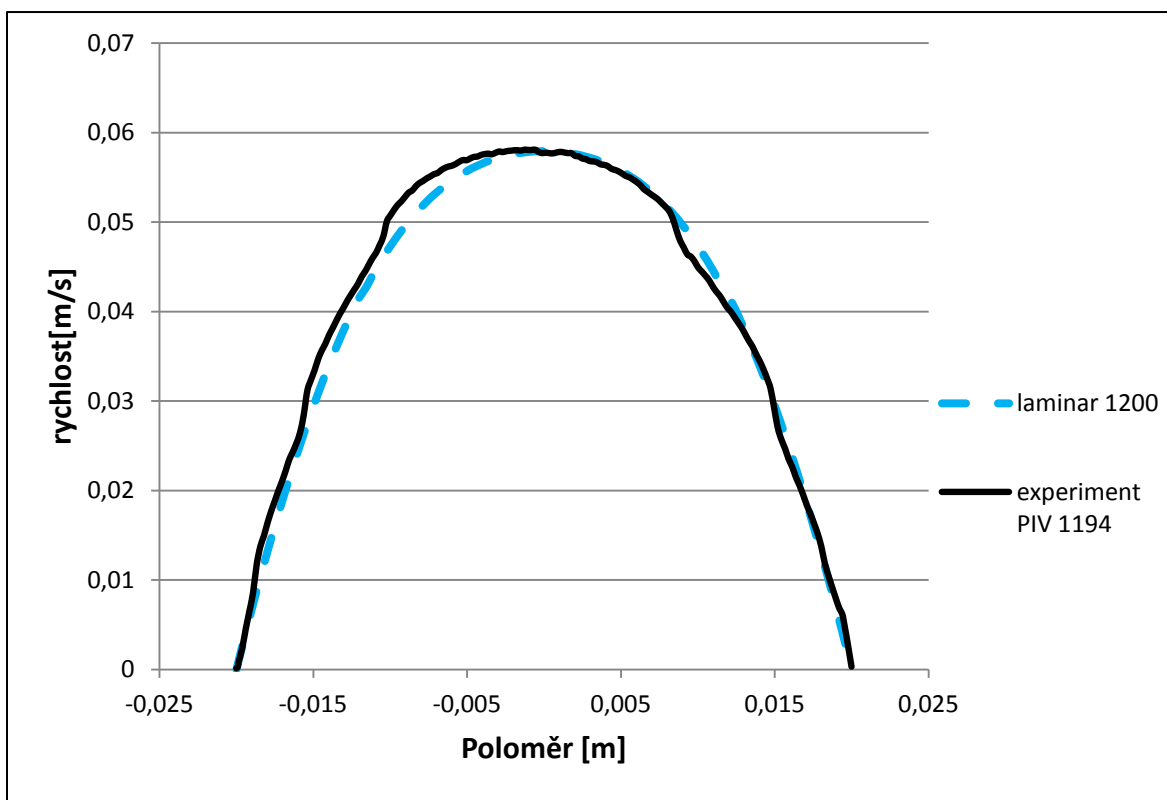


Obrázek 36 Rychlostní profil pro hodnotu $Re = 9985$.

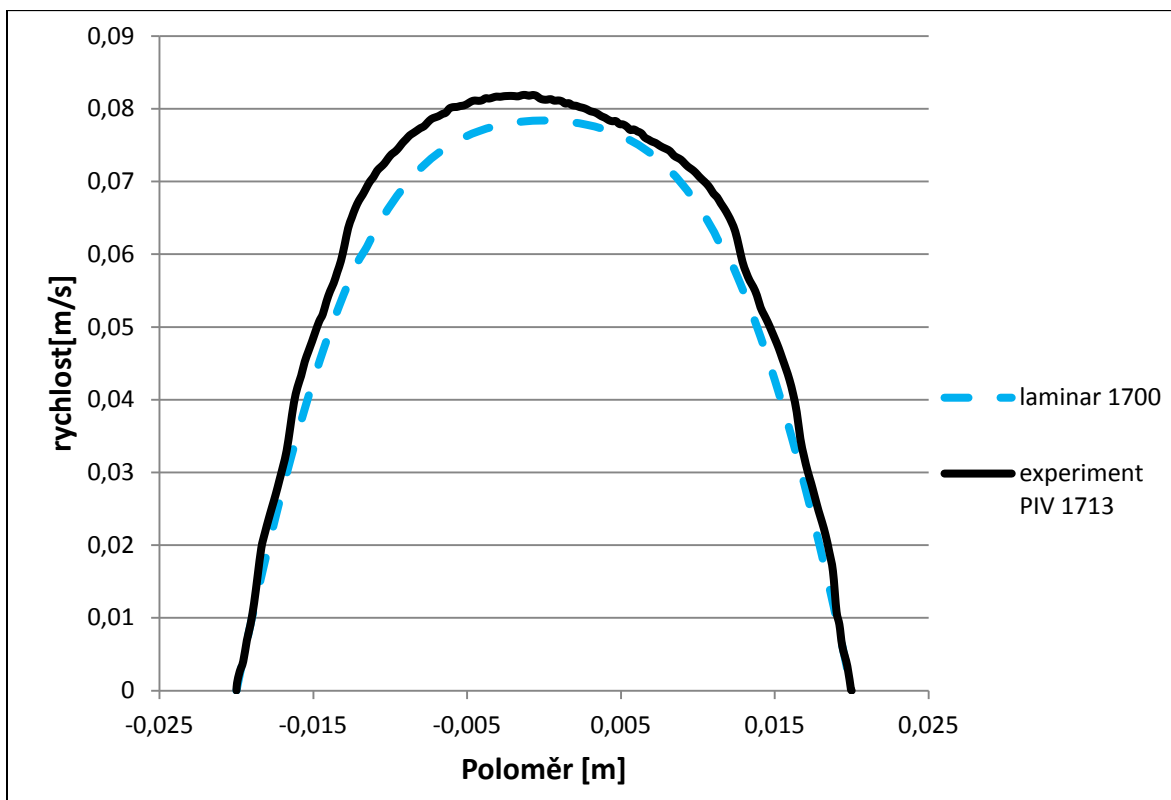
5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU S CFD

Tato kapitola se věnuje porovnání naměřených výsledků s výsledky CFD výpočtů. Výpočty a výsledky CFD výpočtů jsou sepsány v bakalářské práci pana Tomáše Klímy – Zmapování proudového pole kapaliny proudící v trubici pomocí CFD výpočtu. Níže jsou uvedeny obrázky, kde jsou porovnány výsledky obou metod zjištění rychlostního pole pro Reynoldsova čísla: $Re = 1\,200$, $1\,700$, $3\,000$, $5\,000$, $10\,000$. [5]

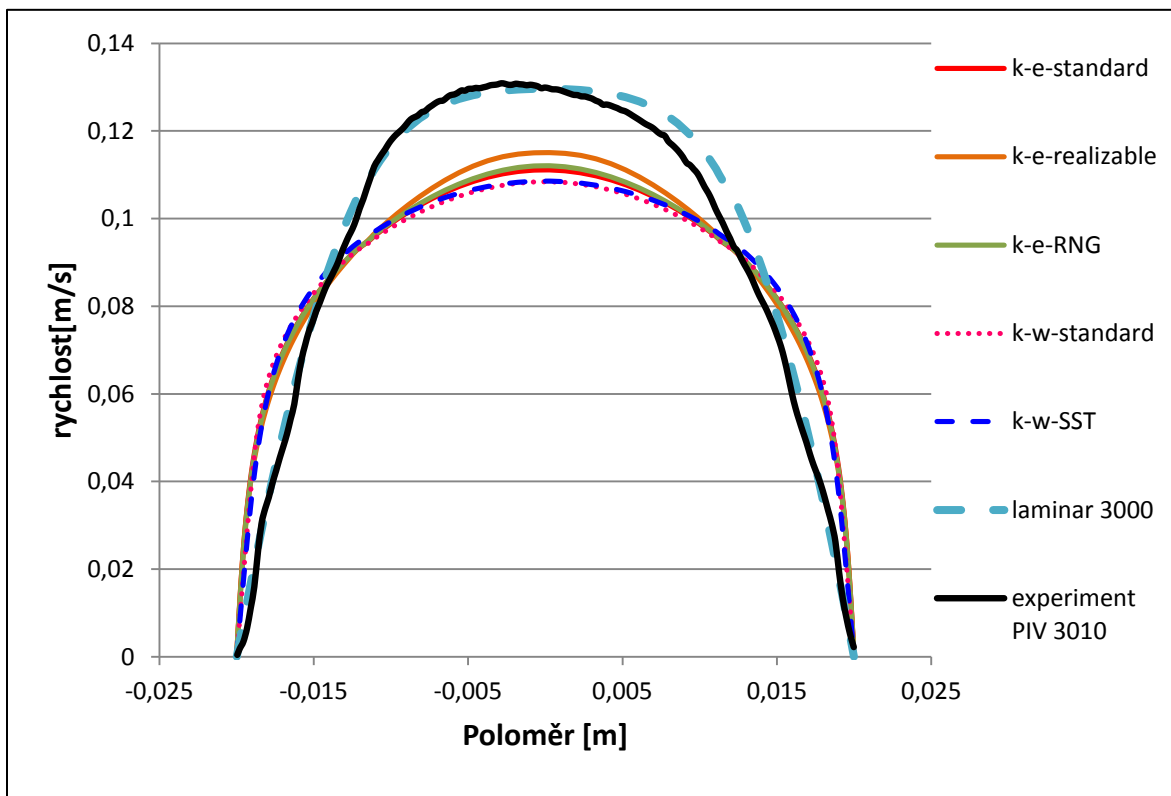
Z obrázku 37 je patrné, že rychlostní profil naměřený experimentem je mírně odkloněný doleva od rychlostního profilu CFD výpočtu. Toto odklonění může být způsobeno špatně nastavenou kamerou, kdy měřená plocha není rovnoběžná s transparentní trubicí, ale je mírně pootočená. Z obrázku je také vidět, že rychlostní profil nekopíruje křivku ideálního laminárního rychlostního profilu. Průběh experimentálně zjištěného rychlostního profilu není hladký. Takto zdeformovaný průběh rychlostního profilu může být způsoben optickými a výrobními vadami transparentní trubice. Všechny výše uvedené nedostatky lze pozorovat i na ostatních obrázcích. U obrázku 39 bylo ověřeno, že při hodnotě Reynoldsova čísla $Re = 3\,000$ je proudění stále laminární. Při porovnání rychlostních profilů pro Reynoldsova čísla $5\,000$ a $10\,000$ byl nalezen turbulentní rychlostní profil. Experimentálně zjištěnému rychlostnímu profilu byl nejvíce podobný výsledek CFD výpočtu s použitím turbulentního modelu $k-\omega$ SST. [5]



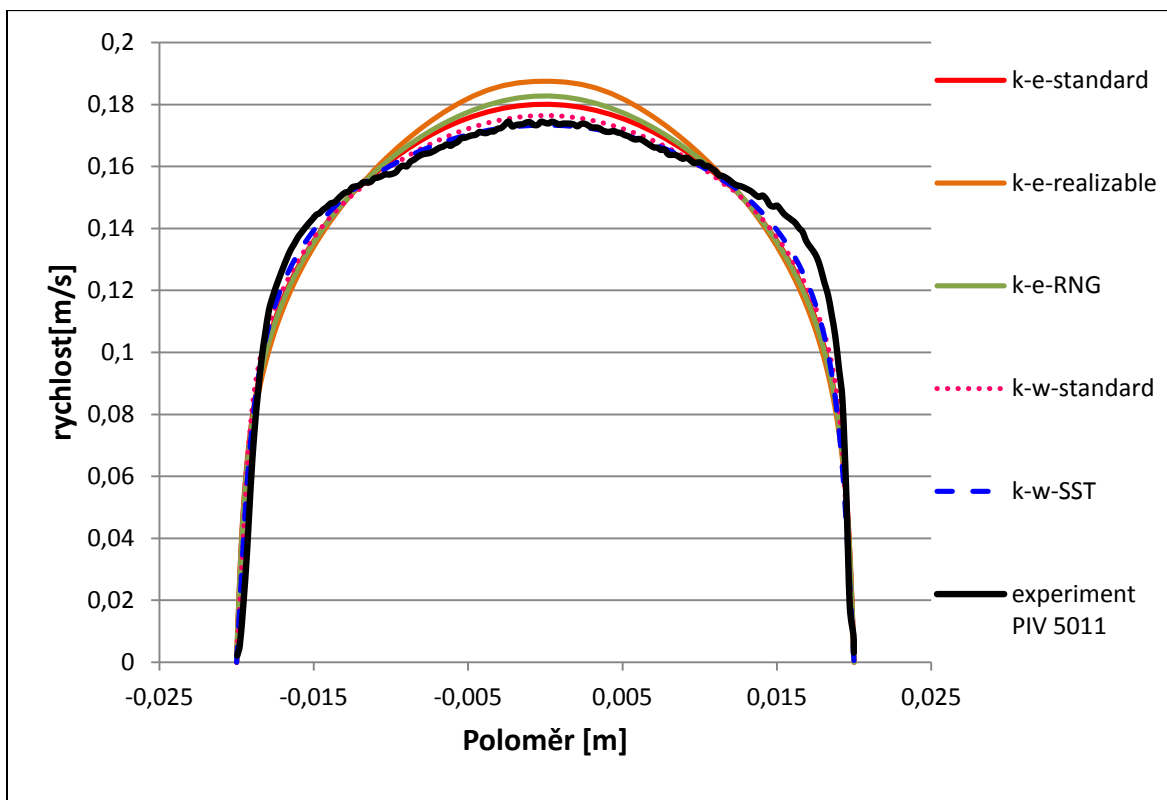
Obrázek 37 Porovnání experimentu s výpočtem, $Re = 1\,200$.



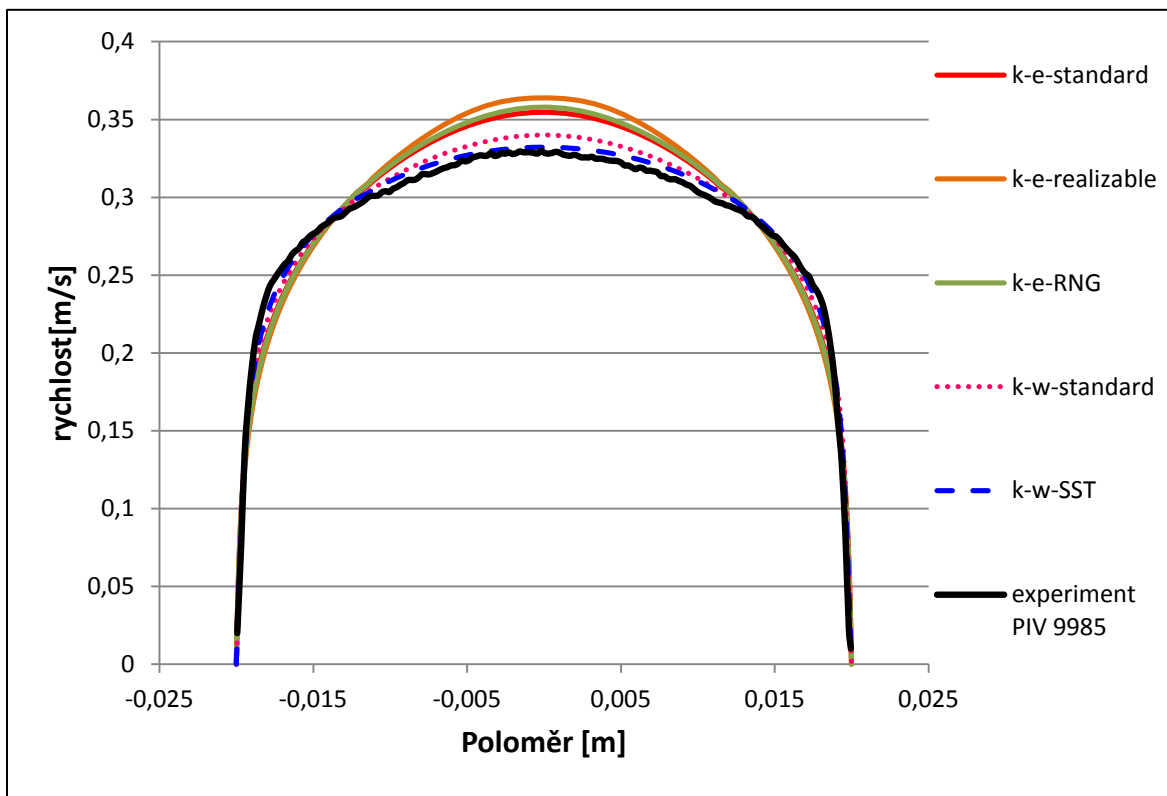
Obrázek 38 Porovnání experimentu s výpočtem, $Re= 1\ 700$.



Obrázek 39 Porovnání experimentu s výpočtem, $Re= 3\ 000$.



Obrázek 40 Porovnání experimentu s výpočtem, $Re= 5\ 000$.



Obrázek 41 Porovnání experimentu s výpočtem, $Re= 10\ 000$.

6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout a sestavit experimentální zařízení vhodné pro studium proudění kapaliny trubicí, na kterém byla následně pomocí experimentální metody PIV provedena měření ke zmapování rychlostního pole pro různá Reynoldsova čísla. Na počátku byla k experimentální metodě PIV zpracována rešeršní práce, ve které byla metoda rozdělena do dvou částí, a to zmapování proudového pole a následné vyhodnocení naměřených dat. Poté byl popsán návrh, výroba a sestavení experimentálního zařízení.

Bylo provedeno pět měření, viz tabulka 3 v kapitole 4.2. Bylo potvrzeno, že experimentálně zjištěné výsledky se příliš neliší od výsledků získaných pomocí CFD. Vzniklé odchylky jsou pravděpodobně způsobeny optickými vlastnostmi a výrobními vadami materiálu, nebo také mohou být způsobeny nepřesným nastavením měřicí aparatury.

Při měření byly zjištěny nedostatky, které by bylo vhodné odstranit upravením nebo nahrazením některých částí zařízení. Zařízení bylo dimenzováno na vysoké hodnoty Reynoldsova čísla (cca 45 000), ale s použitím stávajícího čerpadla bylo možné dosáhnout pouze $Re = 13\,000$. Dalším nedostatkem se ukázala být regulace objemového průtoku kapaliny trubicí. Použitým speciálním kulovým ventilem jej nelze regulovat s dostatečnou přesností, i přesto bylo možné regulovat objemový průtok v řádech desítek hodnot Reynoldsova čísla. Celé zařízení by bylo možné vybavit dálkově ovládanými akčními členy, což by usnadnilo a zrychlilo proces měření. Výhodou celého zařízení je snadná modifikace, která jej umožňuje použít k řešení širokého spektra úloh.

Návrh, výroba a sestavení experimentálního zařízení bylo pro tuto úlohu velmi nákladné z hlediska času i financí. Proto je pochopitelné, že se v dnešní době experiment používá především k ověření numerických simulací. V některých oblastech je použití experimentu nenahraditelné.

Tato práce slouží k získání nových poznatků z oblasti laserové anemometrie (metoda PIV) a oblasti proudění tekutin. Sestavené experimentální zařízení bude využito při řešení budoucích úloh ve spolupráci s firmou Škoda JS, a.s.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DANTEC. *2D PIV reference manual*. Denmark: Dantec Dynamics A/S, 2005. Třídící znak Second edition. ISRC 9040U1752.
- [2] Chyba měření. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2015-06-22]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Chyba_m%C4%9B%C5%99en%C3%AD
- [3] KLAVÍK, P. a RATKOVSKÁ, K.: Návrh experimentálního PIV zařízení a jeho následná realizace. Sborník: Energetické stroje a zařízení, termomechanika a mechanika tekutin 2015, Plzeň: ZČU, 2015. ISBN 978-80-261-0360-8
- [4] KLAVÍK, P.: Návrh experimentálního PIV zařízení a jeho následná realizace, Soutěžní přehlídka studentských a doktorských prací, Plzeň 2015 – ZČU FST, ISBN 978-80-261-0509-1
- [5] KLÍMA, T.: *Zmapování proudového pole kapaliny proudící v trubici pomocí CFD výpočtu*. Plzeň: 2015. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Katedra energetických strojů a zařízení.
- [6] KOPECKÝ, V. *Laserová anemometrie v mechanice tekutin*. Brno: Tribun EU, 2008. ISRC ISBN.
- [7] MALÍK, M. a J. PRIMAS. Technická univerzita v Liberci. [Anemometrické metody] In: *Fakulta mechatroniky* [online]. 2011, verze 1.1 [cit. 2014-11-10]. Dostupné z:
<http://www.fm.tul.cz/cs/search/google/anemometrick%C3%A9%20metody?query=anemometrick%C3%A9%20metody&cx=000213645443246164844%3A%20m5kqgqj6fg&cof=FORID%3A11&siteSearch=>
- [8] NOŽIČKA, J. a J. NOVOTNÝ. [Úvod do problematiky PIV] In: <http://www.fs.cvut.cz/> [online]. verze 1 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z: www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/.../Clanek.Plzen.pdf
- [9] SCHOVÁNEK, Petr a Vítězslav HAVRÁNEK. *Chyby a nejistoty měření: (doplňující text k laboratornímu cvičení)* [online]. [cit. 2015-06-22]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/pext2-nejistoty.pdf>
- [10] Velký lékařský slovník. *slovníky.cz* [online]. 2015 [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: <http://www.lekarske.slovníky.cz/>
- [11] WILLERT, C. et al. *Particle image velocimetry a practical guide*. second edition. Berlin: Springer, 2007. ISRC ISBN.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Stopovací částice používané při proudění plynů. [8]	15
Tabulka 2 Stopovací částice používané při proudění kapalin. [8].....	15
Tabulka 3 Naměřené hodnoty pro jednotlivé měření.	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma metody PIV. [4].....	13
Obrázek 2 Schéma konstrukce CCD čipu. [8].....	16
Obrázek 3 Přerušování laserového paprsku pomocí elektrooptické závěrky.	18
Obrázek 4 Osvětlování polygonovým skenerem.	18
Obrázek 5 Schéma Q-spínání Nd:YAG laseru. [6]	19
Obrázek 6 Dvoukomorový laser pro PIV.	20
Obrázek 7 Druhy sycení proudu v závislosti na koncentraci sytících částic. [11]	21
Obrázek 8 Vyhodnocení PIV obrazu metodou vzájemné korelace. [11]	22
Obrázek 9 Vyhodnocení PIV obrazu metodou autokorelace. [11].....	25
Obrázek 10 Postup při použití metody dvojnásobné Fourierovy transformace.	26
Obrázek 11 Postup při použití Wienerova-Chinčina teoremu.	26
Obrázek 12 Schéma vývoj. diagramu numerického vyhodnocení PIV záznamu.....	27
Obrázek 13 Cyklické korelace.....	28
Obrázek 14 Schéma techniky překrývání vyhodnocované oblasti.....	29
Obrázek 15 Schéma aplikace metody offset.....	31
Obrázek 16 Adaptivní offset.....	32
Obrázek 17 Dva průchody algoritmu adaptivní korelace.	32
Obrázek 18 Schéma uspořádání 3D-PIV metody. [8]	33
Obrázek 19 První návrh měřicí trati.	34
Obrázek 20 Druhý návrh měřicí trati.....	35
Obrázek 21 Třetí návrh měřicí trati.	35
Obrázek 22 Finální návrh měřicí trati.....	36
Obrázek 23 Finální návrh měřicí tratě.....	37
Obrázek 24 Sestava transparentní trubice.	38
Obrázek 25 Transparentní měřicí část.	38
Obrázek 26 Dolní nádoba s přepadem v rámu.	39
Obrázek 27 Schéma toku kapaliny v nádobě.....	40
Obrázek 28 Kompletace jednotlivých částí měřicí trati.	41

Obrázek 29 Sestava celého experimentálního PIV zařízení.....	42
Obrázek 30 Měření teploty kapaliny pomocí infračerveného teploměru.	44
Obrázek 31 Záznam PIV obrazu.	45
Obrázek 32 Rychlostní profil pro hodnotu $Re = 1\ 194$	47
Obrázek 33 Rychlostní profil pro hodnotu $Re = 1\ 713$	47
Obrázek 34 Rychlostní profil pro hodnotu $Re = 3\ 010$	48
Obrázek 35 Rychlostní profil pro hodnotu $Re = 5\ 011$	48
Obrázek 36 Rychlostní profil pro hodnotu $Re = 9\ 985$	49
Obrázek 37 Porovnání experimentu s výpočtem, $Re = 1\ 200$	50
Obrázek 38 Porovnání experimentu s výpočtem, $Re = 1\ 700$	51
Obrázek 39 Porovnání experimentu s výpočtem, $Re = 3\ 000$	51
Obrázek 40 Porovnání experimentu s výpočtem, $Re = 5\ 000$	52
Obrázek 41 Porovnání experimentu s výpočtem, $Re = 10\ 000$	52