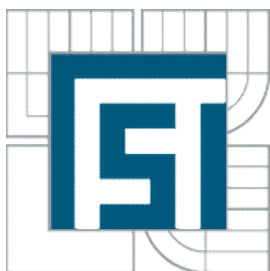




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MODERNÍ LASEROVÉ METODY MĚŘENÍ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ

ADVANCED LASER DIAGNOSTIC SYSTEMS TO MEASURE FLOW FIELD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR LOUTOCKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN JEDELSKÝ, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Loutocký

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Moderní laserové metody měření rychlostí proudění

v anglickém jazyce:

Advanced laser diagnostic systems to measure flow field

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést rešerši moderních laserových metod měření rychlosti proudění zejména s ohledem na plynná prostředí, zaměřit se na jejich klasifikaci, popis a stručné vysvětlení principu měření, možnosti použití, výhody a nevýhody.

Cíle bakalářské práce:

Klasifikace současných laserových metod měření rychlosti proudění dle vhodných kritérií

Charakteristika jednotlivých metod

Vyhodnocení dat naměřených zvolenou metodou

Seznam odborné literatury:

- [1] M. Pavelek, E. Janotková, J. Štětina: Vizualizační a optické měřicí metody, Accessed via WWW, URL: <http://dt.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/>, (31 Oct. 2006).
[2] Lehner, M.; et al.: Applied Optical Measurements: Heat and Mass Transfer, ISBN 3 540 66173 5 (hbk), (Berlin: Springer) 462 pp, 1999
[3] Raffel, M.: Particle Image Velocimetry A Practical Guide, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 3-540-63683-8, 1998

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Jedelský, Ph.D.


Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 16.11.2010

L.S.



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt

Cílem této práce je podat čtenáři ucelený pohled na současné laserové metody pro měření rychlosti proudění tekutin. Metody jsou rozděleny a srovnány dle různých kritérií. U jednotlivých technik je stručně nastíněn jejich princip měření, možnosti a okruh použití. Dále jsou zde zmíněny jejich výhody a nevýhody, vhodné oblasti aplikace a základní parametry. V závěru nalezneme ukázkou vyhodnocení dat měřených pomocí jedné z metod.

Abstract

The aim of this work is to give readers a comprehensive view of the present laser methods for measuring the velocity of fluid flow. The methods are classified and compared according to various criteria. Individual techniques are briefly outlined their principles of measurement, options and range of applications. Furthermore, this work discusses the advantages and disadvantages, appropriate areas of application and the basic parameters. At the end we can find a sample analysis of data measured by one method.

Klíčová slova

Laserový paprsek, proudění tekutiny, složky rychlosti, částice, Dopplerův jev, osvětlení, frekvence.

Keywords

Laser beam, fluid flow, velocity components, particle, Doppler effect, illumination, frequency.

Bibliografická citatce

LOUTOCKÝ, P. Moderní laserové metody měření rychlostí proudění. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Jedelský, Ph.D..

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně bez cizí pomoci. Vycházel jsem pouze ze svých znalostí, odborných konzultací a doporučené literatury. Veškeré zdroje, ze kterých jsem čerpal, řádně cituji a jsou uvedeny v seznamu použité literatury.“

17.5.2011 v Brně

Petr Loutocký

Poděkování

„Tímto bych rád poděkoval Ing. Janu Jedelskému, Ph.D. za velmi vstřícný přístup při udělování odborných rad a konzultací a za poskytnutí mnoha zdrojů informací k práci. V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat Bc. Lukášovi Ďurdinovi za ukázkou techniky PIV v laboratoři Odboru termomechaniky a techniky prostředí.“

OBSAH

1 ÚVOD	10
1.1 Úvod do problematiky.....	10
1.2 Srovnání s ostatními metodami	10
2 KLASIFIKACE OPTICKÝCH LASEROVÝCH METOD	10
2.1 Rozdělení podle oblastí měření.....	11
2.1.1 Bodové metody	11
2.1.2 Plošné (2D) metody	11
2.1.3 Prostorové (3D) metody.....	11
2.2 Rozdělení podle základních funkčních principů	11
2.2.1 Využívající Dopplerova frekvenčního posunutí.....	11
2.2.2 Na principu vizualizace proudění pomocí zanášených částic.....	11
2.3 Rozdělení podle poskytovaných dat.....	12
3 DOPPLEROVSKÁ ANEMOMETRIE	12
3.1 Dopplerův jev	13
3.2 Typy laserů pro Dopplerovskou anemometrii.....	14
3.3 Metoda LDA.....	14
3.3.1 Princip LDA	15
3.3.2 Rozdělení LDA.....	16
3.3.3 Oblasti použití LDA	17
3.4 Metoda PDA	17
3.4.1 Princip PDA	18
3.4.2 DualPDA.....	19
3.4.3 IPI.....	19
3.4.4 GDPA.....	20
3.4.5 Oblasti použití PDA.....	20
4 OBRAZOVÉ VIZUALIZAČNÍ METODY	21
4.1 Metoda PIV	21
4.1.1 Princip PIV.....	22
4.1.2 Stereo PIV	24
4.1.3 TR-PIV	24
4.1.4 Micro-PIV	24
4.1.5 Nano-PIV.....	25
4.1.6 HPIV	25

4.1.7 Oblasti použití PIV	25
4.2 PLIF-PIV	26
4.2.1 Princip PLIF-PIV	26
4.2.2 Oblasti použití PLIF-PIV	27
4.3 PTV	27
4.3.1 Princip PTV	27
4.3.2 Oblasti použití PTV	27
4.4 DGV	28
4.4.1 Princip DGV	28
4.4.2 Oblasti použití DGV	28
5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ POMOCÍ PDA	29
5.1 Stručný popis laboratorní soustavy	29
5.2 Konfigurace laboratorní soustavy	29
5.3 Naměřená data	30
5.4 Velikost částic	31
5.5 Závislost rychlostí částic na jejich velikosti	32
5.6 Rychlosti částic	32
6 ZÁVĚR	33
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	34
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	36

1 ÚVOD

1.1 Úvod do problematiky

Měření proudění je kvantifikace pohybu proudícího média. Může být měřeno mnoha způsoby. Optické laserové metody umožňují měření plynných, kapalných i více fázových proudění. Požadované veličiny měření závisí na aplikaci a odvětví.

Funkční princip obecně umožňuje optické laserové technologii podávat velmi přesná data i v náročných prostředích, která zahrnují vysokou teplotu, malé rychlosti proudění, vysoký tlak, vysokou vlhkost, vibrace a akustické rázy.

Cílem našeho měření je získání rychlosti částic, tedy fyzikální veličiny popisující poměr dráhy pohybujícího se objektu a času nutného k uražení této vzdálenosti.

V průmyslu provádíme tyto měření z důvodů vyšetřování technických problémů a zjišťování technických specifikací, dále k ověřování a zlepšování vlastností objektů našeho zkoumání. V oblasti inženýrství měřením definujeme parametry proudění a turbulencí, vytváříme, rozšiřujeme a zlepšujeme jejich modely a zkoumáme jejich limity. V teoretické mechanice kapalin ověřujeme teoretické předpoklady, modely a nové koncepce. V neposlední řadě měřením také získáváme nové nápady, myšlenky a řešení.

Základní zástupci na trhu v oblasti optických měřících systémů jsou firmy Dantec Dynamics [6], TSI [9], Artium [14] a Lavisision [10].

1.2 Srovnání s ostatními metodami

Oproti jiným metodám měření rychlosti proudění, např. mechanickými anemometry, mají optické měřící metody mnoho výhod a předností. Optické systémy neuvítají pitotových trubic, mechanických anemometrů nebo jiných sond měření zasahujících do proudění. Říkáme, že jsou neinvazivní (nonintrusive). Nedochozí tedy ke kontaktu s objektem nebo k jeho ovlivnění. Velkou předností je možnost měření v náročných podmínkách a složitých prouděních. Optické metody umožňují, ve srovnání s jinými metodami, měřit celé dvou, popřípadě tří rozměrné příčné řezy prouděním. Díky počítačové technice lze získávat a zpracovávat velké množství dat v reálném čase nebo i posléze. Jelikož je každý vektor rychlosti výsledkem statistického průměru z mnoha obrazů, dosahujeme vysokých přesností a kvalit výsledků. Pokud máme dobře provedenou kalibraci měřící techniky, odchylky jsou dány pouze nepřesností pixelů, tedy rozlišovací schopností soustavy. Díky statické pozici komponentů měřícího systému a neměnné vzdálenosti laserových paprsků odpadá oproti jiným metodám nutnost periodické kalibrace po jeho uvedení do provozu. Největší nevýhodou jsou vysoké náklady na pořízení a montáž měřící techniky.

2 KLASIFIKACE OPTICKÝCH LASEROVÝCH METOD

Jednotlivé metody mají různé funkční principy a nároky na techniku. Společným znakem všech metod je však využívání světelného paprsku emitovaného pomocí Laseru (Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) [4] a jeho usměrňování pomocí nějaké optické soustavy. Českým ekvivalentem slova laser je kvantový generátor světla. Toto světlo je monochromatické (jednobarevné),

koherentní (uspořádané) a má malou divergenci (rozbíhavost). V optických metodách se užívají především lasery na bázi pevnolátkové (rubínový, YAG, polovodičové) nebo plynové (Helium-Neonový, Argonový, CO₂). Dělení technik lze provést podle mnoha různých kritérií. Informace různého druhu (dle daného typu metody), poskytované prostřednictvím paprsku, je dále zpracována a vyhodnocena pomocí výpočetní techniky.

2.1 Rozdělení podle oblastí měření

2.1.1 Bodové metody

Měří charakteristiky pouze v jednom místě proudění. Získané informace se tedy vztahují jen k tomuto místu. Nevýhoda bodového měření je, že některá hlediska částicového toku, například zjištění doby setrvání částic v měřené oblasti, nemohou být touto metodou měřena. Ovšem množství dat a tedy i čas ekvivalentní k jejich zpracování je menší. Řadíme sem laserovou Dopplerovskou anemometrii (LDA), dále také fázovou Dopplerovskou anemometrii (PDA)

2.1.2 Plošné (2D) metody

Měření se provádí v příčných plošných řezech prouděním tekutiny. Umožňují tak získat dvou složek rychlosti a možnost plošné vizualizace proudění, tedy zobrazení rychlostí částic ve vztahu k jejich koncentraci po průřezu proudění. Tyto systémy bývají ale podmíněny náročnější sestavou techniky a tedy i nárůstem finančních nákladů. V neposlední řadě jsou taky podmíněny větším objemem zpracovávaných dat, tedy i větší časovou náročností na vyhodnocení. Můžeme zde přiřadit metody particle image velocimetry (PIV), Doppler global velocimetry (DGV), kombinaci plošné laserem indukované fluorescence s particle image velocimetry (PLIF-PIV).

2.1.3 Prostorové (3D) metody

Aktuálně nejvíce progresivní techniky pro opravdu okamžité, tří rozměrné (3D), tří složkové metody měření rychlostního pole pro komplexní proudění včetně turbulencí. Umožňuje celkové 3D vykreslování charakteristik, získávání velkého spektra informací o částicích (intenzitu, velikost, polohu) v prostoru a získávání odchylek poloh částic. Patří zde holografický PIV (HPIV), 3D stereoskopický PIV (3D stereo PIV), dále také rozšířením o další kameru 3D PDA a 3D LDA. Připojením několika měřících rovin lze získat 3D výstup i pomocí metody DGV. Je pak tedy označována jako 3D DGV

2.2 Rozdělení podle základních funkčních principů

2.2.1 Využívající Dopplerova frekvenčního posunutí

Mezi systémy pracující s Dopplerovým jevem, tedy měření rychlosti částice na základě vyhodnocení intenzity Dopplerova vysokofrekvenčního impulzu a velikosti částice na základě fázového posunu, patří LDA, PDA a její modifikace a z hlediska funkčního principu i DGV.

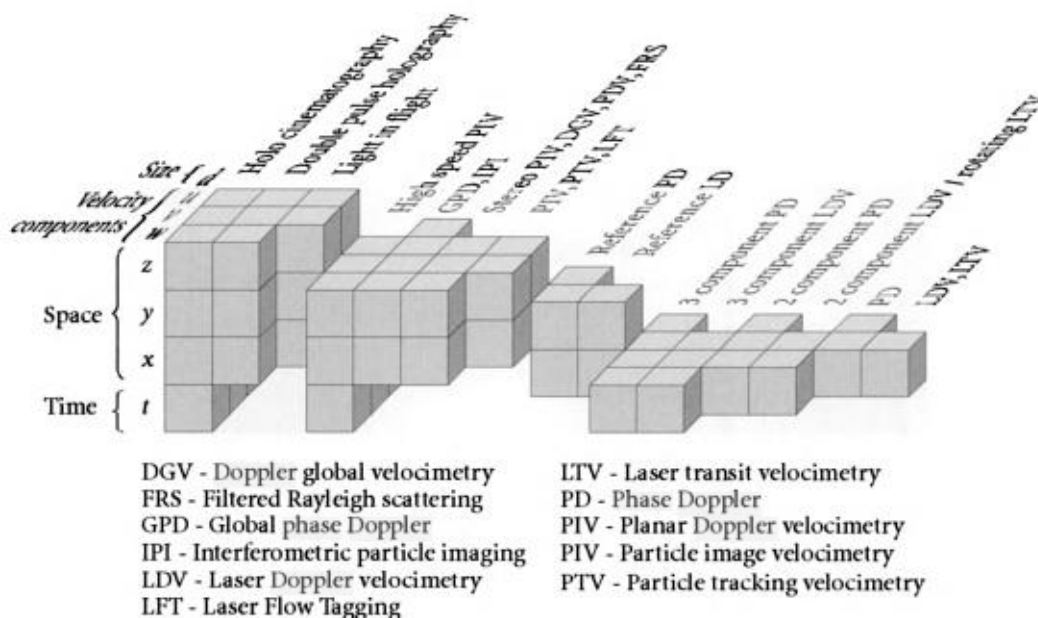
2.2.2 Na principu vizualizace proudění pomocí zanášených částic

Zde se využívá vizualizace proudění v osvětlených plošných řezech prouděním pomocí usměrněného laserového paprsku do tvaru světelného nože a vnášených částic do proudu látky. Osvětlené řezy jsou snímány kamerou a dále

vyhodnoceny. Na tomto principu funguje metoda PIV a její modifikace. Na obdobném principu funguje i metoda laserem indukovaného vyzařování (LIF), která se používá v kombinaci s různými metodami pro získávání současného měření koncentrace, popřípadě teploty, a rychlosti proudění. Základním zástupcem v této oblasti je kombinace plošného LIF systému s PIV (PLIF-PIV). Pak zde z hlediska poskytovaných výsledků řadíme i PTV a DGV.

2.3 Rozdělení podle získaných dat

Různé metody, pro měření toků látek jednoho i více skupenství, nám poskytují odlišné spektrum výsledků. Můžeme je tedy podle tohoto kritéria rozdělit. Sledovanými veličinami pro rozdělení jsou jednotlivé složky rychlosti (velocity components), souřadnice ve kterých je tok měřen (space) a časová vazba dat (time). Je zde brán v potaz i možný rozměr částice (size). Na obr. 2.3- 1 je graficky znázorněno toto rozdělení [5].

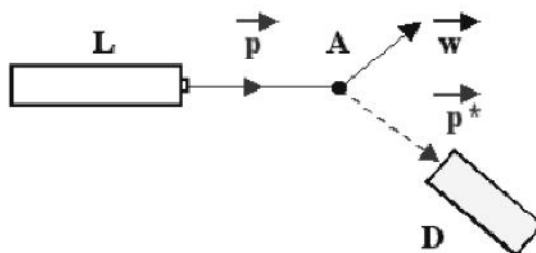


Obr. 2.3- 1 Diagram rozdělení metod podle poskytovaných dat [5]

3 DOPPLEROVSKÁ ANEMOMETRIE

Základním společným znakem metod této oblasti je využití Dopplerova jevu (kapitola 3.1) v procesu měření. Mezi hlavní představitele zde řadíme laserovou Dopplerovskou anemometrii (LDA) a její rozšířenou modifikaci fázovou Dopplerovskou anemometrii (PDA). Z hlediska funkčního principu zde bychom zde mohli řadit i metodu DGV (Doppler global velocimetry), která taktéž využívá Dopplerova efektu, ale z hlediska poskytovaných výsledků je v této práci řazena mezi obrazové vizualizační metody (kap. 4).

3.1 Dopplerův jev



Obr. 3.1- 1 Optický systém pro pozorování Dopplerova jevu [1]

Dopplerův jev [1] popisuje změnu frekvence a vlnové délky přijímaného oproti vysílanému signálu, způsobenou nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače (v našem případě částice) a přijímače (kamery). Měřená vlnová délka či frekvence monochromatického vlnění závisí na pohybovém stavu zdroje a pozorovatele vztahovanému vůči prostředí, které studované vlnění přenáší. V laserové velocimetrii se Dopplerův jev projevuje změnou frekvence a vlnové délky zaznamenaného rozptýleného světla vlivem pohybu osvětlené částice. Toto rozptýlené světelné záření nese informaci o okamžité lokální rychlosti částice. Oproti frekvenci dopadu světla na částici v klidu se frekvence dopadu světelných vln na částici v pohybu liší o vliv její rychlosti. Nechť je c rychlost světla, λ_0 vlnová délka světla generovaného z laseru, f_0 počet světelných vln, které dopadnou na částici za 1 s a w rychlost částice. Potom frekvence dopadu světelných vln na částici f_w bude (1),

$$f_w = \frac{c - \vec{w} \cdot \vec{p}}{\lambda_0} = \frac{c - \vec{w} \cdot \vec{p}}{c} \cdot f_0 \quad (1)$$

kde p je jednotkový vektor směru paprsků vyzařovaných z laseru. Rozptýlené světlo částicí je zaznamenáváno detektorem ve směru jednotkového vektoru p^* . Frekvenci f_w potom odpovídá vlnová délka (2).

$$\lambda_w = \frac{c - \vec{w} \cdot \vec{p}^*}{f_w} \quad (2)$$

Detektor pak registruje světlo o frekvenci (3)

$$f = \frac{c}{\lambda_w} = \frac{c}{c - \vec{w} \cdot \vec{p}^*} \cdot f_w = \frac{c - \vec{w} \cdot \vec{p}}{c - \vec{w} \cdot \vec{p}^*} \cdot f_0 \quad (3)$$

Frekvenční posunutí je velmi malé, a abychom byli schopni je vyhodnotit, musí být zdroj světla monochromatický s velmi úzkou spektrální čarou. Proto se jako zdroje světla užívají lasery. Dopplerova jevu se využívá i v akustice a astronomii. V astronomii se Dopplerův jev projevuje posuvem spektrálních čar vyzařovaných vesmírnými tělesy; pokud se tato tělesa vzdalují od Země, lze pozorovat takzvaný rudý posuv. Při vyšších rychlostech se však projevuje i dilatace času, je proto třeba brát v úvahu relativistický Dopplerův jev.

3.2 Typy laserů pro Dopplerovskou anemometrii

Údaje k jednotlivým typům laserů čerpány z [4].

1) Vodou chlazený Argonový laser

Vydává modrozelené světlo (zelené na vlně $0,514 \mu\text{m}$ a modré na vlně $0,488 \mu\text{m}$). Je pro něj typická vysoká hustota elektrického proudu protékajícího výbojem a vysoká teplota. Proto bývá chlazen vodním okruhem, což sebou nese v procesu měření jisté komplikace. Výbojová trubice se obvykle zhotovuje z keramického materiálu a proud se izoluje od stěn magnetickým polem. Laser je schopen generovat desítky wattů ve spojitém režimu. Nevýhodou je velikost a tedy i neskladnost.

2) He-Ne laser

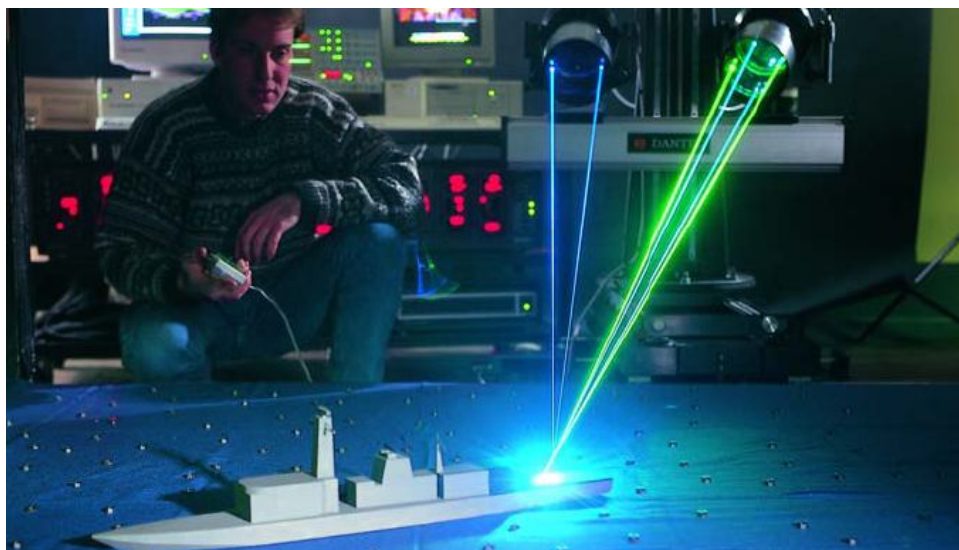
Generuje jak červené (na vlnové délce $0,6328 \mu\text{m}$), tak infračervené záření. Helium-neonový laser tvoří dlouhá skleněná trubice naplněná směsí neonu a hélia, v níž se budí elektrický výboj na vysokém kmitočtu nejčastěji vnějšími elektrodami. Jako aktivní plyn působí neon. Paprsek má vysokou stabilitu kmitočtu a malou rozbíhavost. Je ale méně výkonný a neschopný funkce pod vodou apod.

3) Diodový pevného skupenství (DPSS)

Je mnohem menší a méně náročný na energii než plynné lasery. Výhodou je i velká životnost a nižší cena. Nevýhodou je ovšem horší kvalita světelného svazku. U těchto laserů je možné i poměrně snadné přeladování v širokém rozmezí vlnových délek, které se docílí změnou zastoupení jednotlivých prvků v polovodiči.

3.3 Metoda LDA

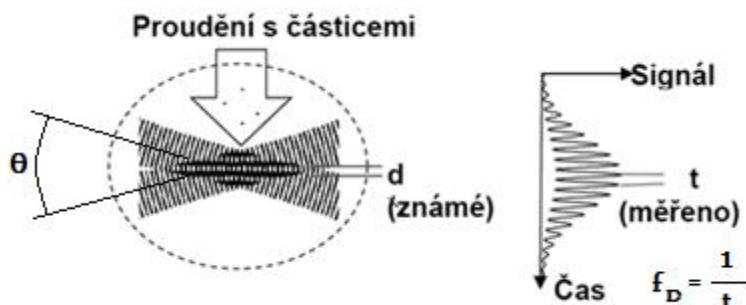
LDA (Laser Doppler Anemometry) [1] také označované jako LDV (Laser Doppler Velocimetry) je optická měřicí metoda pro měření rozložení rychlostí v proudících látkách. Fyzikálním principem této metody je Dopplerův jev (z toho plyne označení LDA). Tato metoda umožňuje měřit okamžité lokální či časově střední rychlosti. Vhodnost použití pro studium proudění a především turbulencí.



Obr. 3.3- 1 Dantec Dynamics LDA systém použití ke zkoumání proudění kolem heliportu lodě. Fotografie pořízená na Bristol University, Anglie. [6]

3.3.1 Princip LDA

Funkčním principem této techniky je využití dvou paprsků emitovaných laserem jako nositele informace o rychlosti částic v proudění. V místě průniku dvou nerovnoběžných laserových paprsků vzniká interferenční obrazec s tzv. interferenčními pruhy obr. 3.3- 2 (místa s vyšší a nižší intenzitou světla). Vznik těchto pruhů způsobují konstruktivní a destruktivní interference dvou křížících se paprsků. Částice procházející touto oblastí způsobí rozptýlení světla. Intenzita rozptýlení je nejlépe popsána jako impuls světla nebo „Dopplerův vysokofrekvenční impuls“, který je měřen optickým detektorem (fotonásobičem). Analýzou Dopplerova impulsu získáme, díky známe rozteči interferenčních pruhů, rychlost částic.



Obr. 3.3- 2 Interferenční obrazec a graf frekvence Dopplerova impulsu [7]

Pro určení rychlosti částice je tedy podstatná pouze zjištěná frekvence vrstů a poklesů intenzity světla v příslušném Dopplerově impulsu. Měřená oblast má ve skutečnosti tvar rotačního elipsoidu, což vychází z toho, že svazky mají kruhový průřez a gaussovský průběh intenzity v příčném řezu. Pro názornost tuto oblast ale zobrazujeme jako kosočtvercovou průsečnici paprsků. Rozteč dvou interferenčních pruhů odvodíme ze známé geometrie optické soustavy dle vztahu (4).

$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin(\theta/2)} \quad (4)$$

Rychlost proudění U poté vypočteme jako součin této vzdálenosti d s Dopplerovou frekvencí f_D dle (5).

$$U = d \cdot f_D = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin(\theta/2)} \cdot f_D \quad (5)$$

Dopplerovu frekvenci získáme pomocí Fourierovy transformace napěťové charakteristiky z fotonásobiče. Ze vztahu pro výpočet rychlosti plyne, že rychlost je tedy přímo úměrná frekvenci f_D .

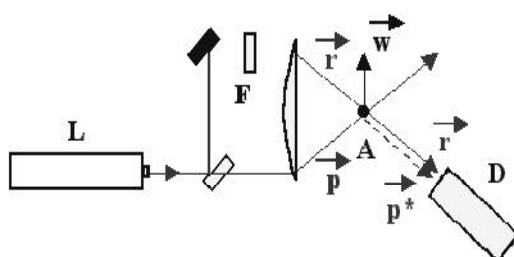
Aby k rozptylu došlo, musí se v proudící látce nacházet částice určité velikosti. Pokud nejsou v látce obsaženy, můžeme je uměle do proudění vnášet. Musí však mít v některých směrech podobné charakteristiky jako původní částice, aby nedošlo ke zkreslení např. nedokonalým kopírováním trajektorie proudu. To znamená, že vnášené částice musí být dostatečně velké, aby došlo k zaznamatelnému rozptylu, ale i dostatečně malé, aby byly schopny následovat laminární i turbulentní složky proudu. Aby bylo možné rozptyl zaznamenat optickými přístroji, je nutné, aby byla látka průhledná [1], [7].

3.3.2 Rozdělení LDA

Podle [1] a typu porovnávací frekvence můžeme metody LDA rozdělit na: systémy s referenčním svazkem (srovnává se rozptyl s referenčním svazkem), systémy interferenční (srovnání rozptylů svazků ve dvou směrech, kdy dochází k interferenci) a systémy se dvěma směry pozorování (srovnává se rozptyl ze dvou různých pohledů) [1]. Dalším způsobem rozdělení by mohlo být podle použitého laseru a podle použitých prvků nebo podle prostorové konfigurace (přístup ke zkoumané oblasti může být různý)

1) Systém LDA s referenčním svazkem

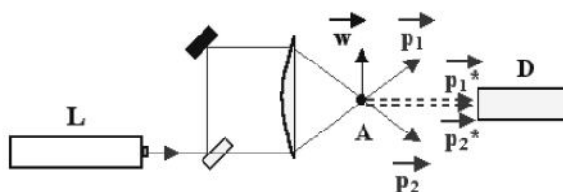
Srovnáváme rozptyl světelného svazku jdoucího přes předmět s referenčním svazkem. Aby bylo možné srovnat charakteristiky svazků, je nutné snížit intenzitu referenčního svazku pomocí filtru, protože intenzita rozptýleného záření je příliš nízká. Tato konfigurace vyžaduje umístění detektoru ve směru referenčního svazku.



Obr. 3.3- 3 LDA s referenčním svazkem (L laser, D detektor, A částice, F filtr, w vektor rychlosti částice, r referenční svazek, p předmětový svazek, p* rozptýlený předmětový svazek) [1]

2) Interferenční (diferenční) systém LDA

Porovnáváme rozptyl dvou světelných svazků jdoucích přes předmět. V oblasti měření, kde se tyto dva svazky protínají, vzniká interferenční obrazec. Při průletu částice oblastí průniku paprsků dojde ke snížení intenzity rozptýleného světla oproti stavu, kdy se v dané oblasti částice nenachází. Tomuto rozdílu intenzit potom odpovídá frekvence, jež je shodná s frekvencí odvozenou na základě Dopplerova jevu. Výhodou tohoto uspořádání je možnost umístění detekční soustavy do více poloh. Tuto diferenční metodu můžeme dále rozdělit na dopřednou a zpětnou metodu podle toho, kterou část odraženého světla zaznamenáváme. U sledování dopředného rozptylu musíme mít možnost, oproti zpětnému rozptylu, optického vstupu i z protější strany přicházejících laserových paprsků [1], [8].

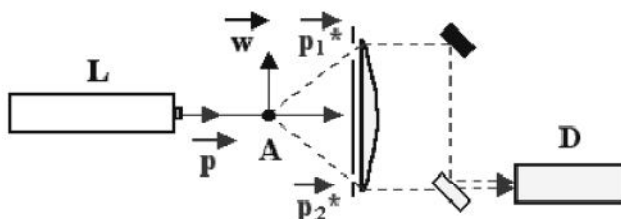


Obr. 3.3- 4 LDA interferenční (L laser, D detektor, A částice, w vektor rychlosti částice, p předmětové svazky, p* rozptýlené předmětové svazky) [1]

3) Systém LDA se dvěma směry pozorování

Zde sledujeme rozptyl, o částici v měřícím prostoru, jednoho světelného svazku ze dvou různých směrů. Abychom přesněji definovaly tyto směry, umístíme před optickou soustavu masku se dvěma průzory. Metoda nám, při zdvojení prvků

techniky s výjimkou laseru, umožňuje současně měřit dvě navzájem kolmé složky rychlosti. Tato metoda je náročná na výkon laseru.



Obr. 3.3- 5 LDA se dvěma směry pozorování (L laser, D detektor, A částice, w vektor rychlosti částice, p předměťový svazek, p* rozptýlené předmětové svazky) [1]

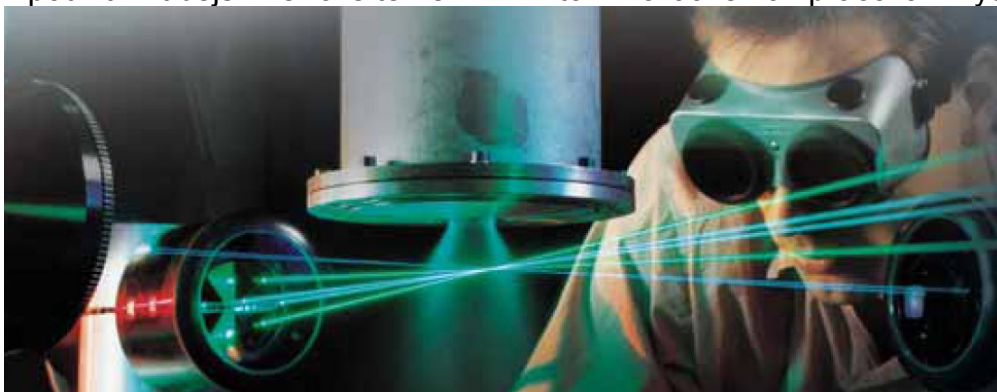
Výstupní signály z detekční soustavy můžeme zobrazit na osciloskopu. Rychlosti částic procházejících měřenou oblastí je úměrná frekvenci dané interferencí paprsků. Signál bývá zkreslen šumem, což můžeme odstranit užitím úzkopásmových filtrů propouštějících Dopplerovskou frekvenci. V Laserové Dopplerovské anemometrii, stejně jako ve Fázové Dopplerovské anemometrii, optický systém musí být přizpůsoben podmínkám a velikosti proudění [1].

3.3.3 Oblasti použití LDA

Obecně se tato metoda používá pro studii proudění jak laminárního, tak i turbulentního. Prakticky je systém vhodný hlavně pro studii aerodynamiky v malých vzdušných tunelech, hydrodynamiky v malých vodních kanálech a tancích, kalibraci senzorů a měřících přístrojů proudění, měření proudění v potrubích, měření povrchových rychlostí a vibrací, supersonických proudění apod. [7]. LDA má taky rozsáhlé využití v medicíně z důvodů snadného použití, neinvazivity a bezbolestného vyšetření, např. k měření krevního oběhu. Více na [6], [9], [10].

3.4 Metoda PDA

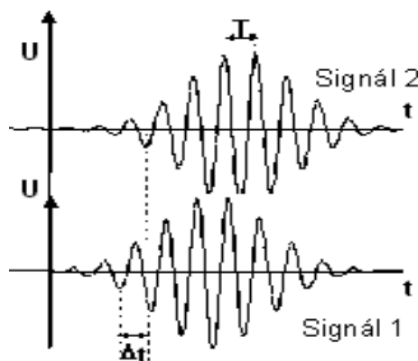
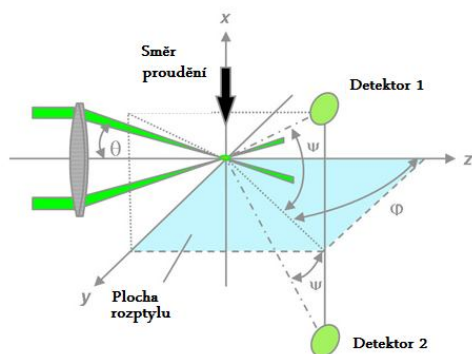
PDA (Phase Doppler Anemometry), někdy označováno jako PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer), je rozšířením metody LDA. Funkční princip je stejný jako u LDA, tedy využití Dopplerova jevu. Umožňuje současné měření rychlosti proudění (v případě 3D PDA všech tří složek) a velikost kulových částic, kapek a bublin rozptýlených v plynu nebo proudící kapalině, stejně jako hmotnostní tok, koncentraci apod. Jak je vidět z obr. 3.4- 1 tak pro měření více složek rychlosti potřebujeme odlišně barevné laserové paprsky (pro každou složku rychlosti jinou barvu). Výhodou je, že při použití hrubější měřicí sítě není PDA tolik náročné na zpracování výsledků.



Obr. 3.4- 1 Měření velikosti částic a jejich rychlosti pomocí systému PDA (DLR, Institut techniky pohonu, Kolýn, Německo) [11]

3.4.1 Princip PDA

PDA systém je rozšířená konfigurace LDA metody o minimálně jeden fotodetektor. Principem je fázové posunutí mezi signály detektorů. Procesorem měřený fázový posun mezi těmito dvěma signály odpovídá průměru částice. Je to založeno na faktu, že délka optické dráhy rozptýleného světla částicí pod různými malými úhly jsou závislé na úhlu rozptylu a poloměru zaoblení povrchu a poloze detektorů. Právě tento drobný rozdíl v optických drahách způsobí fázové posunutí přijatých signálů. Jelikož je frekvence nezávislá na směru rychlosti částice při průletu měřenou oblastí, má stejně velká kladná i záporná složka rychlosti stejný fázový posuv. Abychom byli schopni rozlišovat směr rychlosti částice, jeden z paprsků frekvenčně posouváme v čase pomocí tzv. Braggovy cely. Ta je předřazena před vysílací optiku. Tato frekvenční změna jednoho z paprsků zpříčiní pulzaci interferenčních pruhů (resp. disků) v jednom směru. Potom částice letící stejným směrem jako je směr pohybu pruhů, jsou zachyceny s frekvencí nižší, než je frekvence posuvu. Naopak částice pohybující se v opačném směru jsou zachyceny s frekvencí vyšší. Můžeme tedy vyhodnocovat i vratné (reversibilní) proudění, které je typické pro proudění s turbulencemi.



Obr. 3.4- 2 Optická konfigurace PDA systému [12]

Obr. 3.4- 3 Signály z jednotlivých detektorů PDA [13]

Na obr. 3.4- 3 jsou vyobrazeny signály z obou fotodetektorů. Signály o stejné periodě jsou zachyceny s časovým posunem o Δt . Ve výpočtu pracujeme se známou geometrií konfigurace definovanou pomocí úhlů θ , ϕ , ψ (viz obr. 3.4- 2), vlastnostmi kapky a okolního prostředí a technickými specifikacemi laseru. Kde θ ($^\circ$) je poloviční úhel mezi paprsky, ψ ($^\circ$) je elevační úhel, ϕ ($^\circ$) je rozptylový úhel. Na povrchu částice dochází k odrazům a lomům světla tzv. prvního řádu, druhého řádu atd. Pro výpočet velikosti částice pro odraz 1. řádu platí vztah (6), pro lom 1. řádu potom složitější vztah (7).

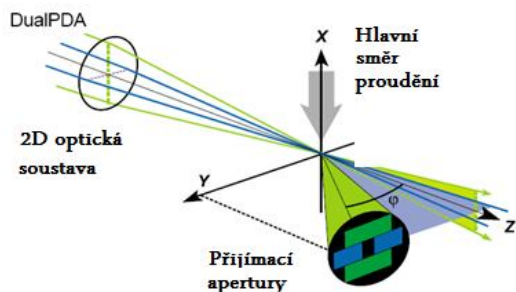
$$\phi = \frac{2\pi D}{\lambda} \cdot \frac{\sin\theta/2 \sin\psi}{\sqrt{2(1 - \cos\theta/2 \cos\psi \cos\phi)}} \quad (6)$$

$$\phi = \frac{-2\pi D}{\lambda} \cdot \frac{n_{rel} \sin\theta/2 \sin\psi}{\sqrt{2(1 + \cos\theta/2 \cos\psi \cos\phi)(1 + n_{rel}^2 - n_{rel}\sqrt{2(1 + \cos\theta/2 \cos\psi \cos\phi)}}} \quad (7)$$

Výsledný rozměr ovšem odpovídá pouze teoretickému kulovému tvaru kapky, od kterého se může skutečný tvar ve skutečnosti lišit. Data z měření jsou zpracovávána a prezentována pomocí různých softwarů. Pro zpřesnění určování velikosti částic můžeme měřicí konfiguraci rozšířit ještě o další detektor a ve výpočtech porovnávat dva fázové posuvy [13].

3.4.2 DualPDA

Klasická PDA optická soustava může být rozšířena na tzv. DualPDA [6]. Umožňuje přesnější měření, minimalizuje chybné měření velikosti částic způsobené ovlivněním drah pohybů. Používá se především pro analýzy sprejů a výzkum rozstřikování kapalin. Kombinuje dva konveční a dva plošné PDA detektory v jedné optické sondě. Obsahuje tedy čtyři přijímací apertury (štěrbiny) obr. 3.4- 4.



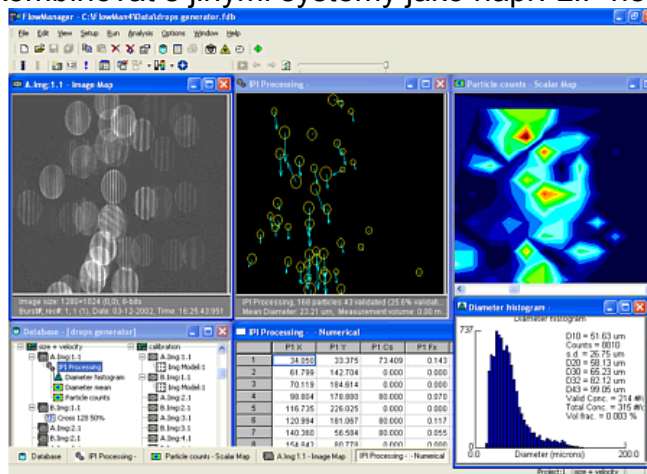
3.4- 4 Schéma DualPDA [6]

Základní koncept je tedy navržen pro vykonávání dvou nezávislých měření velikostí. Každý ze systémů poskytne stejné výsledky, jestliže převládá předpokládaný mód rozptýleného světla a částice je kulového tvaru. Když je ovšem detekované světlo rozptýleno nepředvídatelně, buď díky šterbinovému efektu, dráhovému efektu nebo částice není sférického tvaru, výsledkem obr. budou rozlišné velikosti obou systémů.

Tento rozdíl je užíván jako dvourozměrná kontrola kulatosti částic a k ověření platnosti kritéria pro vyvarování se šterbinového a dráhového efektu. DualPDA umožňuje měření dvou složek rychlosti a je snadno rozšiřitelný pro tři složky rychlosti.

3.4.3 IPI

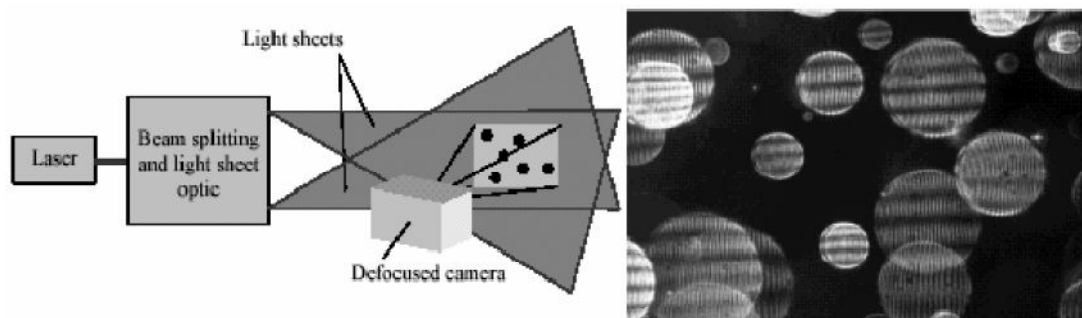
Systém IPI (Interferometric Particle Imaging), který představil König et. al. roku 1986 [15], je založen na interferometrické detekci světla rozptýleného a lámaného každou jednotlivou částicí, což je zachycováno snímací kamerou. Tedy fyzikálním principem je využití odrazů a lomů světla. Provádíme počítání interferometrických proužků, vzniklých rozostřením dvou jasných bodů, které vznikají odrazem světla od částice a lomem světla částicí. Při vhodném rozostření snímací kamery se tyto dva body začnou překrývat a dochází ke vzniku Youngovy interference. Intenzita odraženého světla a světla procházejícího částicí musí být stejná. Díky využití dvojpulzního laseru, stejně jako v metodě PIV, je u každé částice zachycena velikost, rychlost a pozice v obraze. Mezi výsledky poskytovanými touto metodou ještě patří úměra mezi velikostí a rychlostí částice a prostorové rozložení částic. Metoda se vyznačuje velkou přesností, které většinou nedosahují jiné alternativní postupy. Tuto techniku je možné kombinovat s jinými systémy jako např. LIF nebo PIV [6].



Obr. 3.4- 5 Příklad výsledků metody IPI zpracovaných ve FlowManageru [6]

3.4.4 GPDA

Měřicí technika GPDA (Global Phase Doppler Anemometry), kterou představil Damaschke et al. roku 2000 [16], je založena na stejném principu jako metoda IPI (tzn. na sledování počtu interferometrických proužků vzniklých rozstředěním dvou bodů), ale využívá křížících se laserových paprsků, jako je tomu u PDA. Nevýhodou použití IPI pro zjišťování charakteristiky proudění je v malém počtu možných pozorovacích úhlů s dobrou viditelností interferenčních obrazců. To je způsobeno různými hodnotami lomů a odrazů interferujících paprsků. V GPDA je tento problém odstraněn užitím dvou shodných laserů vzájemně vychýlených o určitý úhel.



Obr. 3.4- 6 Schéma GPDA techniky a rozostřený interferenční obrazec [17]

Rozostřený obraz obsahuje čtyři pozice paprsků, ale protože jsou dva odražené a dva lomené paprsky o stejné intenzitě, je systém obvykle redukován pouze na dva. GPDA se většinou používá pro zjišťování velikosti částic s kombinací jiné metody (např. PTV) poskytující rychlostní charakteristiku [17].

3.4.5 Oblasti použití PDA

Oblastí použití je především různé modifikace sprejů jako vstřikování paliva, nástřiky barev, spreje kapalných kovů, farmaceutické spreje apod. Využívá se ke zkoumání fyziky sprejů, tj. velikosti částic, rychlosti, koncentrace a jejich tok za jednotku času. Z konkrétních praktických příkladů můžeme ze zdroje [6], [9], [10] zmínit:

1) Přímé vstřikování

Kombinace PDA + Laser sheet imaging pro diagnostiku DI (direct injection) Sprays - přímé vstřikování. Kombinace zobrazovacích metod (imaging) s technikami měření velikosti částic, jako laserová difrakce nebo PDA, se používají pro hodnocení rozstříkané kapaliny tryskami přímého vstřikování u motorů.

2) Navrhování trysek

Jelikož se v blízkosti trysek při otevírání a zavírání ventilu tvoří odlišná forma spreje, užívá se při zkoumání bezprostřední oblasti vstřiku na místo laserové difrakce PDA technika, která umožňuje tyto formy rozlišit. 2D PDA systém měří současně velikost, dvě složky rychlosti a časový úsek, za který projde jednotlivá částice kapaliny měřící oblastí tvořenou průnikem čtyř laserových paprsků. Tento postup nám tedy poskytuje časově závislá data. Hlavní přínos PDA techniky je dvojitý: oddělení různých fází kapaliny a údaje o jejím rozstříku v oblasti vstupního otvoru, což nám umožní v konečném důsledku zlepšit design trysky, zadruhé možnost vykreslení funkce velikosti koncentrace rychlostí jako počáteční podklady pro simulování spalování pomocí CFD (Computational Fluid Dynamics).

3) Ultra-husté spreje

Systém HiDense PDA (z ang. HiDense – vysoká hustota) uvedený na trh společností Dantec Dynamics umožňuje studovat vnitřní oblasti spreje, měření velkého kolísání rychlostí a malých částic. Ovšem vyžaduje velmi citlivé sondy, vysoký výkon laseru a pokročilé zpracování signálů. Měřicí uspořádání vyžaduje sondu s argonovým laserem, HiDense PDA sondu a procesor s širokým rychlostním rozsahem. Tato konfigurace konkrétních komponentů je navržena čistě pro měření vysoce hustých sprejů.

4) Velkobjemové dvoumédiové trysky

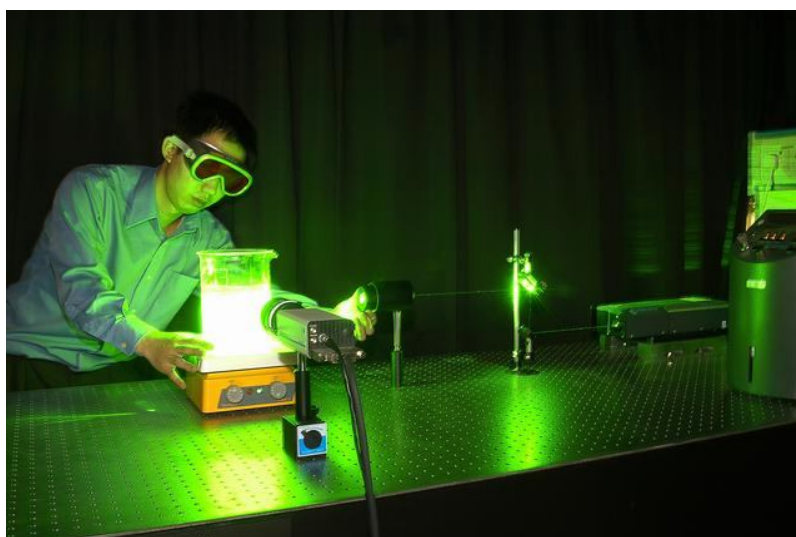
Velikost částic, jejich rychlost a objem toku jsou získávány v různých radiálních pozicích skrze kužel rozstříknuté kapaliny.

4 OBRAZOVÉ VIZUALIZAČNÍ METODY

Charakteristickým rysem těchto metod je prezentování výsledků měření proudění ve formě obrazů, jejichž analýzou získáváme hledané informace. Tomuto procesu říkáme vizualizace proudění. Zařazujeme zde techniku PIV a její modifikace, dále metody PTV, PLIF-PIV. Můžeme zde zařadit i metodu DGV, která stojí někde na pomezí mezi Dopplerovskou anemometrií a obrazovými metodami.

4.1 Metoda PIV

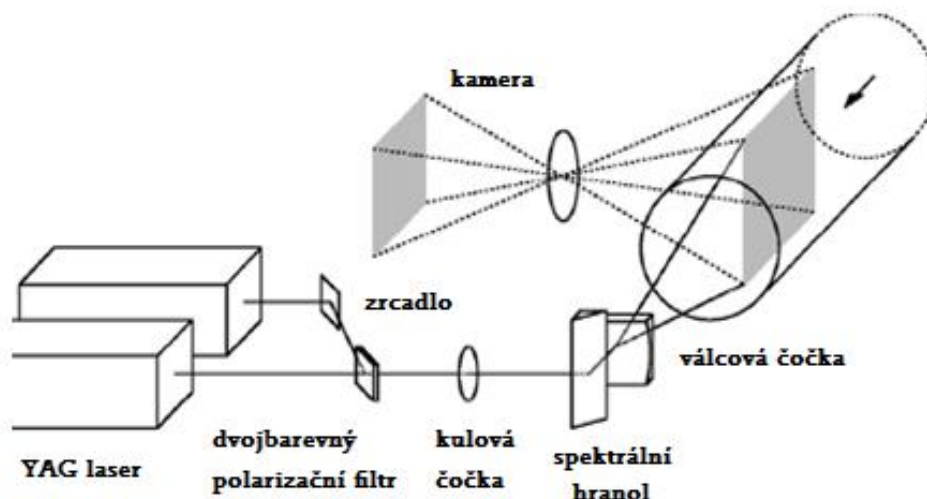
PIV (Particle Image Velocimetry), někdy v české literatuře označována jako rovinná laserová anemometrie, je optická měřicí technika pro výzkum a diagnostiku proudění, turbulencí, sprejů a spalovacích procesů. Experimentální uspořádání PIV systému většinou dělíme do několika podsystémů. V praxi je nutné částice potřebné pro vizualizaci do tekutiny doplnit. S metodou PIV se tedy úzce váže i problematika zavádění částic do proudění. Tato technika má velice široké uplatnění v nejrůznějších oblastech a používá se k výzkumu a vizualizaci nejen v laboratořích, ale i přímo v provozech. Obsáhlým a komplexním zdrojem informací o PIV je publikace od M. Raffela (1988) [3].



Obr. 4.1- 1 Experimentální PIV systém na Univerzitě vědy a technologií v Hong Kongu [18]

4.1.1 Princip PIV

Metoda PIV funguje na principu vizualizace proudění pomocí zanášení částic do tekutiny. Obrazy těchto částic jsou pak pomocí optické soustavy zachycovány a dále zpracovávány pomocí počítače. Výsledkem tohoto procesu je vektorová mapa rychlostí proudění. Díky využití moderních softwarů a počítačového zpracování obrazů proudící tekutiny dosahuje (dříve se snímky zachycovaly pomocí fotoaparátů) tato metoda docela přesných výsledků a rozšířilo se praktické využitelnosti vizualizačních metod.



Obr. 4.1- 2 Typické optické uspořádání pro metodu PIV [19]

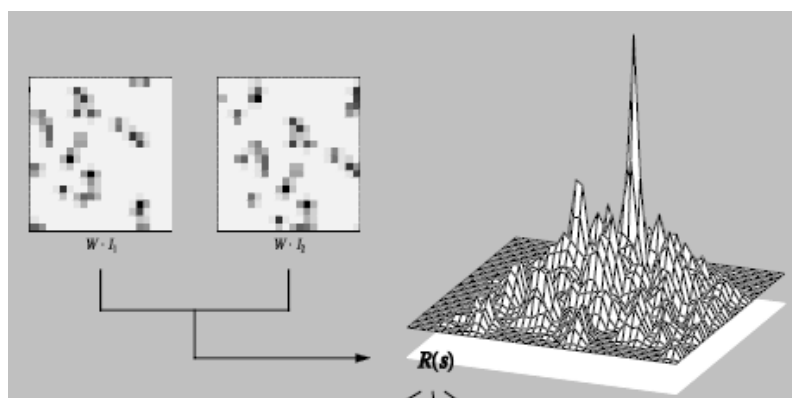
Sestava měřicí techniky se používá v různých modifikacích a uspořádáních. Na obr. 4.1- 2 je schematicky znázorněno typické uspořádání pro metodu PIV. Světelný paprsek vycházející z laserů je pomocí soustavy zrcadel a optických čoček usměrněn do tzv. tvaru světelného nože [1]. Takto se osvětluje vybraná světelná rovina měřeného prostoru. Tato osvětlená rovina je dále ohraničena v tzv. rám a to zorným polem záznamové kamery, která snímá obrazy kolmo na osvětlenou rovinu světelným nožem. CCD záznamová kamera je přes digitalizační kartu připojena k počítači.

Měření [1] se provádí dvěma, nebo více po sobě jdoucími pulzy z laserů, u nichž známe jejich frekvenci. Tímto dostaneme pohledy na obrazy částic ve dvou různých těsně po sobě jdoucích okamžicích. Kamera je nastavena na snímání obrazů v závislosti na funkci laserů. Na základě měřítka zaznamenaných obrazů se pak softwarově určí polohy částic v proudu kapaliny v jednotlivých obrazech. Z toho se poté získají příslušné posunutí částic Δx a Δy v kolmých směrech mezi obrazy. Z intervalu časového posunutí mezi snímky ΔT a ze známých posunutí částic Δx a Δy vyhodnotíme příslušné složky rychlostí w_x a w_y v daném místě, dle vztahů (8)

$$w_x = \frac{\Delta x}{\Delta T}, w_y = \frac{\Delta y}{\Delta T} \quad (8)$$

Jelikož proces zpracování trvá několik milisekund, je možné vizualizovat pomocí metody PIV vektorovou mapu rychlostí částic proudění i v reálném čase. Časově rozlišený PIV poskytuje jedno rámové měření na několika kHz.

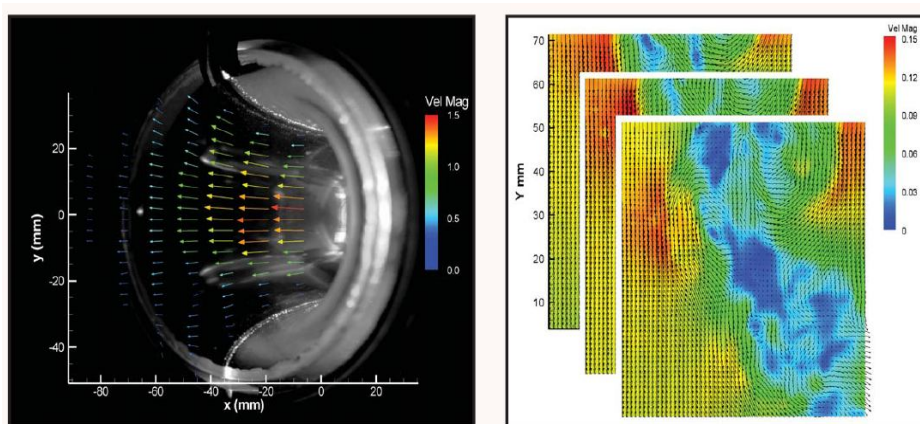
Vyhodnocení posunutí částic Δx a Δy se provádí většinou rozdělením snímků na elementy (IA – interrogation areas), které jsou dostatečně malé s dostatečným počtem obrazových bodů. Je-li v tomto elementu částice pouze jedna, diferencii polohy této částice stanovíme z pouhého rozdílu poloh v jednotlivých snímcích.



Obr. 4.1- 3 Vyhodnocení difference polohy na dvou elementech [20]

Je-li těchto zřetelných částic více, Δx a Δy stanovíme z četností vzdáleností částic v druhém snímku oproti prvnímu. Výsledný posuv částic v IA je pak dán vzdáleností, která má největší četnost. Vyhodnocování lze provádět i dělením Δx a Δy až maximálně do situace, kdy novému Δx a Δy odpovídají alespoň ještě dvě částice. To ovšem za předpokladu, že polohy částic v elementech jsou stanoveny přesněji (i mimo polohy obrazových bodů).

Nejvíce používaným způsobem stanovení Δx a Δy je pomocí Fourierovy transformace. Její předností je možnost použití této transformace i v obecném případě pro málo rozlišitelné částice. Nebo dokonce při vizualizaci proudění pomocí kouře či mlhy.



Obr. 4.1- 4 Teplotní a prostorové charakteristiky proudění získané metodou PIV [9]

PIV snímky se vyhodnocují pomocí vzájemné korelace oblastí prvního a druhého obrazu, hodnota vrcholu korelační plochy poskytne průměrnou odchylku pozice částic mezi jednotlivými obrazy. S jednou kamerou získáme dvě vektorové složky rychlosti, se dvěma kamerami tři složky. Výsledkem měření metodou PIV je tedy kromě vektorového pole rychlostí proudění také např. vizualizace turbulencí (vířivost proudu) a další prostorové charakteristiky.

4.1.2 Stereo PIV

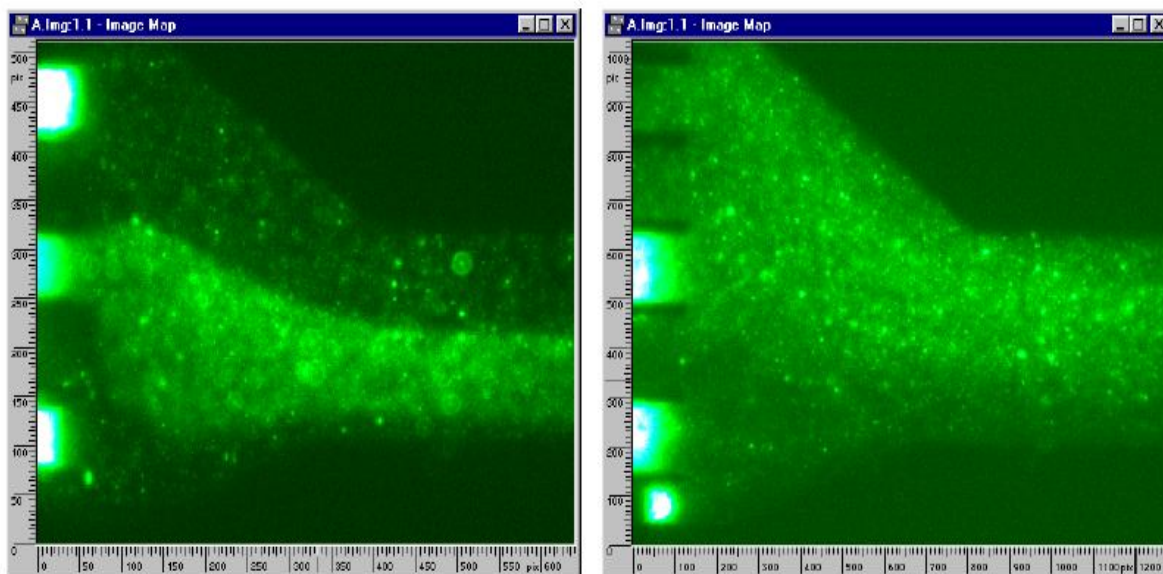
3D stereo PIV [3] funguje na stejném principu jako lidské oči, tedy stereoskopickém vidění. Tato metoda se používá při velké vzdálenosti mezi dvojicí detektorů, kdy není možné symetrické umístění kamer, mezi nimiž je 90° . Stereoskopický PIV tedy spojuje dvě kamery s rozlišenými úhly pohledů k získání posunutí v ose z. Obě kamery musí být zaostřené na stejný bod v proudění a musí být náležitě seřizené. 3D stereo PIV poskytuje všechny tři složky rychlosti a reálné posunutí v oblasti měření.

4.1.3 TR-PIV

S vysokorychlostním časově rozlišeným PIV můžeme detailně zkoumat časový vývoj a vzájemné působení proudových struktur, stejně jako vazebné dynamické účinky kapalin v čase a prostoru, cyklické proudění nebo třeba časoprostorové korelace u turbulentních proudění. Když je pro PIV použita kamera s vysokou frekvencí snímání, získáme stejně vysoké rozlišení a dynamický rozsah jako u standardních PIV kamer, ale až na několika kHz. S dnešními dostupnými lasery s kHz vysokou opakovací frekvencí a pulzní energií nad 50 mJ mohou být osvětleny i velké oblasti pro plynné a kapalinové aplikace [10].

4.1.4 Micro-PIV

V mnoha oblastech vědy, inženýrství a biomedicíny je potřebné charakterizovat tok tekutiny v řádech mikrometrů. Pro tyto účely byla vyvinuta modifikace klasického PIV označovaná jako Micro-PIV nebo někdy i jako μ PIV [3]. Tato technika se odlišuje od běžné ve třech základních problémech. Částice jsou poměrně malé vzhledem k vlnové délce ozařujícího světla. Neosvětlujeme proudění v ploše paprskem ve tvaru světelného nože, ale v celém objemu proudu. Z toho plynu požadavek na jinou techniku osvětlování. Za třetí jsou částice tak malé, že musíme u měření uvažovat i tzv. Brownův pohyb (hromadný efekt kolizí mezi částicemi a sníženým počtem molekul tekutiny je nesymetrický a zabraňuje částicím v dobrém kopírování proudu), který má negativní vliv na výsledky měření.



Obr. 4.1- 5 Chybné zobrazení částic proudění pomocí PIV a správné zobrazení pomocí Micro-PIV [20]

Při nižším požadavku na osvětlení se používá Hg-arc lampa, pro lepší osvětlení potom ND:YAG laser, který umožňuje analýzu vzájemné korelace dvou obrazů v krocích desetin mikrosekund mezi snímky. V normálním makroskopickém měření tento časový krok umožňuje měření supersonických proudění. Kvůli velkému zvětšení při procesu měření je ovšem maximální rychlost měřitelná při tomto časovém kroku v řádech metrů za sekundu. Z toho, že se pohybujeme při měření v řádech mikrometrů, je zřejmé, že nároky kladené na rozlišovací schopnost a kvalitu optické soustavy a detektorů je vyšší.

4.1.5 Nano-PIV

Styl osvětlování používaný u Micro-PIV metody nám většinou poskytuje obrazy se špatným nebo nedostatečným kontrastem především v bezprostřední oblasti proudění kolem stěn. Zde se totiž promítne do rozptylu světla o částice i odraz od stěn. Pro vyšetřování těchto oblastí používáme nano-PIV techniku (někdy značená jako nPIV) [3], která používá osvětlování pomocí tlumených vln. Tato metoda zkoumá pouze částice do 250 nm.

4.1.6 HPIV

HPIV (Holographic PIV) [21] je jedna z progresivních technik pro okamžitou, tří rozměrnou, tří složkovou metodu měření rychlostního pole komplexního proudění včetně turbulencí a multifázové proudění. Obsahuje celkové 3D vykreslování charakteristik, získávání zásadních informací o částicích (intenzitu, velikost, polohu) v prostoru a získávání odchylek poloh částic. HPIV metody a s ní spojené techniky jsou zkoumány jako komerčně realizovatelné systémy pro běžné třírozměrné měření proudící tekutiny. Díky HPIV je možná i přesná rekonstrukce objektů z Fresnelových hologramů získaných z prostorově omezeného objektu.

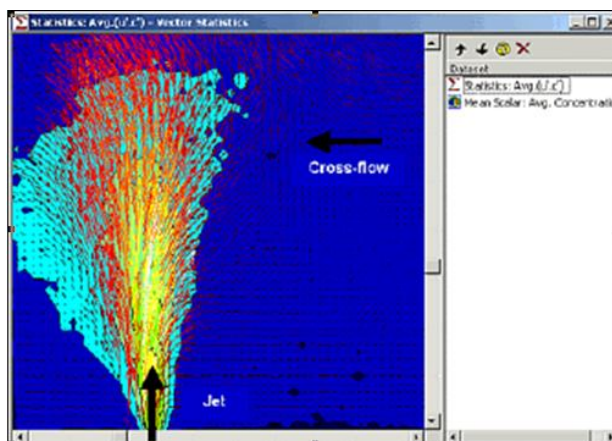
Tato metoda je široce zkoumána a vyvíjena díky její experimentální jednoduchosti a malé potřebě vybavení. Přesnost a kapacita systému je daná především jeho optickou konfigurací (CCD kamera má pouze omezený počet pixelů a tedy i rozlišovací schopnost).

4.1.7 Oblasti použití PIV

Technika PIV se využívá pro výzkum a diagnostiku proudění, turbulencí, sprejů a spalovacích procesů. Mezi nejdůležitější oblasti použití této metody patří rychlostní experimenty ve větrném tunelu pro testování aerodynamiky aut, vlaků, budov a dalších objektů, měření rychlosti proudění v hydrodynamice, dále výzkum rozprašování, kde je nutné měřit rychlost kapek, úhly a doba setrvání částic v měřené oblasti. V neposlední řadě také ekologický výzkum nebo experimentální ověřování CFD modelů (Computational Fluid Dynamics je výpočetní technologie, která umožňuje pozorovat dynamiku proudících částic). Tato technika se používá k měření, výzkumu a vizualizaci nejen v laboratořích, ale i přímo v provozech. Více o konkrétních případech použití PIV v [3], [6], [10].

4.2 PLIF-PIV

LIF (Laser Induced Fluorescence) [6], tedy tekutinový plošný LIF systém je optické měřicí zařízení pro získávání okamžitých koncentračních a teplotních map proudění. Kvantitativní analýza je založena na porovnávání obrazů, které mapují odezvy na každý pixel kamery s ohledem na obě lokální hustoty a lokální světelnou energii laseru. Metoda samotná se také používá k současnému měření koncentrace a teploty nebo k analýzám směšovacích procesů, např. chemických reakcí. Slouží i ke zkoumání rozptylu emisí v modelových mořských systémech.



Obr. 4.2- 1 Vektorová mapa Reynoldsova toku s koncentračními poli [6]

Zjistilo se, že některé charakteristiky částic, především malých částic, nemůžou být dostupné pomocí technik uvažujících pouze elastický rozptyl světla, a proto potřebujeme v některých případech pracovat i s neelastickým rozptylem. To vede ke kombinování LIF s různými jinými metodami. Pro současné měření rychlosti a koncentrace se tekutinový plošný-LIF systém kombinuje s PIV metodou. Metoda je ideální pro získávání experimentálních informací o fyzice míchání při proudění. K dalším způsobům využití se řadí kombinace vizualizace proudění s přesnou množstevní analýzou, statistická analýza měření rychlosti a hustoty nebo vyšetření skalárního transportu skrze Reynoldsovi toky obr. 4.2- 1.

4.2.1 Princip PLIF-PIV

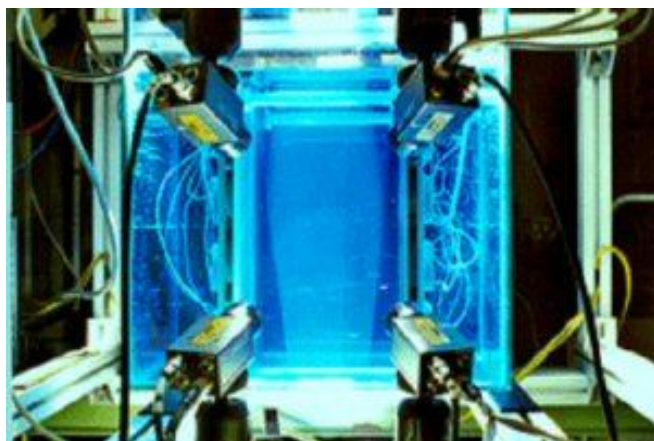
Laser osvětlí měřicí plochu a PIV kamera zachytí rozptýlené světlo, z něhož poté vyhodnocujeme rychlostní pole. Do kapaliny jsou zaváděny indikační částice a fluorescenční značkovač je vstříknut na danou pozici v proudění tak, aby PIV a LIF obdrželi signály samostatně. Systém oddělí a vzorkuje tyto dva signály zároveň: PIV kamera (opatřená filtrem odpovídajícím vlnové délce laseru) detekuje částicové posunutí a LIF kamera (opatřená filtrem odpovídajícím fluorescenci značkovače) detekuje úroveň fluorescence v kapalině. Systém tedy zpracovává PIV a LIF obrazy v okamžité mapy rychlosti a hustoty (popř. teploty). Doplnkové metody mohou být použity na další zpracování dat.

Kombinace PLIF-PIV metod se používá také pro zjištění rozložení rychlostí a tepla v proudících látkách. Tato metoda je vhodná především pro analýzu teplotních přenosů v různých konfiguracích proudění. Pracovní princip je obdobný jako při měření rychlostí a koncentrace částic, ale výsledkem je v tomto případě mapa rychlostí a teplotního rozložení.

4.2.2 Oblasti použití PLIF-PIV

Tato kombinovaná metoda se používá v případě, kdy chceme kromě rychlostních charakteristik proudění sledovat i jiné veličiny, především teplotu a koncentraci částic. Využívá se taky ke zkoumání směšovacích procesů, k získání rozložení teplotních přenosů v závislosti na rychlosti a různé konfiguraci proudění. Stejně tak i k diagnostice vícefázových látek, jako např. voda s bublinami [6].

4.3 PTV



V kombinaci s PLIF můžeme použít i metodu PTV (particle tracking velocimetry) [22], [23], kde tedy PLIF poskytuje velikost částic a PTV zajistí měření rychlosti částic. Tento systém je obdobou PIV, ale modifikovaný pro nízkou hustotu částic. Může být snadno rozšířen na 3D-PTV použitím více kamer, prostorového osvětlení a detekce částic v prostoru s využitím fotogrammetrických principů.

Obr. 4.3- 1 3D-PTV [22]

4.3.1 Princip PTV

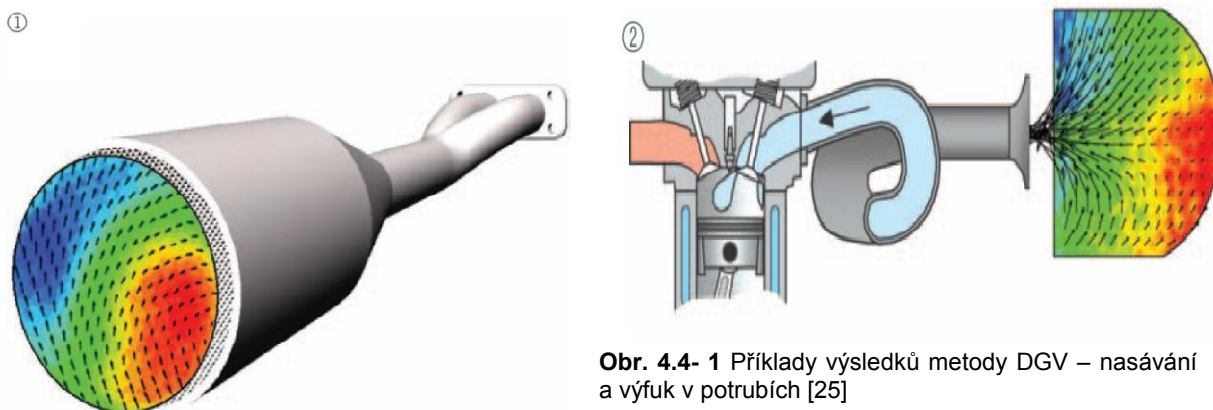
Oproti PIV, kde jsou pouze zaznamenávány obrazy částic, jsou u PTV částice v procesu měření sledovány. Velkou výhodou tohoto systému je možnost osvětlení měřeného prostoru pomocí různých zdrojů světla. Není zde požadavek na koherentnost a monochromaticitu osvětlení. Rozšířením PTV je PTVI (particle tracking velocimetry and imaging) technika, která pracuje s okamžitými dvojitě promítnutými barevnými snímky k získání jak velikostí tak i rychlostí částic. Nepotřebujeme tedy kombinaci s PLIF. Barevné rozdíly snímků tvořených laserovými impulsy o různých vlnových délkách napomohou k určení směru proudění. V praxi je technika PTV digitalizována a označuje se tedy jako tzv. DPTV (Digital particle tracking velocimetry). Je-li hustota částic nižší, poskytuje lepší výsledky než konvenční statistické metody analýz díky vysoké detekční schopnosti, které může být dosaženo v měřené oblasti. Může poskytovat přesnější určování pozice než PIV, protože umožňuje sledování jedné konkrétní částice mezi dvěma snímky. Více naleznete v [23], [24].

4.3.2 Oblasti použití PTV

V principu se dá metoda PTV použít ve stejných oblastech jako PIV, kde bychom měli problém s malým počtem částic. V praxi se používá konkrétně k výzkumu proudění zrnitých látek, nelineárních proudů, izotropních turbulencí, proudění s turbulencemi, ředěnými polymery, dvěma fázemi, efektem hromadění, rotací atd. V neposlední řadě také v oblasti biomedicíny.

4.4 DGV

DGV (Doppler Global Velocimetry) je optická měřicí metoda pro měření rychlosti v ploše. Stojí někde na pomezí mezi Dopplerovskými metodami a vizualizačními technikami, ale podle typu poskytovaných výsledků ji můžeme zařadit mezi obrazové vizualizační metody. Prostorová měření jsou podmíněna připojením více měřících rovin. Pak se tedy jedná o metodu 3D DGV a získáme všechny 3 složky rychlosti. Pomocí DGV jsme schopni měřit rychleji než užitím LDA a na větší ploše než technikou PIV.



Obr. 4.4- 1 Příklad výsledků metody DGV – nasávání a výfuk v potrubích [25]

4.4.1 Princip DGV

Laser je zde použit ve spojení s optickým systémem pro vytvoření světelného paprsku, který osvětlí částice proudící látky. Je zde, jako u předchozích metod, využito Dopplerova efektu, díky němuž je získána frekvence odpovídající rozptylu světla. Frekvence je poté konvertována do škály různých světelných intenzit. Na základě analýzy této škály barev je dále zpracováno a vyhodnoceno rychlostní pole. Výhodou této metody kromě toho, že získáme všechny tři komponenty rychlosti, je krátký měřicí čas a okamžité vyhodnocení výsledků (v řádech sekund). Je vhodnější pro analýzu proudění větších rychlostí (odhadem přes 30 ms^{-1}), což je dáno rozlišovací schopností na úrovni 1 ms^{-1} . Měřená oblast v proudovém poli je definovaná polohou a fyzikální rozměrem laserového paprsku. Složka měřené rychlosti je potom závislá na směru šíření laserového paprsku a úhlu pozorovací CCD kamery [25], [26].

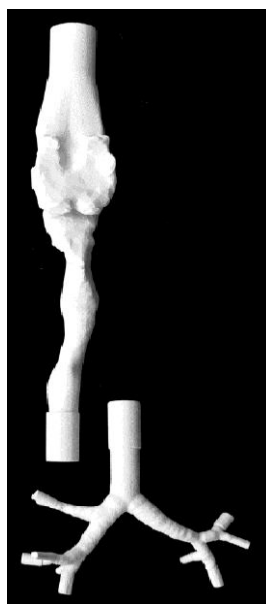
4.4.2 Oblasti použití DGV

Doppler Global Velocimetry metoda se používá jak pro časově závislé měření stálých proudění, tak i fázově závislých měření cyklických proudění. Tato metoda se především pojí s optimalizací a navrhováním spalovacích motorů. Mezi primární oblasti užití je proudění v katalyzátorech a ke zkoumání oblastí vtoku a výtoku v potrubích.

5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ POMOCÍ PDA

Úkolem praktické části této práce bylo se seznámit s jednou laserovou metodou pro měření rychlosti proudění tekutin v praxi a zkusit zevrubné vyhodnocení některých naměřených dat touto technikou. Pro tyto účely byla vybrána metoda PDA, se kterou pracují Ing. F. Lízal, PhD., Ing. J. Jedelský, PhD. a prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc. v laboratoři Odboru termomechaniky a techniky prostředí Energetického ústavu FSI VUT v Brně. Metoda PDA byla využita k Experimentálnímu výzkumu transportu aerosolů v dýchacím traktu člověka [28], [29].

5.1 Stručný popis laboratorní soustavy



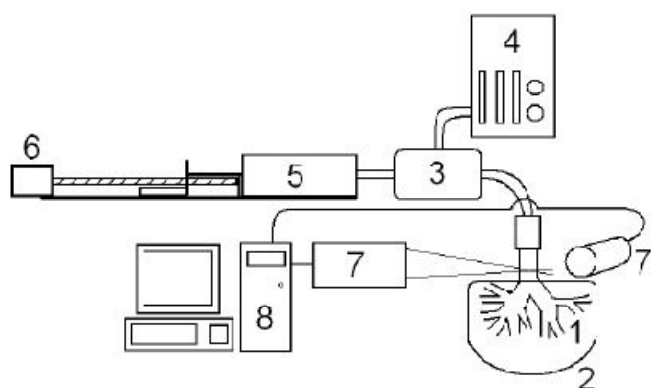
Cílem laboratorního měření byl výzkum distribuce aerosolů v modelu plic člověka. Velikosti částic aerosolu se pohybují v intervalu 1 μm až 10 μm . Pomocí PDA se měří rychlost a velikost částic, které se mísí se vzduchem. Princip techniky PDA je detailně popsán v kap. 3.4. Stručně ho můžeme popsat takto: světelný paprsek emitovaný laserem je rozdělen na dva a usměrněn do místa měření pomocí optické soustavy. Jeden z paprsků je vždy frekvenčně posunut pomocí Braggovy cely. Paprsky se protínají v měřené oblasti a interferují. Procházející částice světlo rozptylují, což je zaznamenáno pomocí detektorů. Výsledky měření jsou zpracovány pomocí softwaru. Protože byla pro výzkum zvolena optická měřicí metoda a proudícím médiem je vzduch, musel být model plic transparentní a tenkostěnný (aby nedocházelo k ovlivnění lomu paprsků). Model byl vyroben ze silikonu pomocí rapid prototypingu na základě dat ze skutečných lidských dýchacích cest.

Obr. 5.1- 1 Počítačový model dýchacích cest [28]

Do modelu je pomocí soustavy propojených hadic zaváděn vzduch s aerosolem. V experimentu je možné simulovat různé druhy dechových režimů a to pouhou změnou chodu motoru pneumatického systému. Měřicí technika se musí zaměřit přesně do měřicího místa. Toto nastavení polohy je náročné a složité (jedná se především o nalezení vhodného místa na modelu, kde nedojde k výraznému ovlivnění vstupujících paprsků). Ovšem je nutné mu věnovat patřičnou pozornost, protože se od něj odvíjí přesnost výsledků.

5.2 Konfigurace laboratorní soustavy

Hnací člen pneumatického systému (obr 5.2- 1), zajišťující proudění částic, je dle [29] krokový servo motor (6), který pohání píst v pneumatickém válci (5). Servo motor ovládaný počítačem nám umožňuje simulovat různé frekvence a amplitudy dýchacího cyklu. Částice aerosolu v rozmezí od 1 do 10 μm jsou tvořeny v kondenzačním generátoru (4). Ve směšovacím uzlu (komoře) (3) jsou pomocí statického mixéru částice aerosolu míseny se vzduchem. Pro druhou část dýchacího cyklu, tedy vydechování, je v systému umístěn vzduchový vak (2), který vzduch s částicemi zadrží. PDA systém (7) je v tomto případě od Dantec Dynamics [6].



Obr. 5.2- 1 Části laboratorní soustavy [29]

Jedná se o 1D konfiguraci systému s Ar-Ion+ laserem, optickou soustavou pro úpravu světelného svazku z laseru a třemi fotodetektory. Zaznamenaná data z fotonásobičů jsou zpracována pomocí Dantec procesoru a posílány do počítače (8). Vyhodnocení dat se provádí v BSA Flow Softwaru. Obsáhlejší charakteristiku jednotlivých částí systému naleznete v [29].

5.3 Naměřená data

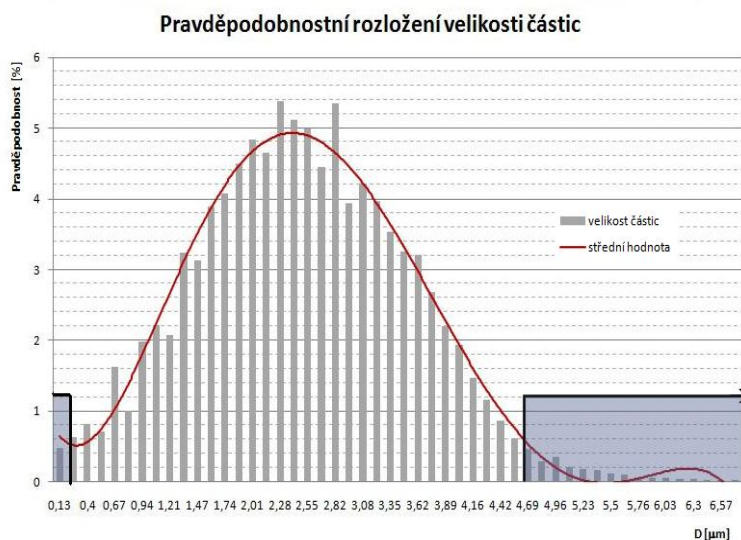
V tomto experimentu byl měřen cyklický dechový režim. Dechový objem a perioda cyklu byly nastaveny na počítači, který ovládá pneumatický mechanismus. Hodnoty dechového objemu (v litrech) a periody (v sekundách) byly 0,5 l / 4 s, 1 l / 4 s a 1,5 l / 3 s. Velikost částic byla pro všechny měření nastavena v generátoru na hodnotu 3µm. Vyhodnocovaná data popisují rychlost a velikost částic v měřeném místě modelu plic. Oblast měření byla dislokována do 2. Bifurkace v pravé plicí modelu. Jelikož pohyb částic do jisté míry kopíruje pohyb vzduchu, můžeme s přiblížením říci, že měříme i rychlost pohybu vzduchu v tomto místě.

Tab. 5.3- 1 Tabulka naměřených hodnot

AT [ms]	Time [ms]	Angle [de]	PDA U1 [m]	PDA D [µm]	PDA P1-2	PDA P1-3	Angle Bin	Count	PDA U1-M	PDA U1-R	PDA D-Ms	PDA D-RM	PDA P1-2	PDA P1-2	PDA P1-3	PDA P1-3-RMS
0,653	0,653	0,1	-0,6127	2,28	24	11,3	2	22	-0,4936	0,3005	2,33	0,83	24,513	8,698	12,128	3,94
8,602	8,602	1	-0,3744	2,14	22,6	12,7	4	14	-0,1191	0,1484	2,51	0,59	26,42	6,21	14,42	3,964
8,664	8,664	1	-0,3744	0,8	8,5	8,5	6	10	0,1259	0,2809	2,86	0,89	30,071	9,408	19,059	5,691
17,226	17,226	2,1	-0,1362	2,41	25,4	15,5	8	31	1,0398	0,2753	2,4	0,98	25,321	10,349	15,939	4,88
58,048	58,048	7	0,8169	2,41	25,4	9,9	10	70	1,85	0,242	2,14	1,04	27,63	41,072	16,497	4,365
58,977	58,977	7,1	0,6978	0,27	2,8	8,5	12	73	2,272	0,2277	2,13	1,11	27,326	40,673	16,226	5,701
62,566	62,566	7,5	1,1744	2,01	21,2	11,3	14	87	2,7646	0,1855	2,22	1,18	35,813	62,272	17,233	5,369
65,095	65,095	7,8	1,1744	1,61	16,9	12,7	16	98	2,9102	0,1722	2	1,07	31,88	58,364	16,279	4,957
68,421	68,421	8,2	1,4126	1,61	16,9	9,9	18	87	3,0706	0,1973	2	1,1	49,233	89,509	16,763	4,805
69,677	69,677	8,4	1,4126	1,47	15,5	12,7	20	82	3,6001	0,2222	2,02	1,13	42,921	80,285	15,977	4,92
70,907	70,907	8,5	1,5318	3,62	38,1	19,8	22	129	4,0908	0,2905	1,77	1,28	51,316	96,99	16,46	5,004
71,026	71,026	8,5	1,5318	2,14	22,6	12,7	24	132	4,8893	0,3325	1,82	1,15	37,914	75,313	16,695	5,171
71,107	71,107	8,5	1,5318	1,34	14,1	11,3	26	146	5,3148	0,2779	1,91	1,22	48,793	90,703	17,792	5,062
72,14	72,14	8,7	1,6509	1,47	15,5	9,9	28	138	5,7339	0,2862	1,8	1,18	51,55	95,57	17,35	4,982
72,643	72,643	8,7	1,6509	5,09	53,6	26,8	30	137	6,0052	0,3315	1,85	1,34	63,066	109,205	17,57	5,391
74,532	74,532	8,9	1,6509	0,94	9,9	8,5	32	119	6,2864	0,4465	2,03	1,49	56,494	98,863	18,721	5,489
76,892	76,892	9,2	1,6509	2,95	31,1	19,8	34	147	6,7876	0,3851	2,02	1,34	57,277	100,467	17,364	5,49
76,906	76,906	9,2	1,5318	2,95	31,1	25,4	36	140	7,2044	0,4532	1,95	1,63	64,548	107,979	18,353	5,165
77,248	77,248	9,3	1,6509	1,61	16,9	14,1	38	155	7,6409	0,3755	1,92	1,41	76,645	120,465	18,307	4,855
78,206	78,206	9,4	1,77	2,68	28,2	18,4	40	142	7,9531	0,4833	1,76	1,34	74,734	120,401	17,359	5,218
79,147	79,147	9,5	1,77	1,21	12,7	15,5	42	144	8,1932	0,4642	1,84	1,29	62,627	107,848	18,255	5,274
83,904	83,904	10,1	1,8892	1,61	16,9	8,5	44	135	8,5528	0,4938	1,92	1,38	69,459	114,216	17,903	4,838
84,681	84,681	10,2	1,8892	2,14	22,6	15,5	46	134	8,8728	0,4264	1,77	1,23	57,24	102,917	18,09	5,18
85,501	85,501	10,3	1,8892	0	358,6	8,5	48	175	9,3227	0,4873	1,94	1,55	76,655	120,688	18,24	5,614

V tab. 5.3- 1 jsou ukázány hodnoty pro prvních 25 časových úseků třetího měření s dechovým objemem 1,5 l a periodou 3 s. Pro naše účely vyhodnocování postačí výsledky v šedých sloupcích. AT je čas od začátku měření do ukončení pokusu v milisekundách. Pracujeme-li s tímto časem, vyhodnocujeme data v kontinuálním průběhu celým měřením. Time je čas v milisekundách od počátku do konce jednoho cyklu a bereme-li v úvahu tento čas, řešíme průběh pouze toho daného cyklu. PDA U1 je rychlost částic v metrech za sekundu. PDA D je potom velikost částic (resp. jejich průměr) v mikrometrech.

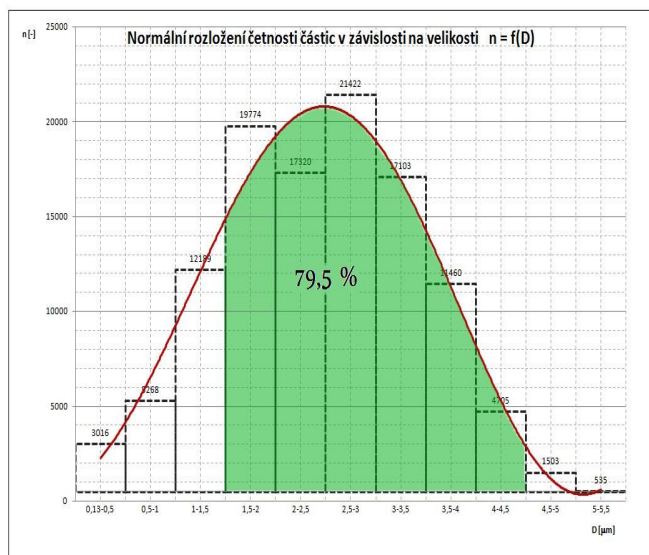
5.4 Velikost částic



Obr. 5.4- 1 Pravděpodobnostní rozložení částic

pravděpodobnostního rozložení velikosti částic (obr. 5.4- 1). Modře jsou vyznačeny oblasti velikosti částic, které nespádají do statisticky významného intervalu.

Z obr. 5.4- 2 je patrné, že rozložení velikosti generovaných částic má normální (Gaussovský) průběh v tomto případě se střední hodnotou $\mu = 2,41\mu\text{m}$, rozptylem $\sigma^2 \cong 1,31\mu\text{m}$ a směrodatnou odchylkou $\sigma \cong 1,1.14\mu\text{m}$. Průměrná hodnota velikosti částic je asi $2,46 \mu\text{m}$. Zeleně vyšrafovaná plocha odpovídá pravděpodobnosti, se



Obr. 5.4- 2 Normální rozložení velikosti částic

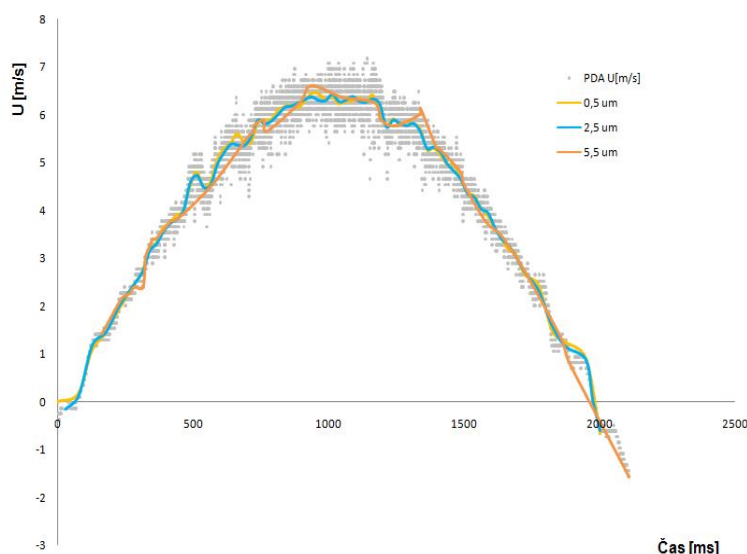
zpřesnit hodnoty výsledků, museli bychom provést více měření se stejným nastavením dechového objemu a periody a jednotlivé výsledky porovnávat.

Pro provedená měření byla na generátoru nastavena výchozí velikost částic $3\mu\text{m}$. Od této hodnoty se ve skutečnosti hranice velikosti částic výrazně odlišovala. Celkový rozptyl velikosti částic je kvůli typu rozložení závislý na délce měření. Z provedené statistické analýzy ale plyne, že částice přibližně menší jak $0,17 \mu\text{m}$ a větší jak $4,65 \mu\text{m}$ pro nás nemají na hladině spolehlivosti $\alpha = 0,05$ statistický význam, což je znázorněna na grafu

kterou vygenerovaná částice bude náležet intervalu nastavených $3\mu\text{m} \pm$ polovina nastavené velikosti (tedy $3 \pm 1,5\mu\text{m}$). Hodnota pravděpodobnosti je téměř 80%. Tento poznatek je pro nás důležitý při rozhodování, zda jsou ostatní analýzy relevantní pro částice generované v dané velikostní třídě. Zároveň pokud by byla hodnota pravděpodobnosti malá, znamenalo by to, že nelze generované částice považovat za monodisperzní. Tyto výsledky odpovídají měřené konfiguraci 0,5l dechového objemu s periodou 4 s. Pro ostatní nastavení byl rozdíl ve výsledcích asi 3,7 %.

5.5 Závislost rychlostí částic na jejich velikosti

Na obr. 5.5- 1 je zobrazen průběh průměrné rychlosti v nádechu prvního cyklu třech velikostních intervalů částic. Intervaly mají rozpětí $\pm 0,5 \mu\text{m}$ od jejich středu.

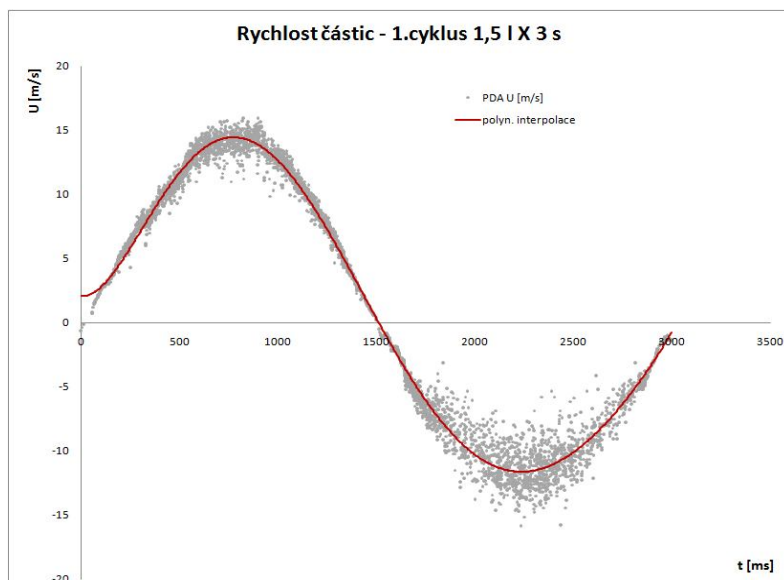


Průběh prvních dvou intervalů je až na oblast kolem 500 ms poměrně hladký. Kdežto průběh rychlosti pro interval se středem v 5,5 μm má více výrazných skoků a celkově je více deformovaný od ideálního sinusového průběhu. Tato deformace je způsobena především velmi malou četností velikosti částic spadajících do daného intervalu. Navíc v oblastech s nízkou rychlostí se částice této velikosti nevyskytovaly téměř vůbec.

Obr. 5.5- 1 Průběh průměrné rychlosti částic různých intervalů velikosti

5.6 Rychlosti částic

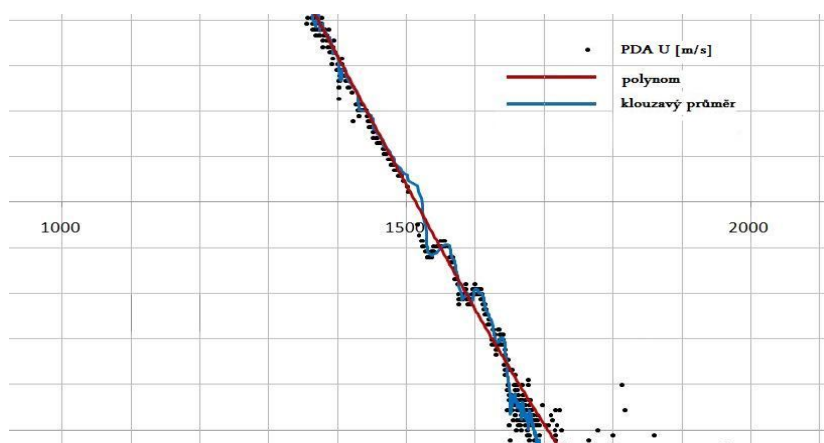
Sinusový průběh rychlosti částic odpovídá pracovnímu principu pístového mechanismu. Ze srovnání grafů rychlostí pro jednotlivé dechové režimy plyne, že pro menší dechové objemy se částice pohybují nižší střední rychlostí a naopak. U měřených hodnot je tedy dobrá korelace mezi dechovým objemem a rychlostí.



Obr. 5.6- 1 Průběh rychlosti částic prvního cyklu

Interpolací naměřených dat polynomem šestého řádu v programu MS Excel získáme křivku střední rychlosti sinusového tvaru odpovídající sinusovému průběhu dýchání. Vlivem vírů a jiných turbulencí se průběh deformuje (částice mají i flukuační složku rychlosti). Z grafu na obr. 5.6- 1 je patrné, že v druhé části dechového cyklu (výdech) dochází k větším turbulencím. Ty jsou charakterizované intenzitou turbulence. Z grafu je také zřejmé, že s rostoucí

rychlostí roste i množství naměřených hodnot. V oblasti nižších rychlostí se proudění jeví jako laminárnější. Je to způsobeno menším Reynoldsovým číslem pro menší rychlosti a malým počtem naměřených hodnot. V oblasti nižších rychlostí je tedy



Obr. 5.6- 2 Porovnání interpolace polynomické a klouzavého průměru

Tab. 5.6- 1 Maximální střední rychlosti

Maximální střední rychlosti pro nádech	
	$U_{\text{mean-max}}$ [m/s]
1. Cyklus	14,44575961
2. Cyklus	14,46739114
3. Cyklus	14,46512886
4. Cyklus	14,46241478
5. Cyklus	14,38220449
6. Cyklus	14,33010873
7. Cyklus	14,42148147
8. Cyklus	14,33603766
9. Cyklus	14,51059698

V tabulce 5.6- 1 je zobrazeno srovnání maximálních středních rychlostí nádechů pro konfiguraci 1,5 l X 3 s. Pro výpočet středních rychlostí bylo použito kubického splinu. Přibližně od pátého cyklu se začaly hodnoty v řádu desetin měnit. Tyto odchylky jsou způsobené snižujícím se počtem naměřených hodnot pro jednotlivé cykly. Pro devátý cyklus byla naměřena pouhá 1/5 celkového počtu hodnot prvního cyklu. Pro konfigurace s nižším dechovým objemem není tato sestupná tendence tak výrazná, bylo by tedy stejným postupem dosaženo přesnějších výsledků.

6 ZÁVĚR

Laserové optické měřicí techniky mají oproti jiným postupům velkou řadu výhod. Nejvýznamnější z nich je přesnost měření. Jednotlivé metody byly rozděleny dle třech různých rysů a blíže popsány tak, aby čtenář získal základní přehled o každé z nich. Na základě rešerše publikací, odborných článků, posterů a mnoha internetových zdrojů byly vypracovány základní funkční principy, modifikace, oblasti použití a přednosti dílčích systémů. V této části by mohla práce být doplněna o nelaserové metody měření tak, aby bylo možné provést obsáhlejší a ucelenější srovnání. V praktické části práce bylo provedeno měření rychlosti a velikosti částic aerosolu na modelu plic pomocí PDA techniky. V oblasti velikosti částic byla určena statisticky významná oblast a zjištěna pravděpodobnost s jakou budou částice náležet intervalu plus/mínus polovina zadané velikosti částic na generátoru. Dále jsou nastíněny průběhy průměrných rychlostí částic spadajících do určitého velikostního intervalu. V závěrečné části byla vyšetřována naměřená data rychlostí částic. Rozložení rychlostí částic přibližně odpovídá sinusovému průběhu dýchání a při výdechu jsou patrné výraznější turbulence proudění než při nádechu. Ze srovnání maximálních středních rychlostí nádechů jednotlivých cyklů plyne, že rozsah měření (resp. počet naměřených hodnot) nám významně ovlivňuje přesnost získaných hodnot. Zde by práce mohla pokračovat zpřesněním výsledků, provedením více měření o stejné konfiguraci dechového objemu a periody. Přínosným by bylo i srovnání různých metod průměrování a určení nejpresnější z nich pro dané téma.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E., ŠTĚTINA, J. Vizualizační a optické měřicí metody. 2. vydání. Brno, Květen 2007. Dostupné z: < <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/> >.
- [2] LEHNER, M.; et al. Applied Optical Measurements: Heat and Mass Transfer, ISBN 3 540 66173 5 (hbk), (Berlin: Springer) 462 pp, 1999
- [3] RAFFEL, M. Particle Image Velocimetry A Practical Guide, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 3-540-63683-8, 1998
- [4] KNYBLOVÁ, L. Fyzikální principy technických měřících metod [online]. [2004/2005] [cit. 2010-04-04]. Dostupné z: < <http://www.knyblova.czweb.org/semestralky/fptmm.pdf> >.
- [5] ALBRECHT, H.-E.; et al. Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. ISBN 3-540-67838-7.
- [6] Dantec Dynamics - Laser optical measurement systems and sensors [online]. c2011 [cit. 2011-05-15]. Dostupné z: < <http://www.dantecdynamics.com/> >
- [7] URUBA, V. Laser Doppler Anemometry (LDA) [online]. 2003 [cit. 2011-04-08]. Ústav termomechaniky AV ČR. Dostupné z: < <http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/LDA.pdf> >
- [8] LDA [online]. 5.2.2011 [cit. 2011-04-03]. VUT Fakulta stavební – Ústav vodních staveb. Dostupné z: < <http://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/zkladn1.htm> >
- [9] TSI Inc – The Leader In Performance Measurement Solutions [online]. c2011 [cit. 2011-02-24]. Dostupné z: < <http://www.tsi.com/en-1033/index.aspx> >
- [10] LaVision GmbH. LaVision – We count on photons [online]. [2011] [cit. 2011-02-24]. Dostupné z: < <http://www.lavision.de/en/> >
- [11] STIEGLMEIER, M. Principles of PDA [online]. 16 April 1999, 8, [cit. 2011-04-09]. Slideshow. Dostupné z: < <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=455> >
- [12] Phase Doppler Anemometry [online]. 2006 [cit. 2011-03-17]. Dostupné z: < <http://www.tut.fi/units/me/ener/laitteistot/EFD/PDA.html> >
- [13] KOŠNER, J. Měřicí systém PDA [online]. [cit. 2011-04-08]. Projekt fondu rozvoje vysokých škol. Dostupné z: < <http://ottp.fme.vutbr.cz/frvs-pda/index.php?page=system> >
- [14] Artium Technologies Inc [online]. c2000-2008 [cit. 2011-03-26]. Dostupné z: < <http://www.artium.com/> >
- [15] KÖNIG, G., ANDERS, K., FROHN, A., “A new light-scattering technique to measure the diameter of periodically generated moving droplets”. J.Aerosol.Sci.1986:17:157-167.
- [16] DAMESCHKE, N., SENESE, S., TROPEA, C., WOITE, A., “Planare Partikelgrößenbestimmung”. 8. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik, Shaker Verlag, Aschen: paper 49, 2000.
- [17] HOŠEK, J. Bubbled Diameter Determination in Large Measurement Volume Using Phase Doppler Anemometry. International Conference WESIC'08, Bucharest, 25-26 September 2008
- [18] Department of Mechanical Engineering, HKUST – Energy & Thermal Engineering [online]. c2007 [cit. 2011-02-24]. Dostupné z: < http://www.me.ust.hk/~webctrl/?q=Energy_and_Thermal_Engineering >
- [19] BOREE, J., BEN, L., BAZILE, R., Optical methods for the measurement of

- constant and variable density flows. Int. Summerschool on variable density turbulent flows . Barcelona, Sept. 1 – 5, 2003
- [20] HANSEN, M. Lasers and Fluid Dynamics - LDA, PDA and PIV. Presentation of Dantec Dynamics, 05.04.2002
- [21] YE PU, LUJIE CAO, HUI MENG - Fundamental Issues And Latest Development In Holographic Particle Image Velocimetry. 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New Orleans, Louisiana, November 17–22, 2002. IMECE2002-33171
- [22] Wikipedia - Particle tracking velocimetry [online]. 13.3.2011 [cit. 2011-04-09]. Dostupné z: < http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_tracking_velocimetry >
- [23] STEGEMAN, Y.W. Particle Tracking Velocimetry. 20.4.2010. WFW 95.100
- [24] Grant, I., 1997. Particle image velocimetry: a review, Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol 211, Part C, pp.55-76.
- [25] IAV GmbH. Doppler Global Velocimetry. Measurement of the 3-D Flow Field. 11.5.2005
- [26] Doppler Global Velocimetry (DGV) / Planar Doppler Velocimetry (PDV) [online]. [2010] [cit. 2011-04-10]. Dostupné z: < <http://www.holomap.com/dgv.htm> >
- [27] Wang G; Sellens RW; Olesen MJ; Bardon MF. "Preliminary work on an optical patternator". RMC Mechanical Engineering Report No. 931001, Kingston, Ontario, October, 1993.
- [28] LÍZAL, F. Experimentální výzkum transportu aerosolů v dýchacím traktu člověka: Discourse on the Dissertation Thesis. Brno, 2010. 36 s. Pojednání ke státní doktorské zkoušce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí. Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc.
- [29] JEDELSKÝ, J., LÍZAL, F., JÍCHA, M. Realistic Transparent Human Airway Model: Flow Distribution And Aerosol Transport Under Steady And Unsteady Flows. ISTP20 paper. The 20th International Symposium on Transport Phenomena 7-10 July, 2009, Victoria BC, CANADA.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Název
LDA	Laser Doppler Anemometry
PDA	Phase Doppler Anemometry
GPDA	Global Phase Doppler Anemometry
IPI	Interferometric Particle Imaging
CFD	Computational Fluid Dynamics
PIV	Particle Image Velocimetry
CCD	Charge-Coupled Device
TR-PIV	Time Resolved Particle Image Velocimetry
H-PIV	Holographic Particle Image Velocimetry
LIF	Laser Induced Fluorescence
PTV	Particle Tracking Velocimetry
DGV	Doppler Global Velocimetry

Symbol	Název	Jednotka
c	rychlost světla	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
λ_0	vlnová délka světla z laseru	$[\text{m}]$
f_0	počet světelných vln	$[-]$
w	rychlost částice	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
f_w	frekv. Dopadu světelných vln	$[\text{Hz}]$
ρ	jednotkový vektor	$[-]$
λ_w	vlnová délka odpovídající f_w	$[\text{m}]$
θ	poloviční úhel mezi paprsky	$[\text{°}]$
ψ	elevační úhel	$[\text{°}]$
φ	rozptylový úhel	$[\text{°}]$
Δx	posunutí částic v ose x	$[\text{m}]$
Δy	posunutí částic v ose y	$[\text{m}]$
ΔT	časové posunutí	$[\text{s}]$
w_x	složka rychlosti částice v ose x	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
w_y	složka rychlosti částice v ose y	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
α	hladina spolehlivosti	$[-]$
μ	střední hodnota	
σ^2	rozptyl	
σ	směrodatná odchylka	