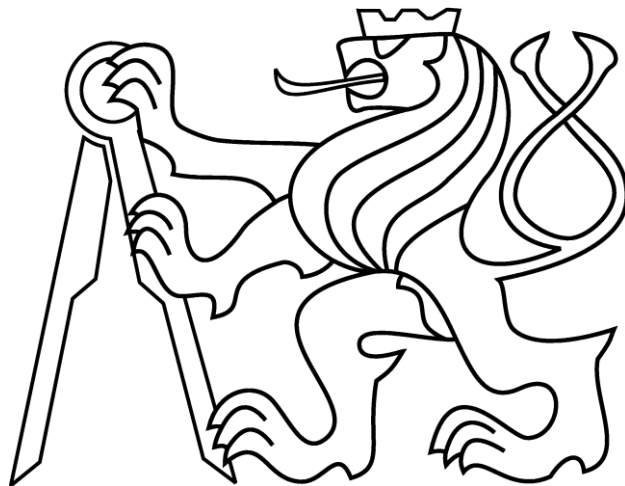


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

Ú 12112



Bakalářská práce

Mikro PIV měření v mezní vrstvě za účelem stanovení tečného napětí na
stěně

**Micro PIV measurement within boundary layer for wall shear stress
determination**

2019

Tomáš Miřátský

Zadání Bakalářské práce

(vloženo po tisku)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Mikro PIV měření v mezní vrstvě za účelem stanovení tečného napětí na stěně“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Adama Bláhy s použitím literatury uvedené na konci práce v seznamu použité literatury.

V Praze, 1.7.2019

Tomáš Miřátský

Poděkování

Za pomoc při vedení mé bakalářské práce, poskytnutí konzultací, pomoc s analýzou dat experimentu, poskytnutí odborných rad a připomínek a za strávený čas v laboratoři bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Adamu Bláhovi.

Anotační list

Jméno autora:	Tomáš Miřátský
Název BP:	Mikro PIV měření v mezní vrstvě za účelem stanovení tečného napětí na stěně
Anglický název:	Micro PIV measurement within boundary layer for wall shear stress determination
Rok:	2019
Obor studia:	Bez oboru
Ústav/Odbor:	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí:	Ing. Adam Bláha
Bibliografické údaje:	počet stran: 82 počet obrázků: 44 počet tabulek: 1 počet příloh: 1
Klíčová slova:	mezní vrstva, rychlostní pole, rychlostní profil, PIV
Keywords:	boundary layer, velocity field, velocity profile, PIV

Anotace:

Tato práce se zabývá experimentálním měřením rychlostního profilu v mezní vrstvě tenké desky obtékané proudem vzduchu. K tomuto účelu je navržena měřící trať. Měření je provedeno optickou metodou mikro Particle Image Velocimetry. Na základě zjištěného rychlostního profilu je stanoveno tečné napětí na stěně desky.

Abstract:

This thesis deals with the experimental measurement of the velocity profile in the boundary layer of a thin plate overflowed by the air flow. For this purpose was designed an experimental track. The measurement is performed by optical method micro Particle Image Velocimetry. Based on the detected velocity profile, the wall shear stress is determined.

Obsah

Seznam použitých veličin	8
1. Úvod.....	9
2. Mechanika tekutin	10
2.1. Proudění tekutin.....	11
2.1.1. Tečné napětí v proudící tekutině	12
2.2. Obtékání těles	13
2.3. Mezní vrstva.....	14
3. Měření rychlostí v malých rozměrech	16
3.1. Metoda PIV	17
3.1.1. Metoda mikro PIV	19
3.1.2. Metoda Long-distance mikro PIV.....	20
3.2. Metoda LDA.....	20
3.2.1. Vícesložkové měření	23
3.3. Značkovací částice.....	23
4. Návrh tratě pro mikro PIV měření	25
4.1. Popis původní měřicí tratě	26
4.2. Úprava aerodynamického tunelu	28
4.3. Úprava měřicí tratě.....	31
5. Návrh kalibračních postupů pro PIV metody	33
5.1. Kalibrace pomocí kalibrační desky.....	33
5.2. Kalibrace pomocí posunu vybraného bodu	35
5.3. Kalibrace pomocí kalibru nebo známých rozměrů	35
6. Experimentální měření	37
6.1. Kalibrace vybraným postupem	39
6.2. Měření metodou Long distance mikro PIV	40
6.3. Analýza dat	41

6.3.1. Rychlostí pole a profil bez testovacího vzorku.....	41
6.3.2. Rychlostní pole a profily v mezní vrstvě nad deskou	42
6.3.3. Výsledné rychlostní pole a profil	47
6.3.4. Výpočet tečného napětí v mezní vrstvě.....	48
7. Závěr.....	50
Seznam zdrojů	52
Seznam obrázků	53
Seznam tabulek	54
Seznam příloh.....	54

Seznam použitých veličin

C	(px)	posun bodu
d	(m)	vzdálenost signálu
f	(Hz)	frekvence
h	(m)	vzdálenost desky
K	(1)	součinitel konzistence
l	(m)	vzdálenost
M	(mm/px)	měřítka kalibrace
n	(1)	index toku
S	(m)	posun bodu
t	(°C)	teplota vzduchu
U	(m·s ⁻¹)	vektor rychlosti
V	(m·s ⁻¹)	vektor rychlosti
v	(m·s ⁻¹)	rychlost
x	(m)	souřadnice
y	(m)	souřadnice
z	(m)	souřadnice
δ	(m)	tloušťka mezní vrstvy
η	(Pa·s)	dynamická viskozita
θ	(°)	úhel natočení
λ	(nm)	vlnová délka
ν	(m ² ·s ⁻¹)	kinematická viskozita
ρ	(kg·m ⁻³)	hustota tekutiny
τ	(Pa)	tečné napětí

1. Úvod

V oblastech techniky moderního světa, kde dochází k proudění vazkých tekutin, obtékání těles a k dalším jevům s obtékáním spojených je potřeba znát a vyšetřovat pojmy, jako je rychlostní profil, mezní vrstva nebo například tečné napětí v proudící tekutině.

K tomu slouží experimentální měřicí tratě, které umožňují simulovat reálné situace a následně je v kontrolovaných podmínkách vyšetřit. Jedním z mnoha typů těchto tratí jsou aerodynamické tunely. První aerodynamické tunely byly navrženy a sestaveny pro zkoumání v oblasti letectví a automobilů. S vývojem techniky bylo možné posunout hranice bádání do mikro světa.

Cílem práce je navrhnout a sestavit experimentální měřicí trať pro optickou metodu mikro PIV, navrhnout možné kalibrační postupy měřicí techniky a následně proměřit a vyhodnotit rychlostní profil v mezní vrstvě při obtékání tenké desky vzduchem. Výsledkem práce je průběh tečného napětí v proměřené mezní vrstvě.

2. Mechanika tekutin

Mechanika tekutin se zabývá pohybem a rovnováhou tekutin za účinku vnějších sil. Pomocí fyzikálních zákonů stanovuje vzájemné účinky tuhých stěn a těles na tekutiny i naopak a řeší další úkoly, jako je např. měření rychlosti a průtoku, problematika obtékání a odporu těles atd. Cílem je vysvětlovat a předvídat jevy a chování v tekutinách v určitých podmínkách, tj. stanovit rozložení tlaků, hustoty, teploty, rychlosti a popsat změny těchto veličin v čase a v různých místech uvnitř tekutiny [1].

Mechaniku tekutin lze rozdělit různými způsoby, např. dle hlediska na statiku tekutin, kinematiku tekutin a dynamiku tekutin.

Podle druhu tekutin rozlišujeme hlavně mechaniku kapalin (hydromechaniku) a mechaniku plynů (aeromechaniku). Dále rozlišujeme magneto-aero-hydromechaniku elektricky vodivých tekutin a mechaniku vícefázových tekutin.

Podle vyšetřovacích metod známe mechaniku tekutin teoretickou a experimentální.

Mechanické chování kapalin a plynů je do jisté míry podobné, takže lze obecný popis provést společně pro obě média, ale s přihlédnutím na zvláštnosti obou látek rozlišujeme tekutiny:

- Nestlačitelné látky, které za působení tlaku jen málo mění svůj objem. Patří sem kapaliny, které jsou téměř nestlačitelné. V malém objemu tvoří kapky. Vyplňují tvar nádoby a s ohledem na gravitační zrychlení (případně vektor výsledného zrychlení) zaujímají patřičnou část nádoby, kde vytváří volnou hladinu.
- Stlačitelné, tedy i látky rozpínavé, které vždy vyplňují celý objem nádoby. Podle stavu vůči bodu zkapalnění je dělíme na plyny a páry. Společně jsou označovány jako vzdušniny.

Další důležitou vlastností v rozlišení tekutin je vazkost tekutin neboli viskozita. Ta udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny. Jelikož při uvažování obou zmíněných vlastností vede řešení proudění tekutin k soustavě nelineárních parciálních diferenciálních rovnic druhého řádu, tzv. Navierových – Stokesových

rovníc, nahrazujeme ve výpočtech reálnou tekutinu určitým matematickým modelem tekutiny s idealizovanými vlastnostmi. Podle uvažování viskozity a stlačitelnosti jako vlastností matematického modelu tekutiny můžeme rozlišit následující 4 modely:

1. ideální kapalina, tj. nevazká nestlačitelná tekutina,
2. ideální plyn, tj. nevazká stlačitelná tekutina,
3. vazká kapalina (reálná), tj. vazká nestlačitelná tekutina,
4. vazký plyn (reálný), tj. vazká stlačitelná tekutina [1].

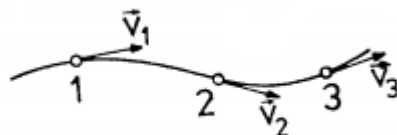
Pro určení stavu tekutiny nacházející se v rovnováze užíváme stavových veličin a fyzikálních vlastností tekutin popsanych v [1 str. 11-16].

2.1. Proudění tekutin

Ačkoli je tekutina látka, která se účinkem vnějších sil nevratně deformuje, nemá vlastní tvar a je složena z molekul, při vyšetřování problematiky v mechanice tekutin uvažujeme tekutinu jako spojité prostředí, tedy kontinuum. Vlivem tečných sil se částice tekutiny snadno uvedou do pohybu. Takový pohyb tekutiny nazýváme tečení, tok nebo proudění. Proudění tekutiny je ve skutečnosti vždy 3 rozměrné (prostorové), ale v určitých výpočtových situacích jej můžeme považovat za 2 rozměrné (rovinné), nebo i 1 rozměrné, převažuje-li jeden rozměr nad zbylými dvěma, jako např. při proudění v potrubí [1].

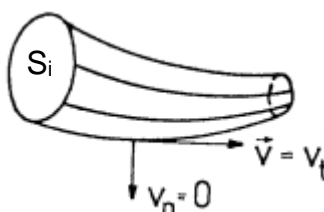
Každé proudění má svůj počátek a konec, tzn. mění se s časem. Takové proudění nazýváme neustálené, nestacionární. Pokud se ve vytyčeném krátkém časovém úseku proudění nemění, nebo se mění jen minimálně, označujeme ho za ustálené, stacionární, případně kvazistacionární. Podle způsobu pohybu kapaliny při proudění lze rozlišit proudění potenciální (nevířivé), laminární a proudění vířivé, turbulentní.

Při sledování pohybu určité částice v proudění (proudovém poli) tato částice cestuje po dráze – trajektorii. Pro potřeby vyšetření proudění tekutiny nám toto nestačí. Zavádí se pojem proudnice, tj. vektorová čára v rychlostním poli. Proudnice je křivka, jejíž tečny mají v každém bodě směr vektoru rychlosti v_i , viz obr. 2.1. Trajektorie a proudnice jsou vždy shodné při stacionárním proudění, při nestacionárním proudění obecně nikoli.



Obr. 2.1 Proudnicice [1]

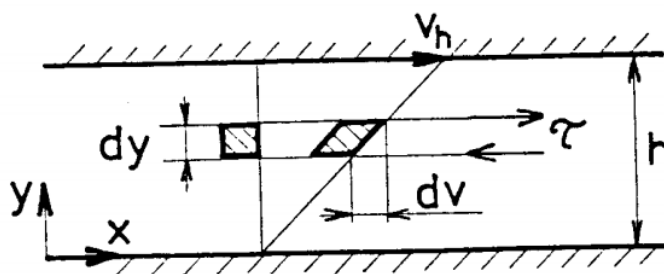
Proudová trubice je pomyslný útvar, jehož plášť je tvořen proudnicemi. Tyto proudnice prochází uzavřenou křivkou o průřezu S_i . Z definice proudnice vyplývá, že v každém bodě tohoto pláště je rychlost tečná ke stěně pláště. Normálové složky rychlosti v_n jsou nulové a pláštěm neprotéká žádná tekutina.



Obr. 2.2 Proudová trubice [1]

2.1.1. Tečné napětí v proudící tekutině

Vazké tekutiny mají schopnost přenášet tečná napětí mezi jednotlivými vrstvami proudící tekutiny. Pokud pro vznik tečného napětí v laminárním proudění platí Newtonův zákon, nazývají se tekutiny Newtonské. Příklad lze ukázat na tenkém kapalinovém filmu mezi unášenou a stojící deskou. Laminární proudění tekutiny na povrchu stojící desky má nulovou rychlost, tekutina na desce ulpívá. Rychlost proudění tekutiny směrem k pohybující se desce narůstá až na hodnotu rychlosti unášené desky. Vlivem viskozity a odporu proti pohybu tekutiny vzniká tečné napětí τ .



Obr. 2.3 Vznik tečného napětí mezi dvěma deskami [1]

Pro výpočet tečného napětí platí vztah

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy}, \quad (1)$$

kde η je dynamická viskozita a dv/dy je rychlostní gradient. Dynamická viskozita tekutiny je závislá na teplotě. V souvislosti s dynamickou viskozitou lze stanovit kinematickou viskozitu dle

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (2)$$

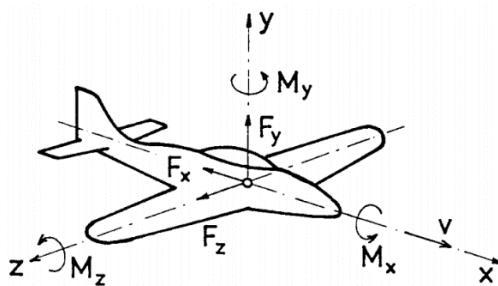
kde ρ je hustota tekutiny. Pokud se vznik tečného napětí v tekutině neřídí Newtonovým zákon (1), jedná se o neneutonské tekutiny a vznik tečného napětí je popsán složitější funkcí

$$\tau = k \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^n + \tau_0, \quad (3)$$

kde k je součinitel konzistence, n je index toku a τ_0 je mezní tečné napětí [1].

2.2. Obtékání těles

Pokud je těleso obtékáno tekutinou, nebo se v ní pohybuje, působí na něj výsledná síla a moment, které lze rozložit na 3 složky. U sil to jsou: odpor F_x , vztlak F_y a boční síla F_z . U momentů to je moment klopivý M_z , klonivý M_x a zatáčivý M_y (viz obr. 2.4) [1].

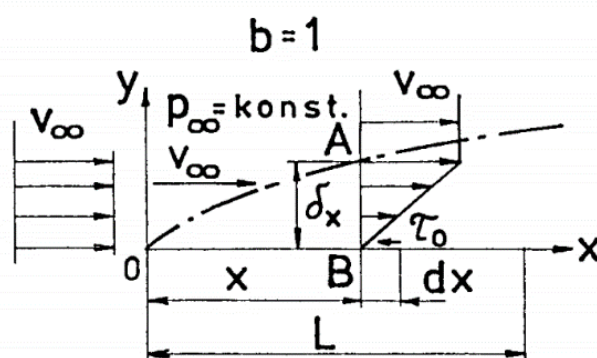


Obr. 2.4 Síly a momenty působící na obtékané těleso [1]

Podle tvaru obtékaného tělesa lze rozlišit obtékání dvourozměrné, osově symetrické a třírozměrné s nebo bez osy symetrie.

2.3. Mezní vrstva

Mezní vrstva je tenká vrstva tekutiny, která se nachází v blízkosti obtékaných stěn. Tekutina na stěně lpí, tzn. rychlost tekutiny na stěně je nulová a vlivem viskozity se zpomalí i neblížejší vrstvy tekutiny. Vně mezní vrstvy je víření téměř zanedbatelné, takže proudění je možné považovat za potenciální. Směrem k vnější hranici dochází k nárůstu rychlosti až na hodnotu, která odpovídá rychlosti potenciálního proudu. Kvůli malé tloušťce mezní vrstvy gradient rychlosti dosahuje velkých hodnot.



Obr. 2.5 Idealizovaná mezní vrstva na desce [1]

Rychlostní profil je v laminární mezní vrstvě pro zjednodušení nahrazen přímkou. Rychlost uvnitř této mezní vrstvy je

$$v = v_{\infty} \frac{y}{\delta x}, \quad (4)$$

tloušťka mezní vrstvy je dána vztahem

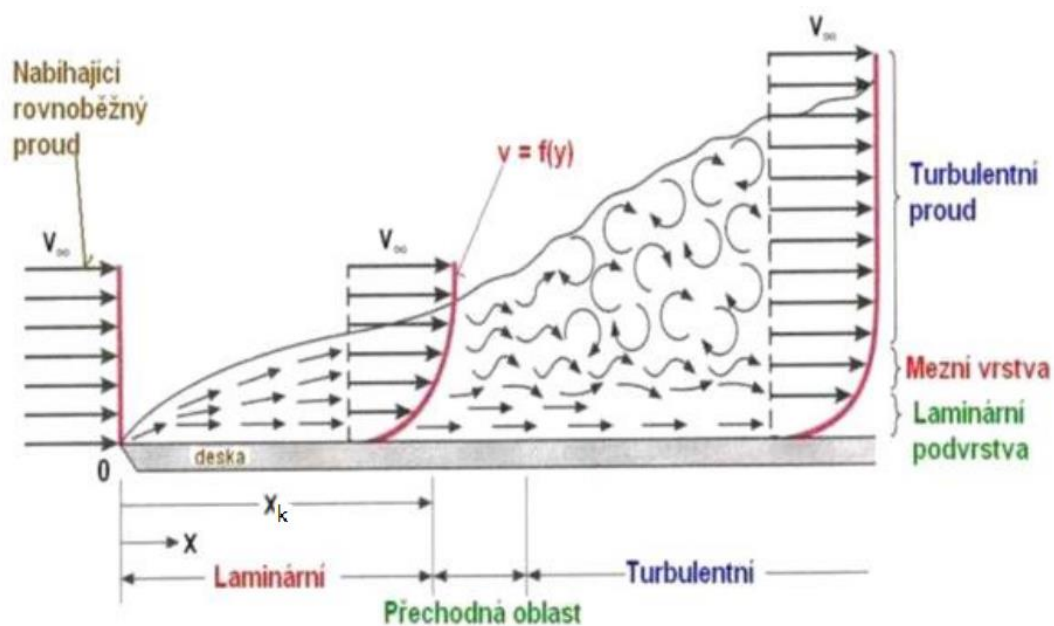
$$\delta x = \frac{3,46 \cdot x}{\sqrt{Re}}, \quad (5)$$

kde Re je Reynoldsovo číslo ve vzdálenosti x od náběžné hrany:

$$Re = \frac{v_{\infty} \cdot x}{\nu}, \quad (6)$$

v_{∞} je rychlost nenarušeného proudu a ν je kinematická viskozita [1].

Pokud mezní vrstva dosáhne určité tloušťky, pak se laminární mezní vrstva stane nestabilní a v určité vzdálenosti od náběžné hrany se změní v turbulentní. Oblast mezi těmito dvěma vrstvami se nazývá přechodová. Tento vývoj se označuje jako smíšená mezní vrstva (obr. 2.6) [1].



Obr. 2.6 Vývoj mezní vrstvy [2]

Pro stanovení přechodu mezi laminární a turbulentní vrstvou je vyjádřeno kritérium přechodu. Tím je Reynoldsovo číslo kritické, jehož hodnota se mění se stupněm turbulence proudu. Udává se

$$Re_k = \frac{v_\infty \cdot x_k}{\nu} = 5 \cdot 10^5, \quad (7)$$

ale může být větší i menší, x_k je vzdálenost přechodové oblasti od náběžné hrany [1].

3. Měření rychlostí v malých rozměrech

Rychlost v proudovém poli se měří anemometry. Jsou to zařízení, která na základě určitého fyzikálního principu měří buď přímo rychlost, nebo ji vyhodnotí měřením jiné veličiny. Měření tedy lze realizovat různými metodami. Každá metoda má svá specifika a tím pádem lze určit její vhodnost použití. Metody dělíme podle různých kritérií.

Rozlišuje se, zdali se jedná o měření invazivní, nebo neinvazivní. Tzn. jestli měření zasahuje do proudění a ovlivňuje ho v případě invazivních, nebo se jedná o sofistikovanější metody měření, které do proudového pole nezasahují a jsou tím pádem neinvazivní.

Dalším důležitým faktorem měřící metody je, kolik složek vektoru rychlosti je schopna zaznamenat a v jaké dimenzi. Od základních mechanických metod, které jsou schopny určit jednu složku vektoru rychlosti v jednom místě (bodě), až po 2 nebo 3 vektorové měření rychlosti, případně rychlostního pole v rovině i objemu.

Základní typy anemometrů se dělí na:

1. mechanické (lopatkové, vrtulkové, miskové),
2. tlakové (Pitotova trubice, Prandtlova trubice),
3. teplotní (žhavicí – ochlazovací),
4. ostatní, resp. speciální. (s využitím laseru – PIV, LDA, nebo ultrazvuku, indukce atd.).

Další metodou, jak získat místní střední (průměrnou) rychlost proudění je užití některého z mnoha typů průtokoměrů a dopočítáním ze známých rozměrů.

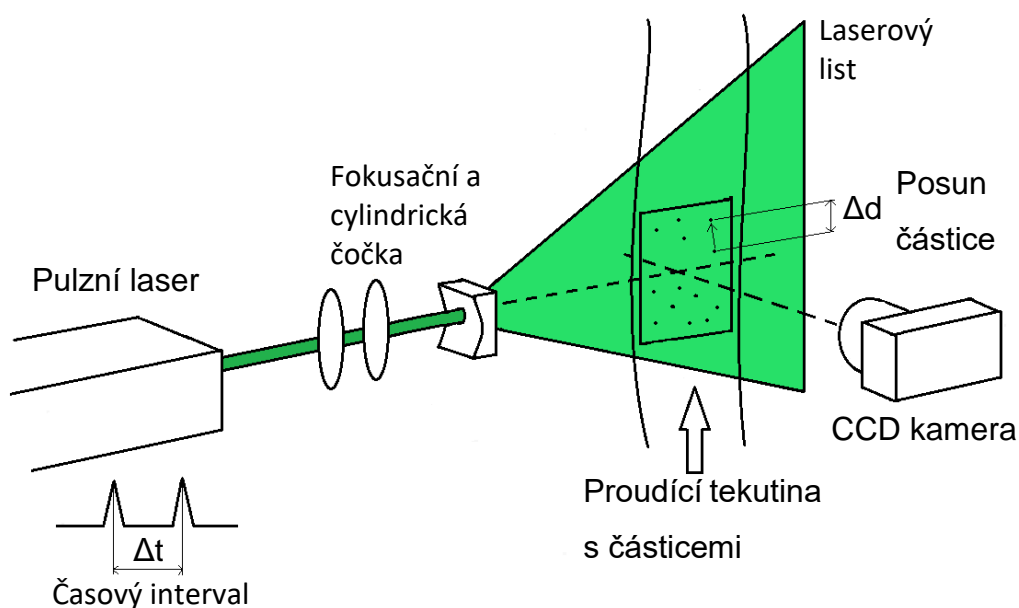
Vzhledem k povaze tématu této práce budou dále popsány neinvazivní speciální metody měření rychlosti/rychlostního pole, které umožňují sledovat více složek vektoru rychlosti v malých rozměrech.

3.1. Metoda PIV

Particle image velocimetry (PIV) je metoda měření rychlostního pole proudící tekutiny za pomoci optického snímání pohybu částic v průřezu toku. S využitím vysokorychlostních kamer a výpočetního softwaru umožňuje vyhodnocení a zobrazení rychlostního pole v reálném čase. Jedná se o metodu s rozsahem měření od nuly až po nadzvukové rychlosti. Metoda vyžaduje kalibraci zařízení a přítomnost stopovacích částic v proudění.

Konfigurace PIV metody (obr. 3.1):

1. laserová dioda nebo pulzní laser
2. cylindrická čočka
3. vysokorychlostní kamera CCD
4. zpracování a porovnání dat



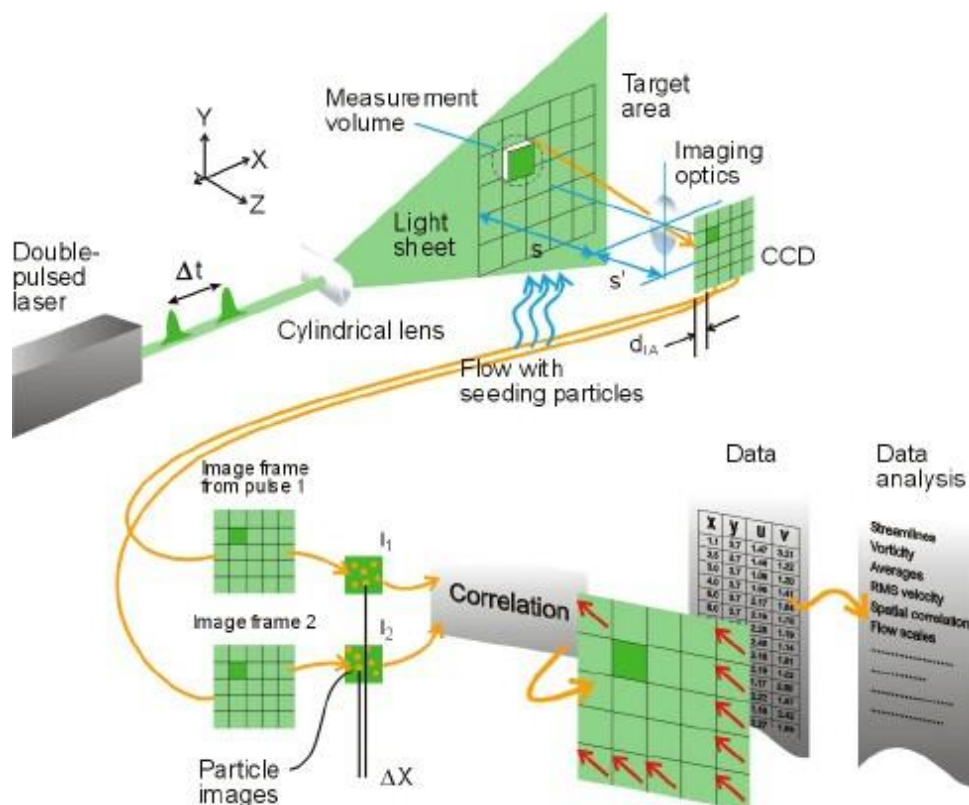
Obr. 3.1 Uspořádání PIV metody

Standardní uspořádání metody PIV měří dvě složky vektoru rychlosti v rovině. Zkoumaná oblast je osvětlena laserovou diodou nebo pulzním laserovým paprskem, který je přes cylindrickou čočku rozšířen v tenký list světla. Částice rozptýlené v proudící tekutině se pohybují v této osvětlené rovině a odráží světlo. Rovina s osvětlenými částicemi je snímána vysokorychlostní kamerou umístěnou kolmo k této rovině. Kamera zaznamenává po sobě jdoucí snímky v časovém

intervalu, který odpovídá intervalu záblesků pulzního laseru, přičemž každý snímek obsahuje jednotlivé světelné impulsy odražené od proudících částic.

Následuje vyhodnocení sekvence dvou snímků pomocí softwaru. Zaznamenané snímky jsou rozděleny do menších vyšetřovacích oblastí. V rámci této oblasti software porovnává polohu částic na obou snímcích pomocí algoritmu, například pomocí vzájemné nebo adaptivní korelace (Cross/Adaptive correlation). Výsledkem korelace vyšetřované oblasti je průměrné posunutí částic v čase, tedy vektor rychlosti pro danou oblast. Při aplikaci na určené množství dvojic snímků je výstupem vektorové pole rychlostí. Graficky zpracované vektorové pole obsahuje množství šipek, které znázorňují velikost a směr rychlosti proudění [3]. Princip metody je na obr. 3.2.

Pro potřeby zjišťování třetí složky vektoru rychlosti v proudění je možné využít složitějších verzí metody PIV. Jedná se hlavně o metody Stereo PIV, také označované jako 2D3C PIV (D jako dimensions, dimenze, rozměr a C jako components, složky), anebo sofistikovanější 3D PIV, také označované jako 3D3C PIV, TOMO PIV nebo ang. Volumetric Velocimetry.



Obr. 3.2 Princip metody PIV firmy Dantec Dynamics [4]

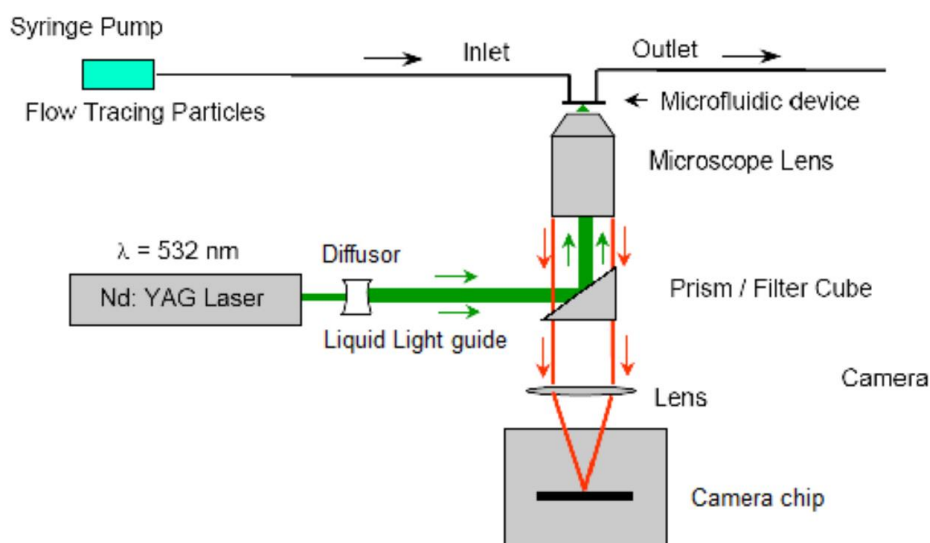
Metoda Stereo PIV měří 3 složky vektoru rychlosti ve dvou dimenzích, tedy v ploše. Hlavním rozdílem oproti klasické metodě PIV je použití dvou vysokorychlostních kamer zároveň oproti jedné. Tyto kamery jsou vůči sobě pootočený o daný úhel a nasměrovány na měřenou oblast prosvícenou tenkým laserovým listem stejně jako v klasickém PIV. Kvůli pootočení dávají kamery mírně odlišné snímky. Tento rozdíl mezi snímky představuje třetí složku vektoru rychlosti. Využívá se tzv. Parallax efektu, který umožňuje dopočítání (vytažení) třetího rozměru ze dvou naměřených ploch.

Metoda 3D PIV měří všechny 3 složky vektoru rychlosti v prostoru (3D). Oblast měření je nasvícená silným laserovým listem a ke snímání obrazů se používají až 4 vysokorychlostní kamery. S tím vzrůstá náročnost metody na kalibraci a vyhodnocení.

3.1.1. Metoda mikro PIV

Metoda mikro PIV je odvozená od klasického PIV. Zabývá se měřením rychlostního pole v malých (až mikroskopických) rozměrech. Využívá podobné vybavení, což zahrnuje vysokorychlostní kameru CCD nebo CMOS, zdroj laserového paprsku a software pro vyhodnocení měření. Přidaným zařízením je zde mikroskop, který umožňuje zaostřit kameru na potřebný mikroskopický rozměr. V tomto případě jsou nižší nároky na vlastnosti laserového paprsku a může být použit kontinuální laserový zdroj. Základní princip včetně vyhodnocení dat je totožný. Rozdíl je ve velikosti zkoumané oblasti, velikosti částic rozptýlených v tekutině a ve způsobu použití zmíněného vybavení.

V běžném PIV je laserový paprsek rozšířen v laserový list, který definuje měřicí rovinu, zorné pole kamery definuje oblast měření a tloušťka laserového listu určuje objem měřené oblasti. V mikro PIV je laserový paprsek ponechán v původní přímé formě bez rozptýlení a jeho rozměry tak určují měřenou oblast. Schéma metody je na obr. 3.3.

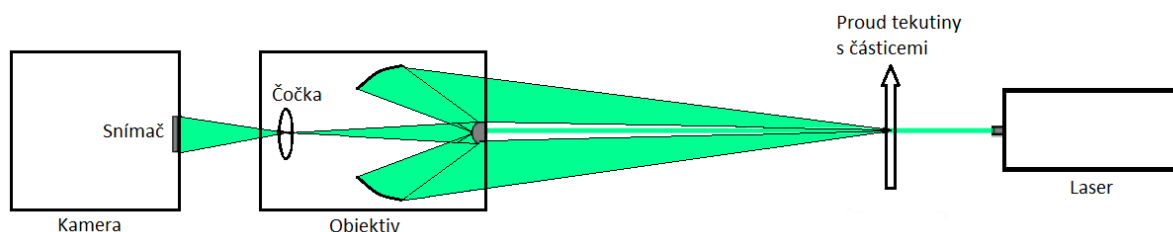


Obr. 3.3 Princip metody mikro PIV [11]

Značkování tekutiny částicemi je u této metody důležitým prvkem pro získání kvalitních výsledků. Částice musí být schopny odrážet dostatek světla. Excitační a emisní vlnové délky značkovacích částic musí být kompatibilní s optickým systémem. Velikost částic se pohybuje ve stovkách nanometrů pro získání obrazů s vysokým prostorovým rozlišením.

3.1.2. Metoda Long-distance mikro PIV

Metoda Long-distance mikro PIV je modifikace metody mikro PIV. Hlavní rozdíl je v uspořádání použitých zařízení a použití objektivu s dlouhým (long-distance) ohniskem místo mikroskopu. To umožňuje měření v mikroskopických rozměrech, aniž by přístroje musely být v těsné blízkosti proudící tekutiny.



Obr. 3.4 Princip metody Long-distance mikro PIV

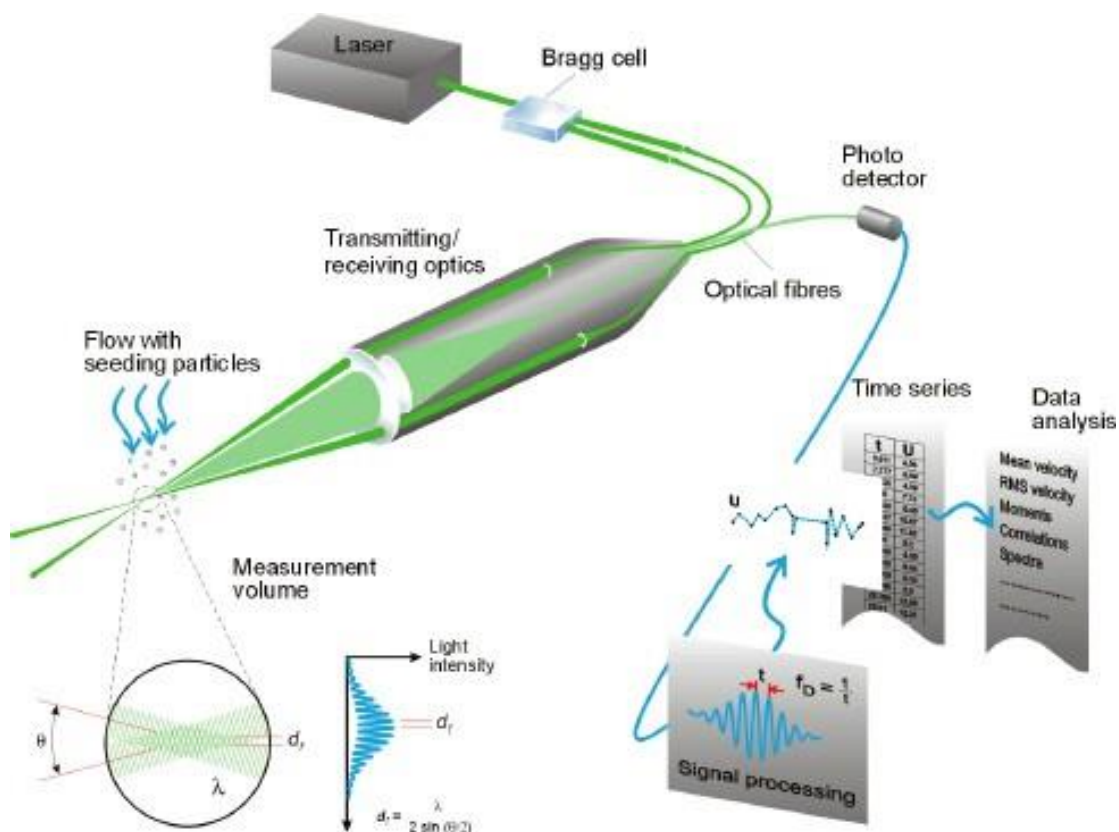
3.2. Metoda LDA

Laser Doppler Anemometry, neboli LDA, je metoda pro dynamické zkoumání plynů a kapalin, která poskytuje informace o bodové rychlosti proudění. Jedná se

o neinvazivní metodu měření s možnou směrovou citlivostí, díky čemuž je vhodná pro aplikace s reverzním prouděním, chemicky reagujícími nebo vysokoteplotními médii a rotujícími stroji, kde je použití fyzických čidel obtížné nebo nemožné. Je to metoda absolutní a nemusí se kalibrovat. Stejně jako PIV vyžaduje stopovací částice v toku.

Základní konfigurace LDA:

1. kontinuální vlnový laser
2. vysílací optika, včetně děliče paprsků a zaostřovací čočky
3. přijímací optika, obsahující zaostřovací čočku, interferenční filtr a fotodetektor
4. úprava a zpracování signálu

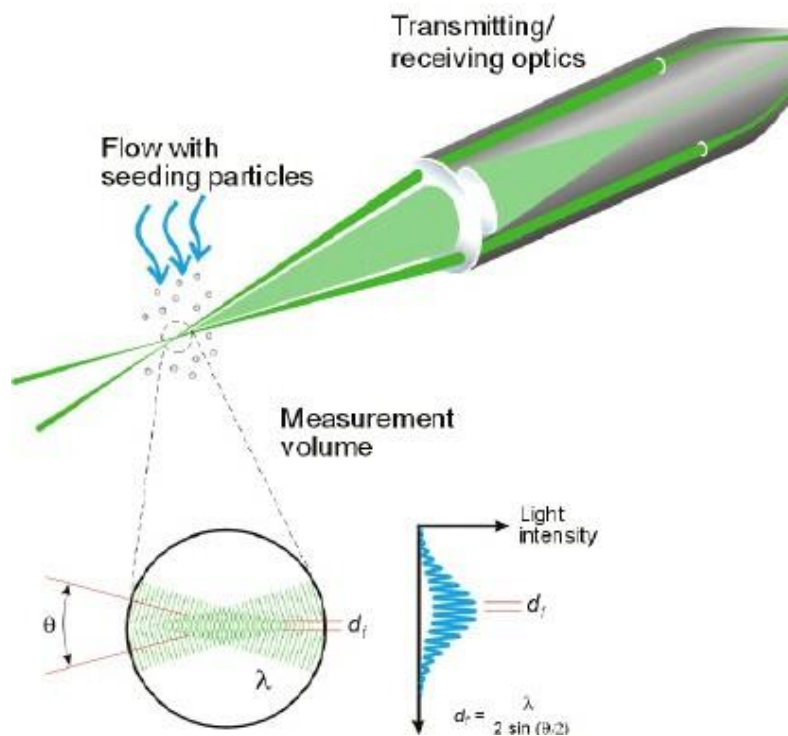


Obr. 3.5 Princip metody LDA [5]

Metoda funguje na principu Dopplerova jevu, kdy se dva nebo více zaostřených laserových paprsků kříží v měřeném objemu. V tomto objemu (rotační elipsoid) o velikosti až několika milimetrů dochází k interferenci a vytváří se paralelní roviny s vysokou intenzitou světla. Částice, které objemem prochází, odráží světlo

z paprsků úměrně místní intenzitě světla a vytváří tzv. Dopplerův zákmit (viz obr. 3.6). Vzdálenost d_f je definována vlnovou délkou λ laserového světla a úhlem mezi paprsky θ .

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (8)$$



Obr. 3.6 Detail měřeného objemu a interference [5]

Rozptýlené světlo je shromažďováno čočkou přijímače a zaměřeno na fotodetektor. Interferenční filtr namontovaný před fotodetektorem předává fotodetektoru pouze požadovanou vlnovou délku. To odstraňuje šum z okolního světla a světlo jiných vlnových délek.

Fotodetektor přemění kolísavou intenzitu světla na elektrický signál, Dopplerovy impulsy, které jsou dále signálovým procesorem filtrovány a zesíleny. Za pomoci frekvenční analýzy a použití algoritmu Fourierovy transformace je každé částici přidělena Dopplerova frekvence f_D . Jelikož frekvence poskytuje informaci o čase, můžeme vyjádřit vztah pro výpočet rychlosti částice.

$$v = d_f \cdot f_D \quad (9)$$

Pokročilé systémy mohou zahrnovat systémy posuvu a úhlové snímače. Jako rozdělovač paprsků se často používá Braggova mřížka (Bragg cell) umožňující posuv frekvence. Je to skleněný krystal s připojeným vibračním piezo krystalem.

Vibrace generují akustické vlny, které působí jako optická mřížka. Výstupem Braggovy mřížky jsou dva paprsky stejné intenzity s rozdílnými frekvencemi f_0 a f_{shift} . Ty jsou zaměřeny do optických vláken, které je přivádějí do sondy. Další postup je shodný jako u metody bez posuvu frekvence.

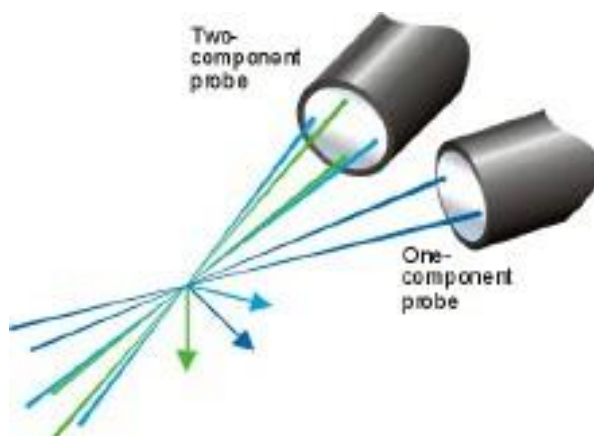
Systémy LDA bez frekvenčního posuvu nerozlišují mezi kladným a záporným směrem proudění nebo nulovou rychlostí.

Systémy LDA s frekvenčním posunem mohou rozlišovat směr průtoku a měřit nulovou rychlost.

3.2.1. Vícesložkové měření

Pro měření dvou složek rychlosti mohou být k optice přidány dva další paprsky v rovině kolmé k prvním paprskům.

Všechny tři složky rychlosti mohou být měřeny dvěma samostatnými sondami, které měří dvě a jednu složku, přičemž všechny paprsky se protínají ve společném objemu, jak je znázorněno níže. Pro oddělení měřených složek se používají různé vlnové délky. K detekci rozptýleného světla tří vlnových délek se používají tři fotodetektory s vhodnými interferenčními filtry [5].



Obr. 3.7 Vícesložkové měření [5]

3.3. Značkovací částice

Popsané metody měření rychlosti v předchozích kapitolách vyžadují přítomnost značkovacích (trasovacích) částic v proudu tekutiny. Značkovacích částic existuje mnoho druhů a jsou rozlišovány především typem skupenství,

materiálem a velikostí částice. Dále se liší v závislosti na proudící tekutině podle toho, zdali se jedná o kapalinu nebo plyn.

V ideálním případě by měly být částice dostatečně malé a lehké, aby odpovídaly pohybu tekutiny a neovlivňovaly tak vlastnosti proudění, ale přiměřeně velké, aby rozptylovaly dostatek světla a aby se dosáhlo dobrého poměru signálu a šumu na výstupu fotodetektoru. Částice by měly mít hustotu odpovídající tekutině, aby se dosáhlo krátké doby odezvy částic při změně směru proudění. Koncentrace částic v tekutině se odvíjí od velikosti měřené oblasti a ovlivňuje jemnost a přesnost měření. Kvalitu párování částice a proudící tekutiny vyjadřuje Stokesovo číslo. Čím je toto číslo menší, tím je párování lepší.

Zvláštní zastoupení mají fluorescenční částice (např. Rhodanimové). Ty jsou schopné při dopadu světla odrazit (emitovat) světlo s jinou vlnovou délkou. To společně s vhodným interferenčním filtrem před fotodetektorem kamery umožňuje zlepšit kvalitu signálu a potlačit světelný šum.

Podrobný rozbor značkovacích částic včetně jejich použití, velikostí, hustot je popsán v [12].

4. Návrh tratě pro mikro PIV měření

Při zkoumání vlastností profilů a těles obecně obtékaných tekutinou se používají experimentální měřicí tratě. Je to souhrn měřeného modelu a měřicího vybavení postavený tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností a podmínek pro danou měřicí metodu.

V oblasti experimentů, kde proudící látkou je vzduch, se využívají zařízení zvané aerodynamické tunely. Základní rozdělení aerodynamických tunelů je na tunely s otevřeným (přímým), nebo uzavřeným (cirkulačním) okruhem. Dále se mohou tunely dělit podle použití na zkoumání podzvukových a nadzvukových rychlostí, podle tvaru testovacího úseku, podle velikosti na testování zmenšených modelů nebo testování skutečných strojů (automobilů, letadel atd.) a jejich částí, anebo podle jiných kritérií.

Aerodynamické tunely s otevřeným okruhem mají obecně nižší náklady na výstavbu, ale vyšší náklady na provoz. Je potřeba brát v potaz problematiku návrhu. Při umístění v místnosti se musí počítat s dostatečným místem pro sání a výfuk a celkově objem místnosti vůči výkonu tunelu. Pokud je tunel umístěn ve venkovní atmosféře, je nutné počítat s vlhkostí vzduchu a kondenzací vodních par.

Uzavřené tunely mají naopak vyšší náklady na výstavbu a nižší náklady na provoz. Jsou nezávislé na okolním prostředí, ale při častějším užívání dochází k oteplování vzduchu uvnitř a je nutné počítat s chlazením anebo výměnou vzduchu. Pokud se v tunelu pracuje s kouřem nebo např. spalovacím motorem, hrozí ulpívání částic kouře a nečistot na stěnách tunelu.

Měření bylo provedeno na již sestavené trati pro mikro PIV měření v laboratoři ústavu. Bylo provedeno několik úprav jak samotného aerodynamického tunelu, tak i rozestavení přístrojové techniky na experimentální trati. Nicméně základní princip měření zůstal zachován.

4.1. Popis původní měřicí tratě

Původní návrh experimentální tratě pro Long distance mikro PIV je popsán v bakalářské práci P. Dmitryho z roku 2018/2019 „Mikro PIV měření pro sledování vlivu drsnosti povrchu na proudové pole“ [6].

Nosná konstrukce tratě je postavena z hliníkových profilů o různých délkách s T drážkami pro čtvercové matice. Spojení profilů je realizováno pomocí upínacích prvků s otvory pro šrouby. Na tuto konstrukci jsou připevněny všechny prvky a přístroje měřicí tratě.

Kamera a objektiv jsou připevněny napevno ke konstrukci. Kamera je typu CMOS s názvem Olympus i-Speed DF (viz obr. 4.1). Součástí je ovládací display s možností ukládat snímky na paměťovou kartu. S plným rozlišením 1280x1024 pixelů je kamera schopna snímat 2000 fps, se sníženým rozlišením až 300 000 fps [7].



Obr. 4.1 CMOS kamera Olympus i-Speed DF ([7])

Objektiv Questar QM-100 MKIII (viz obr. 4.2) je tzv. long distance mikroskop s vysokým rozlišením. Díky nastavitelnému zaostření ohniskové vzdálenosti je schopen pracovat v rozsahu od 150 mm do 355 mm [8].



Obr. 4.2 Objektiv Questar QM-100 MKIII [8]

Aerodynamický tunel a laserová hlava jsou upevněny pomocí posuvných plošin s mikrometrickými šrouby, umožňující přesné nastavení polohy zmíněných zařízení. Tunel a laserovou hlavu je možné zvlášť polohovat pomocí dvou plošin ve svislém i vodorovném směru. Detail nosné konstrukce a uchycení laserové hlavy na posuvných plošinách je na obr. 4.3.

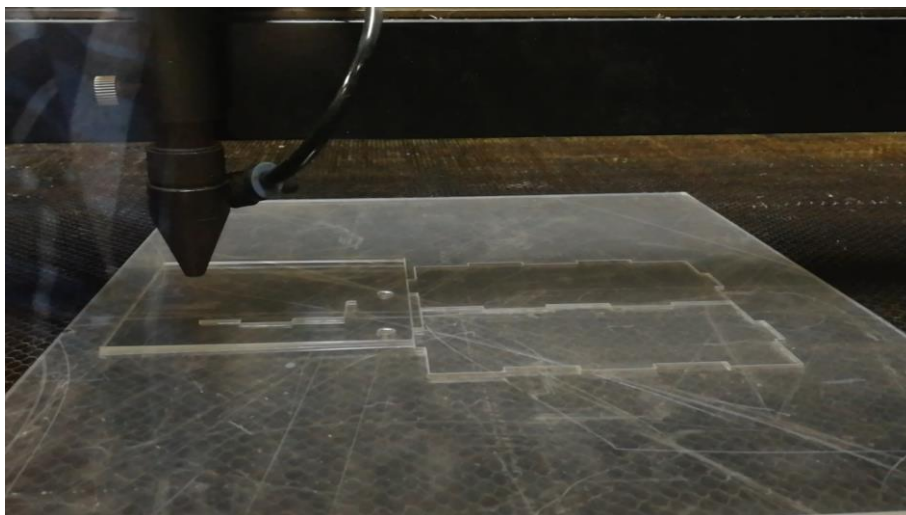


Obr. 4.3 Detail uchycení laserové hlavy

4.2. Úprava aerodynamického tunelu

Návrh aerodynamického tunelu je popsán v [4]. Tunel byl navržen jako uzavřený a skládá se z jednotlivých komor, spojených šroubovými spoji s těsněním mezi komorami, a dalšími prvky nezbytnými pro správnou funkci tunelu. Jmenovitě to jsou tryska, difuzor, lopatky pro usměrnění proudu v rozích tunelu, ventilátor a držák testovacího vzorku

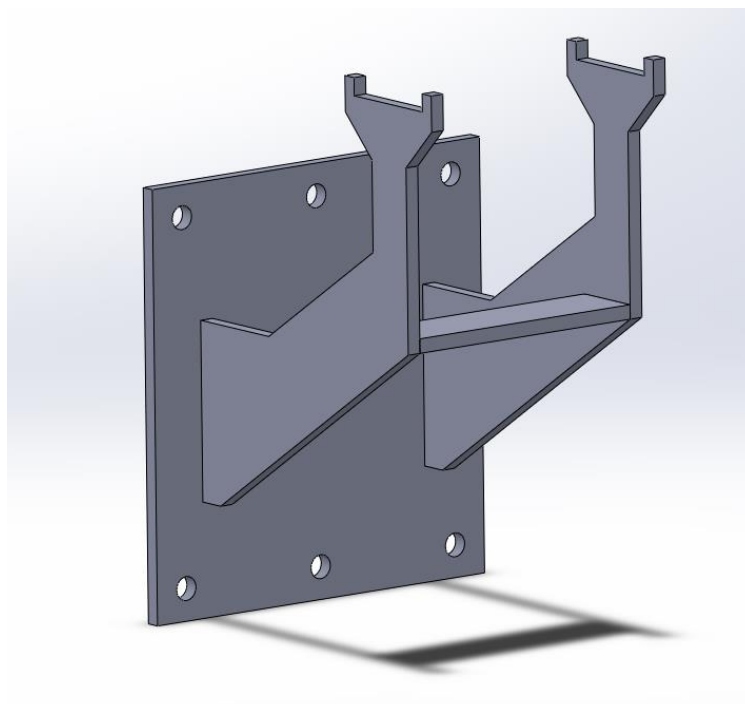
Jednotlivé komory jsou vyrobeny z tvarových desek z plexiskla, které jsou slepeny lepidlem. Desky byly vyrobeny pomocí CNC řezacího stroje s laserovým zdrojem (viz obr. 4.4).



Obr. 4.4 Výroba desek pomocí CNC stroje s laserovým zdrojem

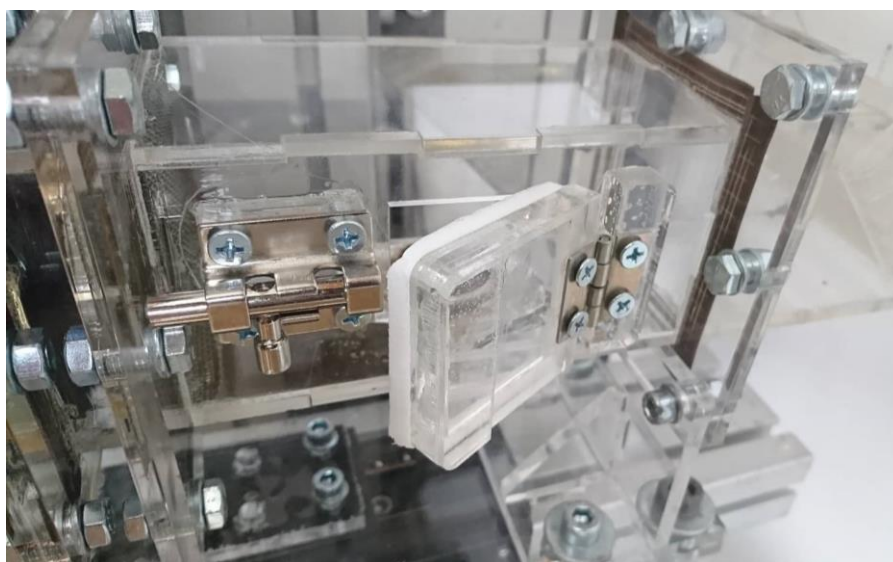
Tryska, difuzor a lopatky pro svoji vyšší tvarovou náročnost byly vyrobeny na 3D tiskárně z materiálu PAJet a následně obroušeny do hladka [6].

V rámci úpravy aerodynamického tunelu byl navržen nový držák (obr. 4.5) s vyšší tuhostí a stabilitou. Stejně jako jednotlivé komory tunelu, i tento držák je vyroben z plexiskla a slepen lepidlem. Hlavní deska držáku má otvory pro upevnění mezi vrchní a spodní část tunelu pro vyšší tuhost a stabilitu celého modelu.

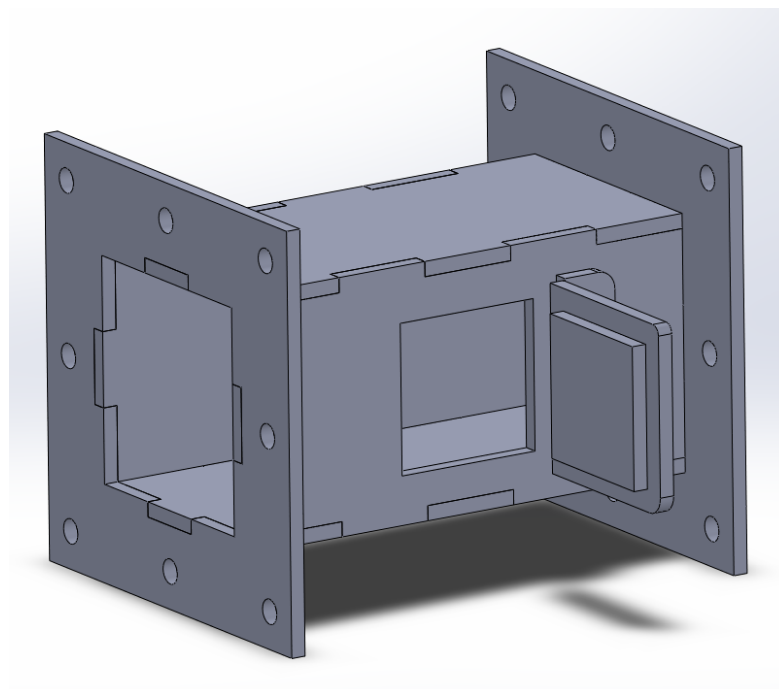


Obr. 4.5 Model upraveného držáku testovací desky

Dále byla navržena nová komora s uzavíratelnými dvířky ve spodní části tunelu. To umožňuje lepší přístup do vnitřní části komory a instalaci zdroje kouře. Dvířka jsou opatřena těsněním, modelářskými panty a západkou pro zajištění zavřené polohy (viz fotografie na obr. 4.6).

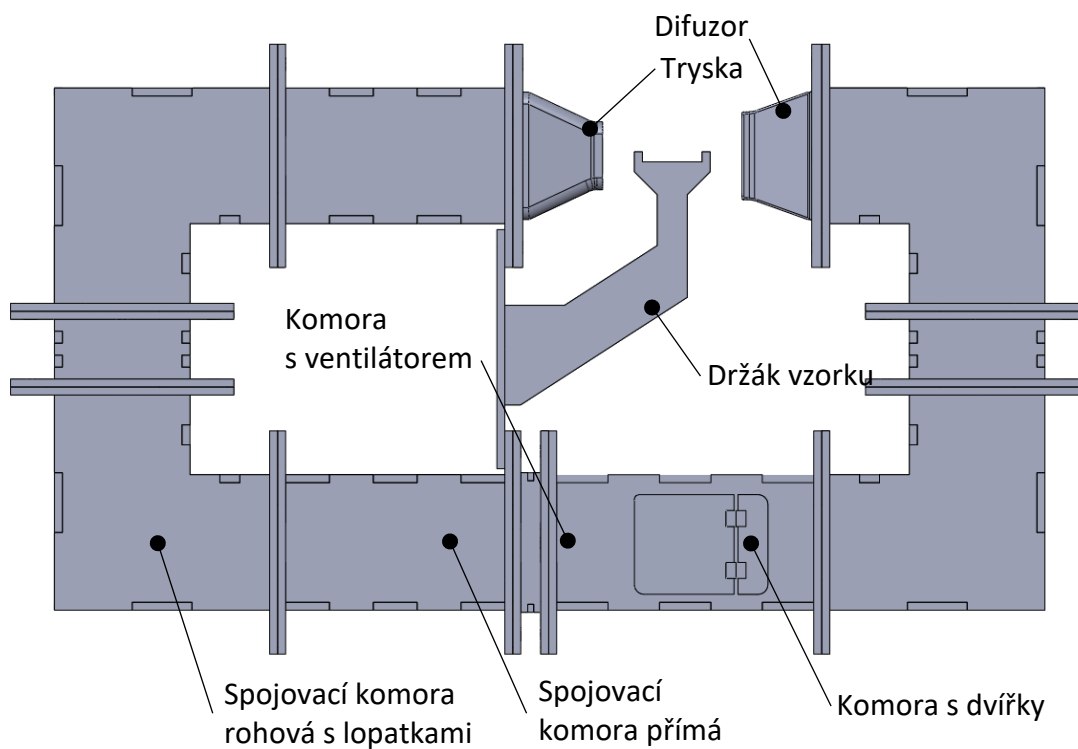


Obr. 4.6 Fotografie uzavíratelné kouřové komory



Obr. 4.7 Model komory s přístupem pro zdroj kouře

Model navrženého aerodynamického uzavřeného tunelu je na obr. 4.8.



Obr. 4.8 Model aerodynamického tunelu

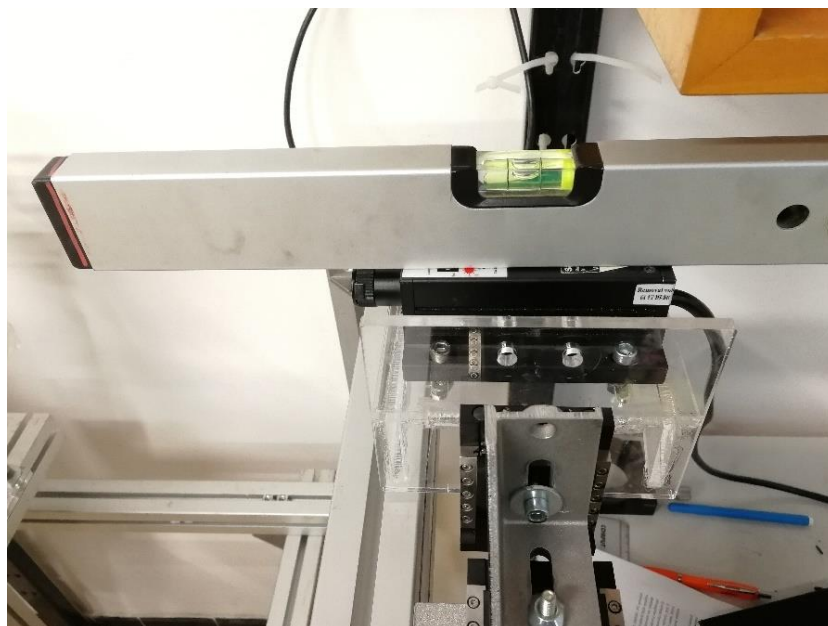
4.3. Úprava měřicí tratě

Úprava měřicí tratě sestávala z přemontování nosné konstrukce z hliníkových profilů. Byly přidány profily pro zajištění lepší tuhosti pod laserovou hlavou. Celá konstrukce pak byla připevněna k nosníku police, který je vetknutý do zdi laboratoře.

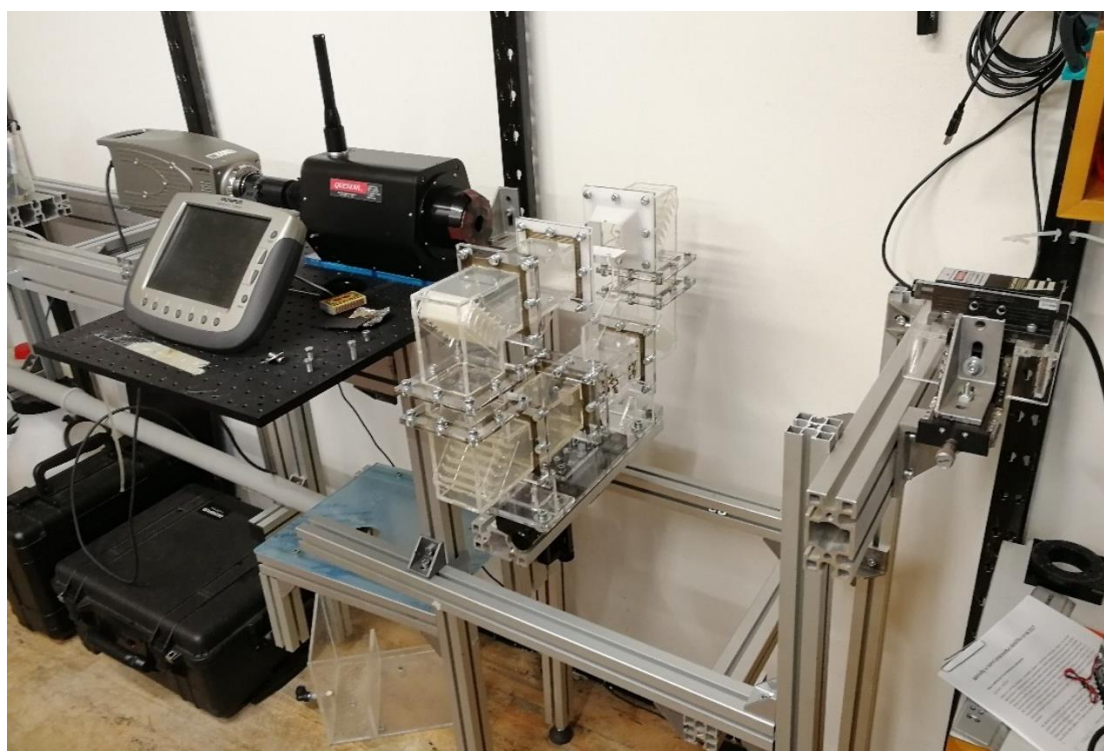


Obr. 4.9 Vyrovnání aerodynamického tunelu

Na obr. 4.9 a obr. 4.10 je znázorněno vyrovnání tunelu a laserové hlavy do vodorovné polohy. Nakonec bylo provedeno předběžné uspořádání kamery, tunelu a laserové hlavy tak, aby laserový paprsek směřoval do zaostřené oblasti snímání kamerou těsně nad testovacím vzorkem. Finální uspořádání experimentální měřicí tratě je na obr. 4.11.



Obr. 4.10 Vyrovnání laserové hlavy



Obr. 4.11 Finální upravená trať

5. Návrh kalibračních postupů pro PIV metody

Při snímání obrazu pomocí kamery není známá skutečná velikost tohoto snímku, nebo objektů na něm zachycených, ale pouze rozměr v pixelech. Proto je nutné kameru s objektivem kalibrovat, tzn. zjistit skutečné délkové rozměry a plochu jednoho pixelu, případně celého snímku.

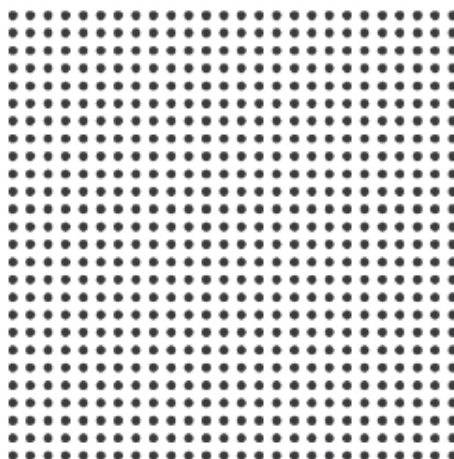
Systémy používané na zpracování dat při měření pomocí PIV metody umožňují zadat tento zjištěný rozměr pixelu a tím provádět měření reálných rozměrů v milimetrech, namísto v absolutních hodnotách, pixelech.

Kalibrace obrazu v prostoru je náročnější na zpracování než v rovině. Využívá se při ní softwaru, který pomocí rotačních a transformačních matic odhadne pozici kamery vůči snímanému objektu nebo opačně, dle toho, co je známo. V následujících podkapitolách uvažujeme kalibraci kamery v rovině. Předpokladem je, že rovina snímaná kamerou je rovnoběžná se snímaným objektem. Tím se problematika projekce a kalibrace zjednoduší na prosté měřítko zvětšení nebo zmenšení obrazu oproti objektu.

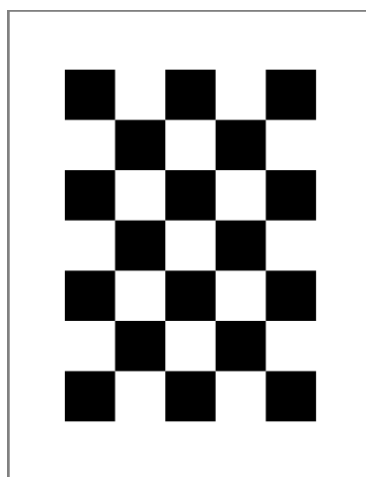
Kalibraci kamery lze provést několika způsoby, které se liší hlavně postupem, dále pak přesností anebo také potřebou speciálních pomůcek. Přesnost kalibrace by měla být alespoň o řád vyšší, než je zamýšlená přesnost měření.

5.1. Kalibrace pomocí kalibrační desky

Tato metoda vychází z použití kalibrační desky, která obsahuje síť kalibračních markerů, jejichž pozice jsou známy. Markery mohou mít tvar bodů nebo kruhů (obr. 5.1), nebo se může například jednat o šachovnici černých a bílých čtverců, (obr. 5.2). Velikost desky, a tím pádem i velikost markerů, musí patřičně odpovídat rozlišení kamery.



Obr. 5.1 Kalibrační deska s body [9]



Obr. 5.2 Kalibrační šachovnice [9]

Kalibrační deska s markery je nasnímana kamerou (kamerami např. při Stereo-PIV). Porovnáním pozic markerů ve skutečnosti s korespondujícími pozicemi markerů nasnímaných kamerou je získáno měřítko zvětšení/zmenšení M , které je dáno:

$$M = \frac{l_{kal}}{l_{px}} \quad (10)$$

kde l_{px} je vzdálenost nasnímaných markerů v pixelech a l_{kal} je reálná vzdálenost markerů na desce.

Přesnost této kalibrace je dána přesností pozic markerů na desce. To je dáno přesností výroby od výrobce kalibrační desky, nebo např. přesností při tisku na tiskárně. Dalším faktorem přesnosti je rovnoběžnost mezi umístěním desky a snímané roviny kamery.

5.2. Kalibrace pomocí posunu vybraného bodu

Při kalibraci pomocí sledování vybraného bodu je nasníмана série obrazů, na kterých lze najít dobře viditelný a zaostřený bod. Mezi jednotlivými snímky je vybraný bod posunut o známou hodnotu ΔS , například pomocí stavěcího šroubu a pravítka, mikrometrického stavítka aj. Na nasnímaných obrazech se zjistí pozice vybraného bodu v pixelech. Z těchto pozic se vypočtou jednotlivá posunutí ΔC , a nakonec i průměrné posunutí bodu na všech snímcích $\Delta \bar{C}$. Měřítka zvětšení/zmenšení M je dáno podílem.

$$M = \frac{\Delta \bar{S}}{\Delta \bar{C}} \quad (11)$$

Celková přesnost je dána přesností posunů bodu mezi snímky a přesností odečítání pozic v pixelech. Dále je celková přesnost závislá na kolmosti mezi snímanou rovinou a vektorem posunu vybraného bodu.

Kalibrace pomocí posunu vybraného bodu je prakticky řešena v kap. 6.1.

5.3. Kalibrace pomocí kalibru nebo známých rozměrů

V této metodě je měřítka M získáno ze známých nebo změřených rozměrů objektu, který je kamerou nasnímán. Podobně jako v předchozích metodách je měřítka M dáno podílem skutečného rozměru a nasnímaného rozměru v pixelech.

Při použití kalibru jsou rozměry a přesnost dány výrobcem. Postup i výsledek kalibrace je podobný jako při použití kalibrační desky. Teoreticky lze použít jakýkoli délkový kalibr, jehož hrany budou na snímku dostatečně zaostřené.

Pokud je použit obecný předmět, jeho rozměry musí být nejprve změřeny. To vnáší do procesu kalibrace další nepřesnosti a nejistoty z důvodu potřeby použít dodatečné měřicí zařízení, jako například posuvné měřidlo, mikrometr atd.



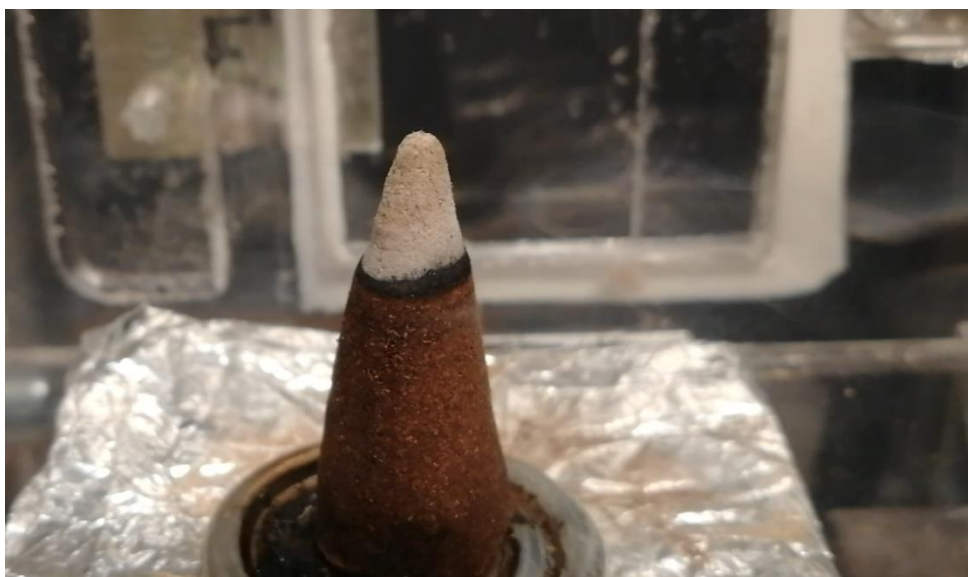
Obr. 5.3 Ukázky délkových kalibrů [10]

6. Experimentální měření

Experimentální měření pomocí Long distance mikro PIV metody vyžaduje splnění určitých počátečních podmínek.

Průtok vzduchu musí mít optimální rychlost a musí být stacionární. To zajišťuje ventilátor chlazení procesoru počítače o velikosti 60x60x10mm. Ventilátor je napájen zdrojem stejnosměrného proudu s maximálním napětím 12 V. Napětí bylo nastaveno dle zkušebního měření tak, aby byl zajištěn kvalitní výstupní signál snímaných obrazů.

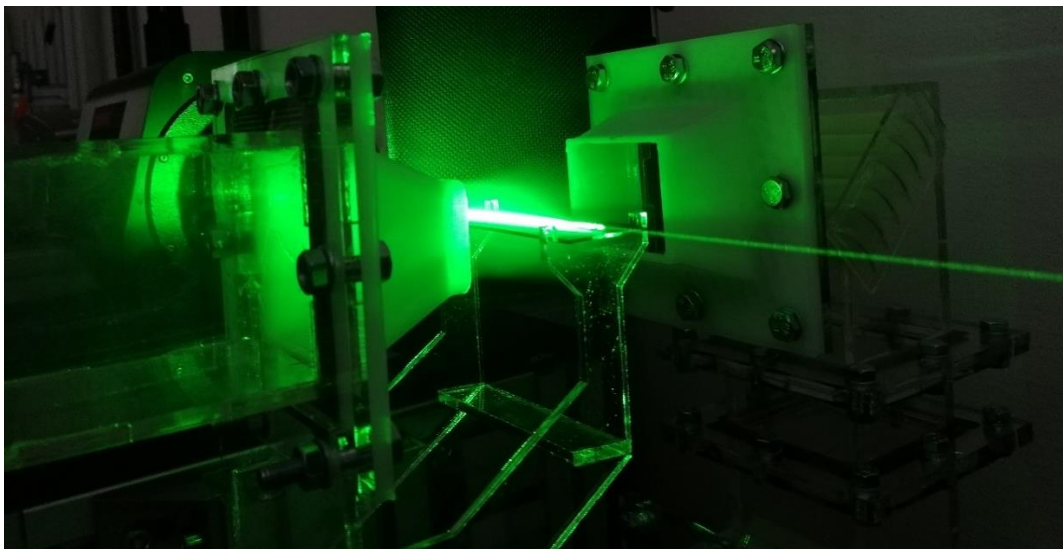
Optimální sycení vzduchu kouřem bylo dosaženo vložení zdroje kouře do komory s dvířky ve spodní části tunelu. Zdrojem kouře byl vánoční františek, který je vyráběn z mletého dřevěného uhlí a kadidla (pryskyřice). Přibližně po 3 minutách je dle zkušebního měření cirkulující proud vzduchu dostatečně nasycen kouřem. František umístěný v komoře tunelu se vznikajícím kouřem je na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Vánoční františek v komoře tunelu

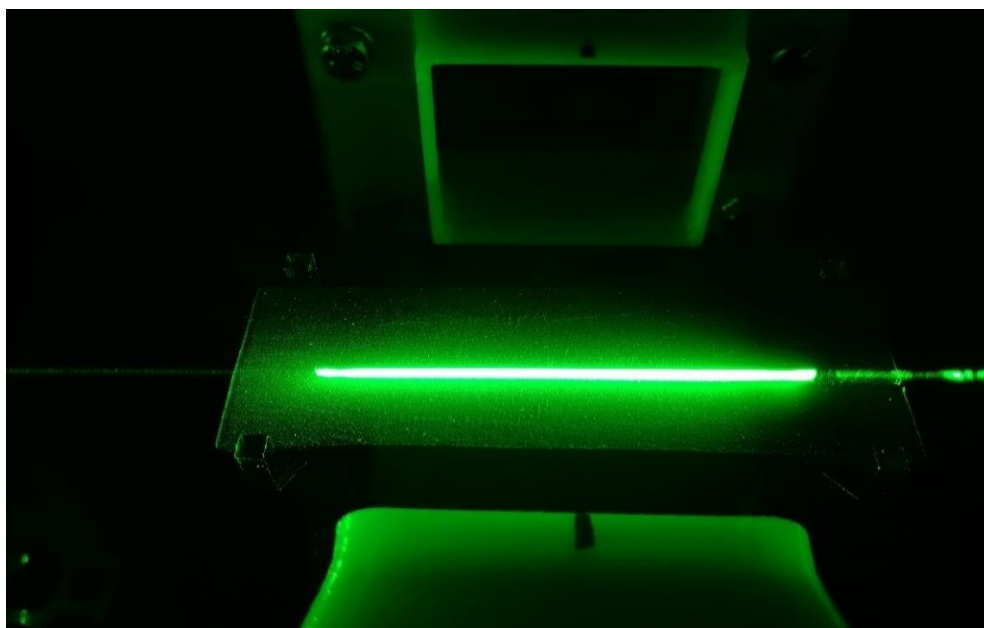
Je nutné co nejlépe nastavit zaostření kamery do měřené oblasti nad testovacím vzorkem. K tomu slouží nástroj objektivu v podobě světelného bodu, který je dobře viditelný na listu papíru. Zároveň je nutné nasměrovat paprsek laseru rovnoběžně s hranou desky, kolmo k proudícímu poli. Paprsek musí procházet středem zaostřené oblasti kamery a musí směřovat do středu objektivu, kde je

pohlčován. Takto připravená oblast se musí nacházet těsně nad povrchem testovacího vzorku. Po úspěšném nastavení je vytyčená oblast připravená k měření. Osvětlený proud vzduchu nasycený kouřem je na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Nasycený a osvětlený proud vzduchu

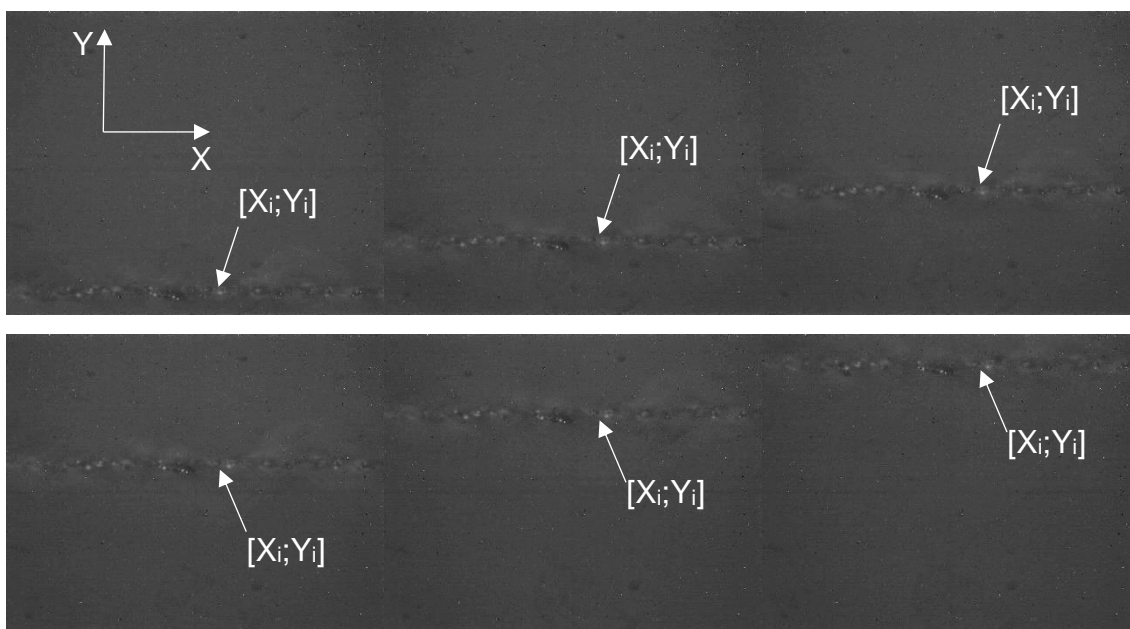
Testovacím vzorkem byla tenká deska o rozměrech 90x30mm. Deska byla povrchově upravena speciální matnou barvou s latexovými částicemi, které pohlcují světlo a snižují odlesk světla od povrchu desky. Povrchová úprava byla provedena tlakovou stříkací pistolí v dílnách ústavu. Detail desky s připravenou měřenou oblastí je na obr. 6.3



Obr. 6.3 Detail desky s měřenou oblastí

6.1. Kalibrace vybraným postupem

Kalibrace kamery byla provedena pomocí metody posunu vybraného bodu přímo na měřené desce. Tím pádem nebylo potřeba použít další měřidla nebo pomůcky. Postupně byly snímány obrazy povrchu desky. Mezi každým snímkem byla deska posunuta o krok $\Delta S=250 \mu\text{m}$ ve směru Y pomocí mikroskopického stavítka. Z důvodu nepřesností a vůlí v posuvu aerodynamického tunelu s deskou je možné pozorovat i mírný nepravidelný posun ve směru X. Tento posun byl také uvážen ve výpočtu kalibrace. Je vybrán a sledován dobře viditelný a zaostřený bod na všech snímcích. Pro tento bod byly zjištěny souřadnice X_i a Y_i na všech snímcích. Snímky s postupným posunem vybraného bodu jsou na obr. 6.4.



Obr. 6.4 Snímky kalibrace s vybraným bodem

Ze zjištěných souřadnic X_i a Y_i v pixelech na dvou po sobě jdoucích snímcích je vypočítán posun v obou směrech ΔX_n a ΔY_n , dále je vypočítán přes Pythagorovu větu celkový posun ΔC_n mezi dvěma snímky, a nakonec i průměrná hodnota posunu $\Delta \bar{C}$ mezi všemi snímky. Na počet snímků i připadá $n = i-1$ posunů.

$$\Delta C_n = \sqrt{\Delta X_n^2 + \Delta Y_n^2} \quad (12)$$

$$\Delta \bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta C_n \quad (13)$$

Přepočít (kalibrace) je ve formě podílu mezi průměrným krokem $\Delta\bar{S}$ nastavení desky v mm a průměrným posunem v pixelech. Zjištěný podíl udává velikost strany jednoho pixelu v mm.

$$M = \frac{mm}{pixel} = \frac{\Delta\bar{S}}{\Delta\bar{C}} \quad (14)$$

Zjištěné a vypočítané hodnoty jsou v následující tabulce.

Tabulka 1 Zjištěné a vypočítané hodnoty kalibrace

Snímek	X [Px]	Y [Px]	ΔX [Px]	ΔY [Px]	ΔC [px]	S [mm]	ΔS [mm]
1	580	54	18	168	168,96	93,75	0,25
2	598	222	4	171	171,05	93,5	0,25
3	602	393	8	163	163,20	93,25	0,25
4	610	556	0	170	170,00	93	0,25
5	610	726	10	166	166,30	92,75	0,25
6	620	892	-	-	-	92,5	-
Průměr	-	-	-	-	167,90	-	0,25

Výsledná kalibrace zaznamenaných snímků je $M = 1 \text{ pixel} = 1,489 \text{ }\mu\text{m}$. Rozlišení je $144 \times 96 \text{ px}$, tedy $214,412 \times 142,941 \text{ }\mu\text{m}$.

6.2. Měření metodou Long distance mikro PIV

Po dosažení počátečních podmínek a kalibraci byla nejprve naměřena data proudu vzduchu neovlivněného testovacím vzorkem, tzn. v prázdném prostoru. Poté byla zahájena série 26 měření za účelem proměření rychlostního pole v blízkosti povrchu testovací desky. Vzhledem k rozlišení získaných snímků a následné potřebě snímky ořezat a dostatečně překrývat byl zvolen krok posunu mikroskopického stavítka $60\mu\text{m}$. Celkově byla proměřena oblast 20 až $1600\mu\text{m}$ nad deskou.

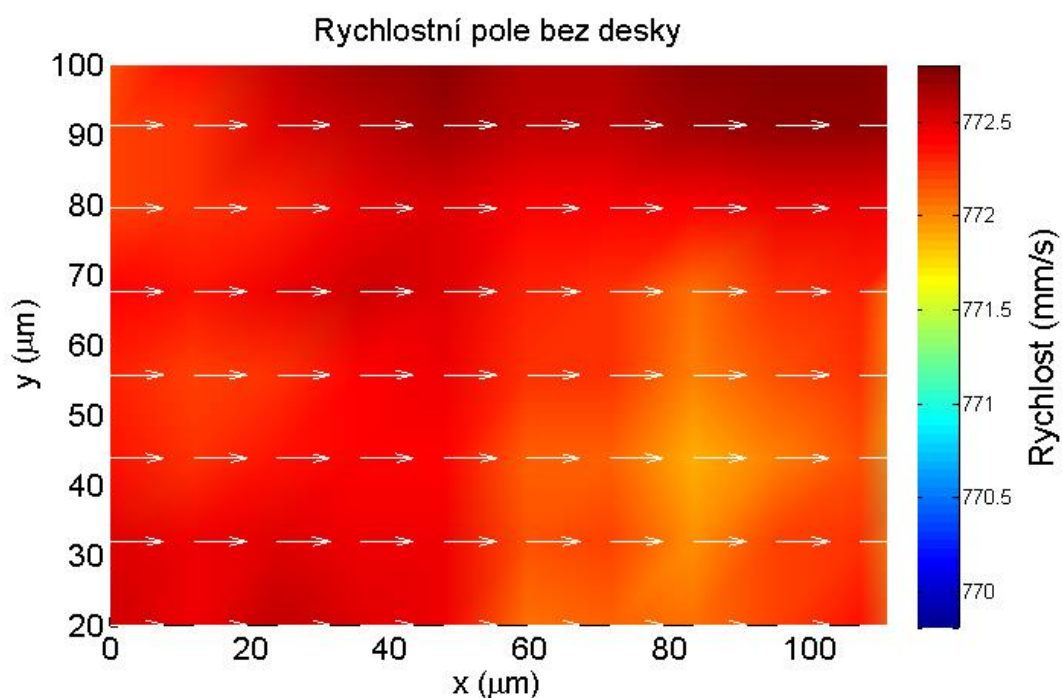
Při každém měření bylo získáno přibližně 1000 snímků, které byly dále zpracovány a připraveny k exportu pro numerickou analýzu v programu MATLAB. Zpracování proběhlo v Dantec Studiu a zahrnovalo korelaci a validaci, převedení do reálných jednotek v mm, resp. mm/s a export v .dat formátu.

6.3. Analýza dat

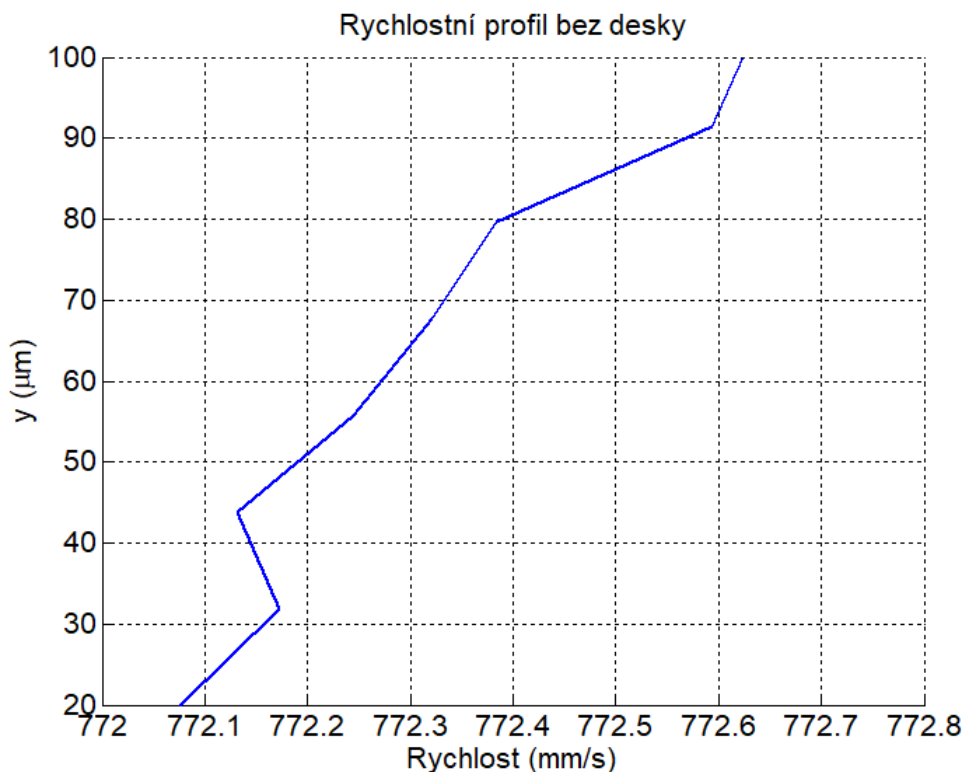
Analýza exportovaných dat proběhla v programu MATLAB. Exportovaná data obsahují mimo jiné matice souřadnic X, Y a příslušných vektorů rychlostí v těchto směrech U , V pro každou vyšetřovanou oblast v rámci jednoho měření. Pomocí sepsaného programu v MATLABu byla data naimportována a po úpravě byly vygenerovány grafy rychlostních polí a rychlostních profilů.

6.3.1. Rychlostí pole a profil bez testovacího vzorku

Pro zjištění rychlostního pole neovlivněného testovacím vzorkem bylo provedeno jedno měření. To umožnilo stanovit přibližný rozsah měření rychlostního pole (obr. 6.5) v mezní vrstvě nad obtékaným testovacím vzorkem.



Obr. 6.5 Rychlostní pole bez desky



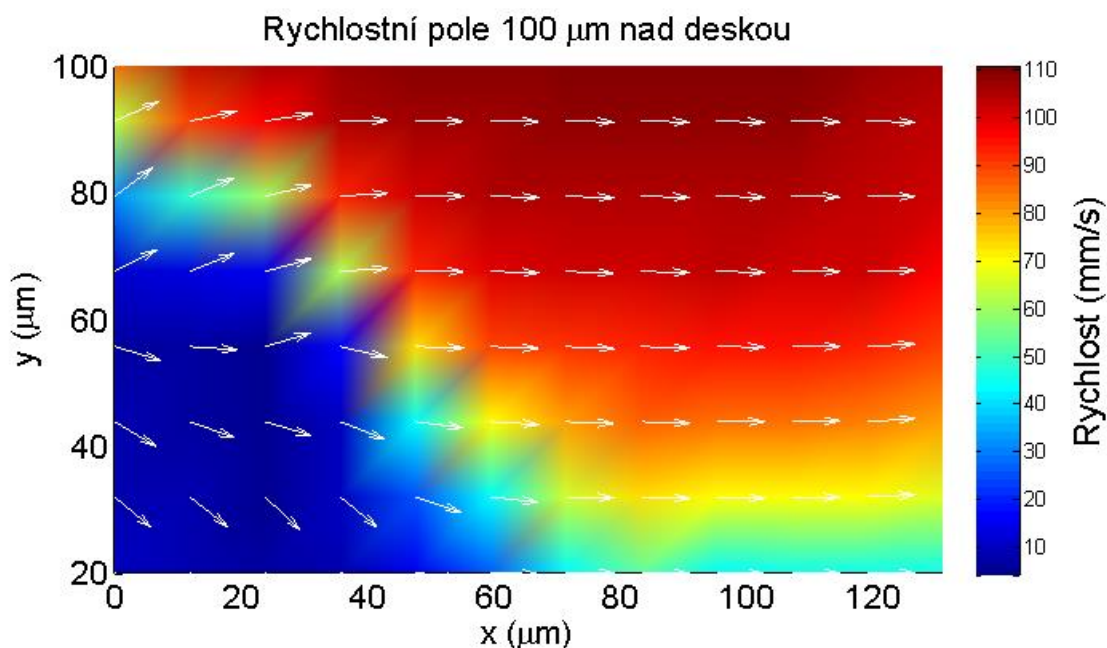
Obr. 6.6 Rychlostní profil bez desky

Rychlostní profil vygenerovaný z $\frac{1}{2}$ X-ové souřadnice (obr. 6.6) je v tomto případě všeobecná křivka a vypovídá o minimální odchylce v desetínách mm/s v daném místě.

Nastavení barevné škály způsobuje, že minimální hodnotě je přiřazena tmavě modrá barva a maximální hodnotě tmavě červená, nicméně v celém rychlostním poli je rozsah rychlostí (772–772.5) mm/s, což vypovídá o malé odchylce. Směr proudění je znázorněn šipkami.

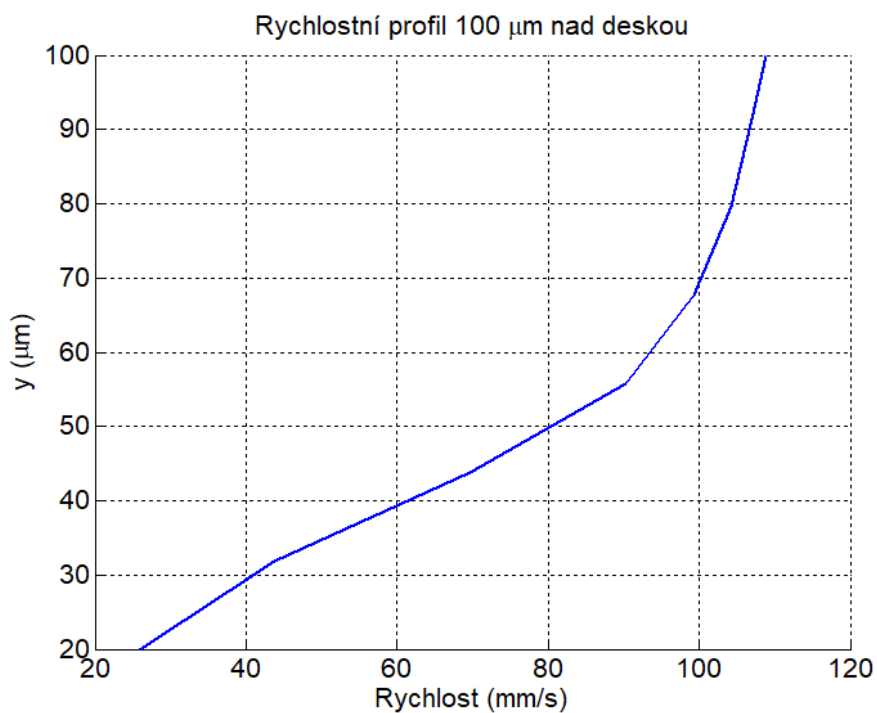
6.3.2. Rychlostní pole a profily v mezní vrstvě nad deskou

První měření proběhlo v oblasti (20-100) μm nad deskou (obr. 6.7). Na tomto měření je vidět ovlivnění rychlostního pole odlesky od testovacího vzorku v levé části, pravá část sleduje teoretický předpoklad rozložení rychlostního pole.



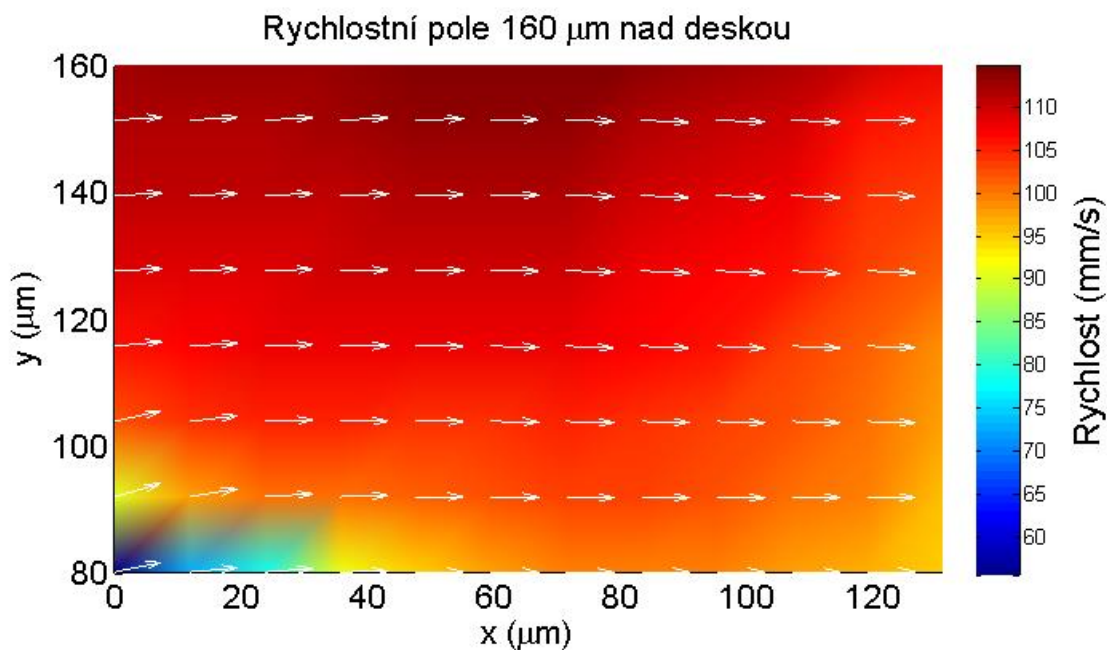
Obr. 6.7 Rychlostní pole (20-100) μm nad deskou

Rychlostní profil je vygenerován z 2/3 X-ové souřadnice rychlostního pole (obr. 6.8), kde již odlesky nebyly tolik znatelné, nicméně i tak je profil mírně zdeformovaný oproti teoretickému předpokladu.

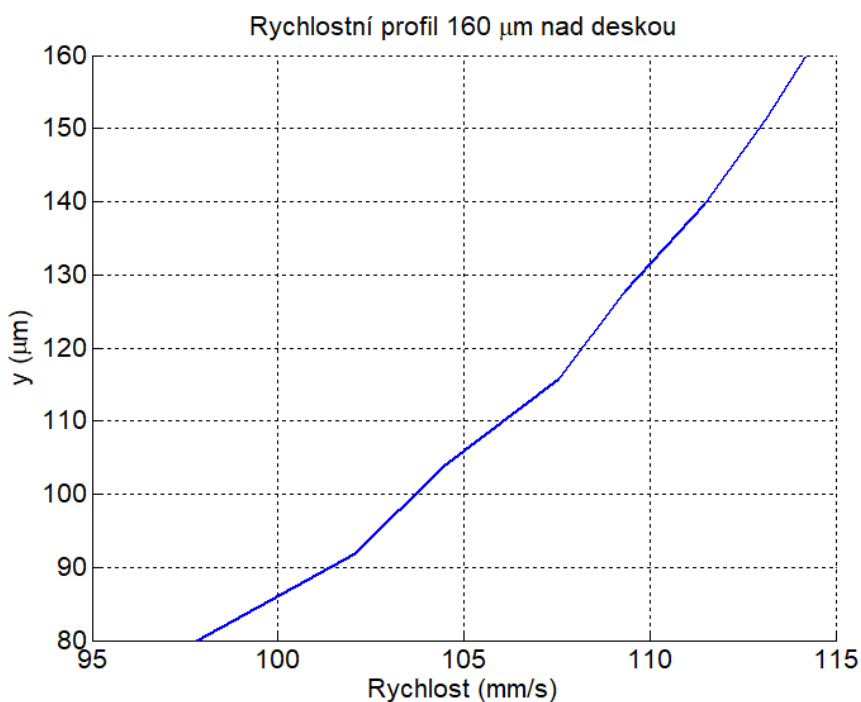


Obr. 6.8 Rychlostní profil (20-100) μm nad deskou

Druhé měření v oblasti (80-160) μm nad deskou již nevykazuje téměř žádné odlesky (obr. 6.9). Nicméně i zde je vidět odchylka v levém dolním rohu rychlostního pole. Rychlostní profil vygenerovaný v polovině X-ové souřadnice již ovlivněný není (obr. 6.10).

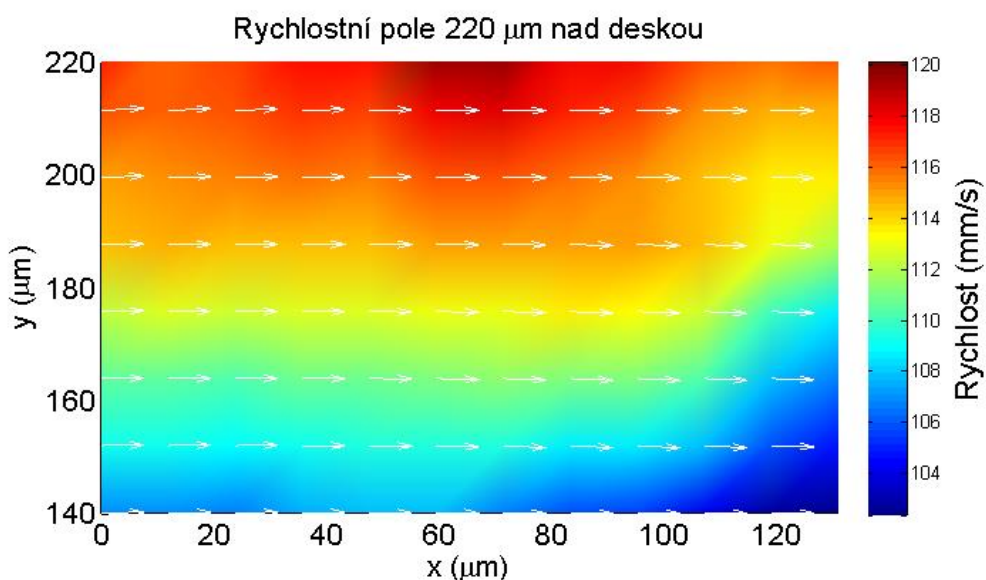


Obr. 6.9 Rychlostní pole (80-160) μm nad deskou

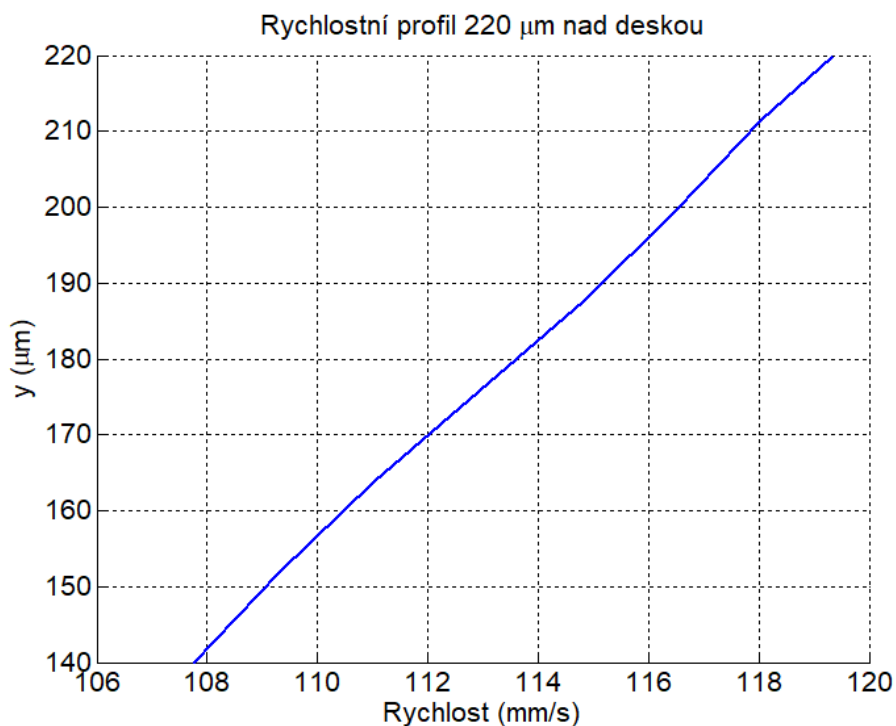


Obr. 6.10 Rychlostní profil (80-160) μm nad deskou

Třetí měření v oblasti (140-220) μm nad deskou (obr. 6.11 a obr. 6.12) je již zcela bez odlesků. Lze pozorovat postupný nárůst rychlosti ve směru y, a naopak pokles ve směru x. Dále lze pozorovat postupné zvyšování rychlosti ve směru y mezi jednotlivými měřeními. To vyhovuje teorii o mezní vrstvě a ovlivnění rychlostí mezi jednotlivými vrstvami tekutiny vlivem viskozity a ulpívání na stěně.

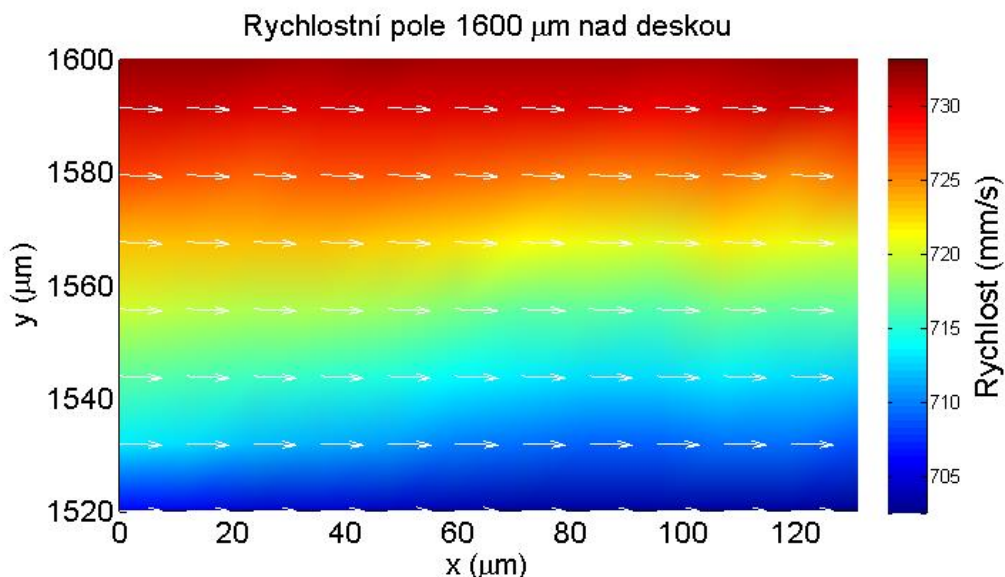


Obr. 6.11 Rychlostní pole (140-220) μm nad deskou

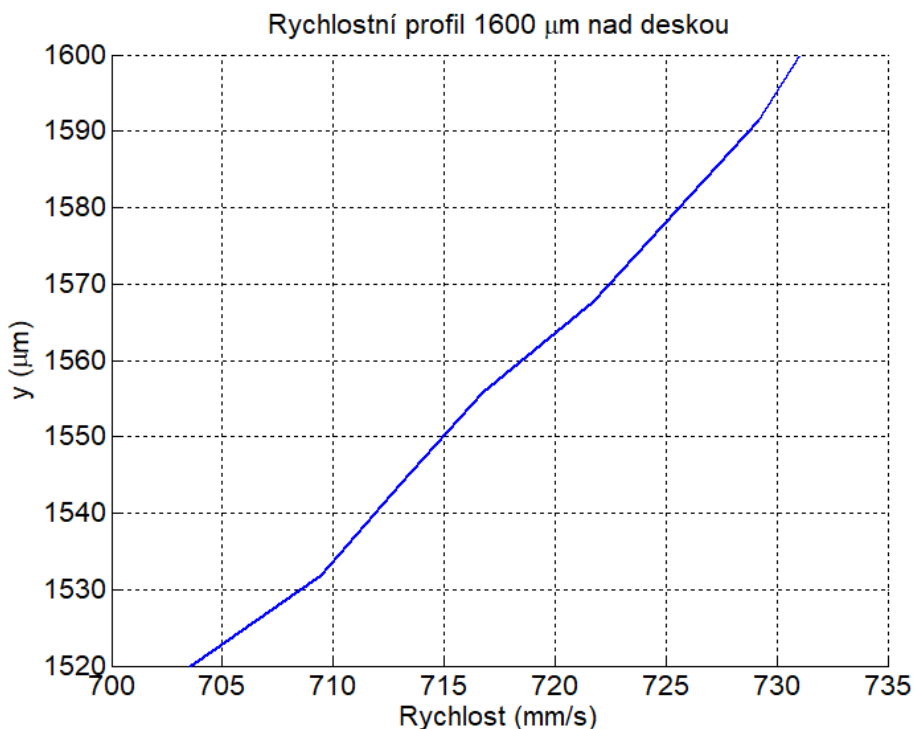


Obr. 6.12 Rychlostní profil (140-220) μm nad deskou

Pro ukázkou je ještě uvedeno poslední měření v oblasti (1520-1600) μm nad deskou. Z rychlostního pole a profilu (obr. 6.13 a obr. 6.14) lze odečíst maximální rychlost přes 730 mm/s, což téměř dosahuje rychlosti neovlivněného rychlostního pole bez testovacího vzorku s rychlostí 770 mm/s. Měření tedy proběhlo téměř v celé mezní vrstvě obtékaného testovacího vzorku.



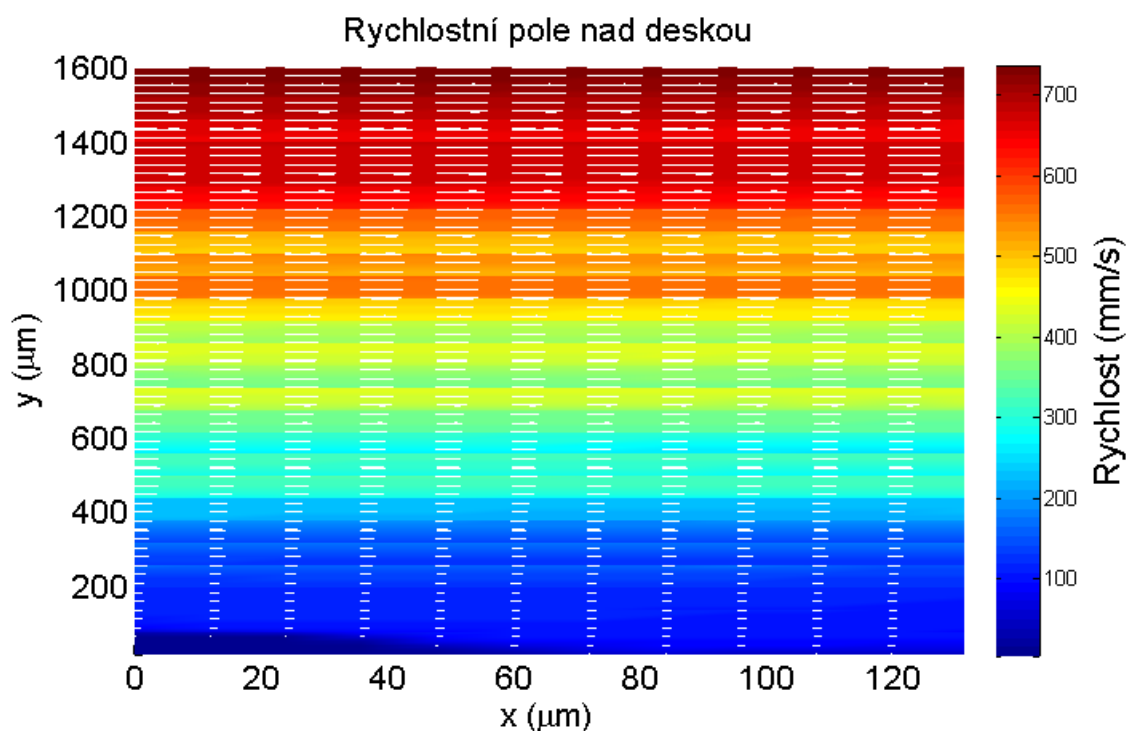
Obr. 6.13 Rychlostní pole (1520-1600) μm nad deskou



Obr. 6.14 Rychlostní profil (1520-1600) μm nad deskou

6.3.3. Výsledné rychlostní pole a profil

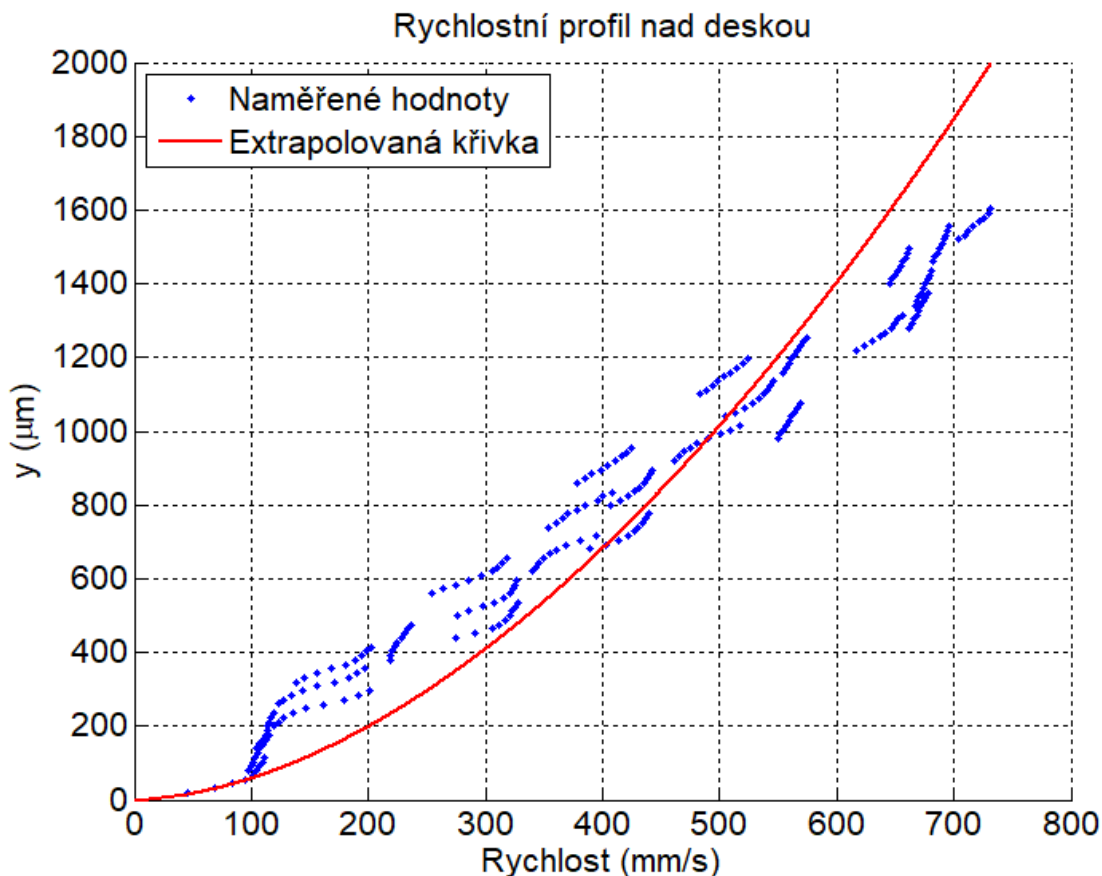
Další úpravou, a zvláště spojením importovaných dat do MATLABu, bylo možné zobrazit celé rychlostní pole napříč všemi měřeními. Na obr. 6.15 lze pozorovat odchylky v rozložení barevné škály. Ty jsou způsobeny ne zcela přesným navazováním jednotlivých rychlostních polí na sebe.



Obr. 6.15 Výsledné rychlostní pole nad deskou

Výsledný rychlostní profil složený ze všech měření je na obr. 6.16. Pravděpodobně vlivem odlesků je patrné zakřivení prvních 2 měření. Začátek rychlostního profilu má proto esovitý tvar. Mezi jednotlivými rychlostními profily je možné pozorovat zamýšlené překrývání a také malé odchylky v návaznosti. Ty mohou být způsobeny proměnlivými otáčkami ventilátoru nebo lehkým průvanem a pohybem obsluhy při nastavování výšky testovacího vzorku.

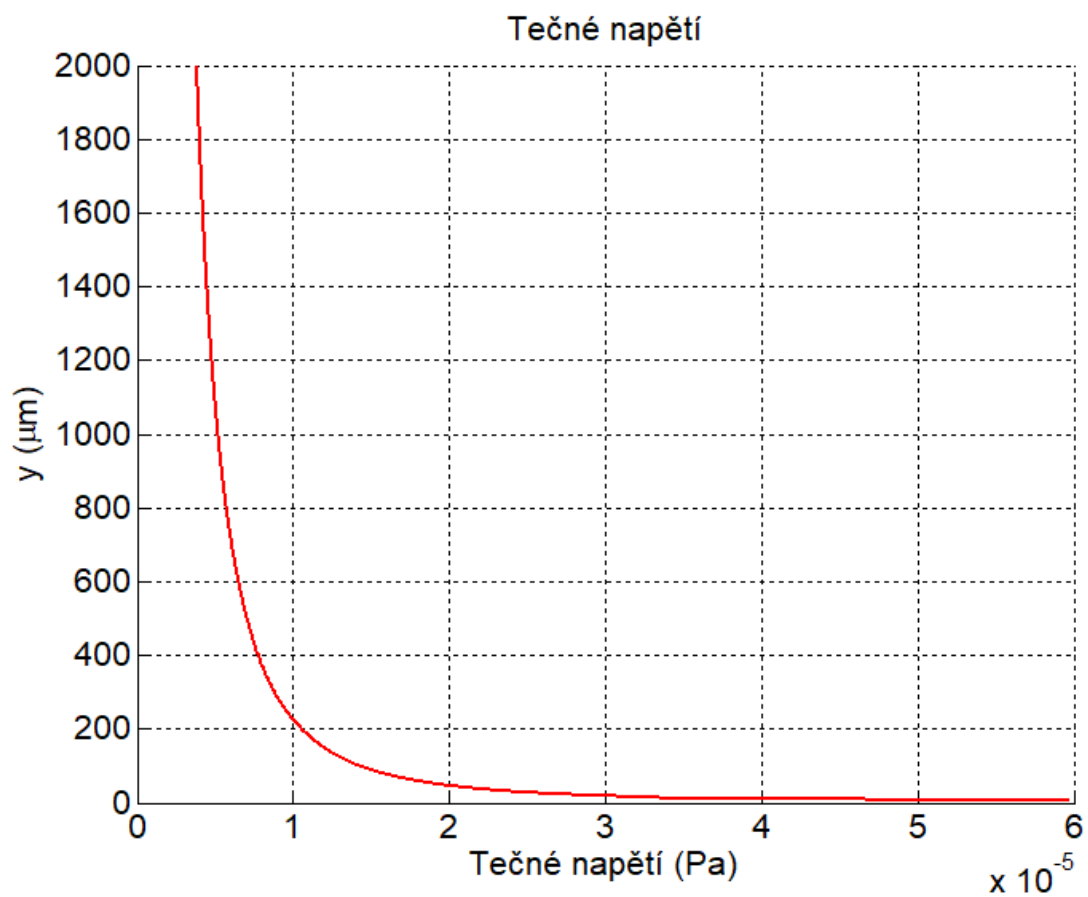
Zároveň je profil proložen mocninnou funkcí: $f(U)=0,01593 \cdot U^{1,78}$. To umožňuje extrapolovat naměřená data až ke stěně testovacího vzorku. Funkce $f(U)$ je konstruována tak, aby splňovala podmínku nulové rychlosti na stěně, tedy pro $y=0$ mm je rychlost $U=0$ mm/s. Dále funkce $f(U)$ přibližně odpovídá naměřenému profilu a roste směrem k rychlosti nenarušeného rychlostního pole.



Obr. 6.16 Výsledný rychlostní profil nad deskou

6.3.4. Výpočet tečného napětí v mezní vrstvě

Pomocí funkce $f(U)$ vzniklé proložením dat a extrapolováním ke stěně je možné dopočítat tečné napětí působící mezi jednotlivými vrstvami tekutiny v měřené oblasti a také napětí na stěně testovacího vzorku. Průběh tečného napětí je znázorněn na obr. 6.17. K tomu byla použita hodnota dynamické viskozity vzduchu při teplotě $t = 30\text{ °C}$: $\eta = 1,8635 \times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$. Teplota vzduchu se během měření mírně zvyšovala, ale po celý čas měření se pohybovala právě kolem této hodnoty. Tečné napětí bylo vypočítáno dle vzorce (1) pomocí programu v Matlabu. Byl zvolen krok $dy\ 0,1\ \mu\text{m}$ s odpovídající hodnotou funkce $f(U)$.



Obr. 6.17 Průběh tečného napětí v mezní vrstvě

Tečné napětí na stěně $T_0 = 5,97 \times 10^{-5}$ Pa.

7. Závěr

Hlavním cílem bakalářské práce bylo provést experimentální mikro PIV měření v mezní vrstvě obtékané desky za účelem stanovení tečného napětí na stěně desky.

V rámci dílčích úkolů byla upravena experimentální měřící trať pro Long distance mikro PIV měření nacházející se v laboratořích ústavu. Nosná konstrukce byla přemontována pro dosažení vyšší stability všech prvků vybavení. Upraven byl také aerodynamický tunel. Byl navrhnut a vyroben nový a pevnější držák testovacích vzorků a nová komora pro umístění zdroje kouře s uzavíratelnými dvířky.

V další fázi byly navrženy možné kalibrační postupy pro mikro PIV měření. Byly navrženy 3 různé postupy pro kalibraci. Pomocí kalibrační desky s markery, metodou sledování vybraného bodu anebo ze známé velikosti zaznamenaného objektu na snímku.

V rámci experimentálního měření byla seřízena měřící trať, aby vyhovovala nutným podmínkám pro měření. Byla provedena kalibrace kamery metodou sledování vybraného bodu a byla stanovena velikost jednoho pixelu: 1pixel = 1,489 μ m. To umožnilo převést naměřené hodnoty na reálné v jednotkách mm a mm/s. Před proměřením mezní vrstvy bylo provedeno měření neovlivněného rychlostního pole v testovací oblasti bez desky. Rychlost proudu neovlivněného vzduchu s kouřem byla 770 mm/s.

Mezní vrstva nad obtékanou deskou byla proměřena v 26 měřeních s krokem posunutí 60 μ m, které se navzájem překrývaly v oblasti (20-1600) μ m nad deskou. Následně byla data z měření zpracována v Dantec Studiu a exportována k numerickému zpracování v programu MATLAB.

Z jednotlivých dat měření byly sestaveny grafy rychlostních polí a profilů. První dvě měření byla viditelně ovlivněna odlesky světla z testovací desky, ale stále bylo možné je zpracovat. V posledním měření dosahovala rychlost v rychlostním poli přibližně 730 mm/s, tedy téměř rychlost neovlivněného rychlostního pole. Z jednotlivých dat měření bylo vytvořeno výsledné rychlostní pole a také souhrn

rychlostních profilů. Na tomto souhrnu je znatelné zkreslení z prvních dvou měření, které vytváří esovitě zakřivení rychlostního profilu.

Výsledný rychlostní profil byl proložen mocninou funkcí $f(U)=0,01593*U^{1,78}$. Pomocí této funkce byl rychlostní profil extrapolován až ke stěně desky. Extrapolace rychlostního profilu ke stěně desky umožnila numerické vypočítání tečného napětí v měřené oblasti a také tečného napětí na stěně desky $T_0 = 5,97 \times 10^{-5}$ Pa.

Seznam zdrojů

- [1] JEŽEK, J., VÁRADIOVÁ, B., ADAMEC, J. Mechanika tekutin. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000
- [2] Jaroslav Janalík, prof., Ing., CSc., Obtékání a odpor těles, Ostrava: VŠB Technická Univerzita Ostrava, 2008
- [3] Raffel M., Willert Ch., Wereley S., Kompenhans J., Particle Image Velocimetry, A Practical Guide. Springer. ISBN 978-3-540-72307-3
- [4] Particle image velocimetry (PIV) [online]. Dantec Dynamics A/S. [cit. 17.7.2019]. Dostupné z: <<http://www.dantecdynamics.com/particle-image-velocimetry>>
- [5] Measurement principles of LDA [online]. Dantec Dynamics A/S. [cit. 17.7.2019]. Dostupné z: <<https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-lda>>
- [6] Paley, D. Mikro PIV měření pro sledování vlivu drsnosti povrchu na proudové pole. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta strojní, 2019. 57s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jakub Dostál a Ing. Adam Bláha
- [7] OLYMPUS i-SPEED DF [online]. NAUTIA GENE. [cit. 30.7.2019]. Dostupné z: <http://www.nautiagene.com/products_view.php?PID=21&sn=44>
- [8] QM-100 MKIII [online]. QUESTAR. [cit. 30.7.2019]. Dostupné z: <<http://www.rip-imaging.co.uk/wp-content/uploads/2016/06/QM100-MKIII-33003-Spec-sheet.pdf>>
- [9] Tutorial Camera Calibration [online]. Boofcv.org. [cit. 30.7.2019]. Dostupné z: <https://boofcv.org/index.php?title=Tutorial_Camera_Calibration>
- [10] Kalibrace délky u délkových měřidel [online]. HKMkalibra s.r.o. [cit. 30.7.2019]. Dostupné z <https://www.hkmpkalibra.cz/kalibrace-delky>
- [11] Microfluids PIV [online]. Dantec Dynamics A/S. [cit. 30.7.2019]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/docs/products-and-services/microfluidics/PI103_Microfluidics_PIV.pdf>
- [12] Tracer particles and seeding for particle image velocimetry [online]. Semantic Scholar. [cit. 6.8.2019]. Dostupné z: <<https://pdfs.semanticscholar.org/f45c/d7a409d026ec686d07caa3a7edb593b3d4b4.pdf>>

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Proudnice [1].....	12
Obr. 2.2 Proudová trubice [1].....	12
Obr. 2.3 Vznik tečného napětí mezi dvěma deskami [1].....	12
Obr. 2.4 Síly a momenty působící na obtékané těleso [1]	13
Obr. 2.5 Idealizovaná mezní vrstva na desce [1]	14
Obr. 2.6 Vývoj mezní vrstvy [2].....	15
Obr. 3.1 Uspořádání PIV metody.....	17
Obr. 3.2 Princip metody PIV firmy Dantec Dynamics [4]	18
Obr. 3.3 Princip metody mikro PIV [11].....	20
Obr. 3.4 Princip metody Long-distance mikro PIV	20
Obr. 3.5 Princip metody LDA [5]	21
Obr. 3.6 Detail měřeného objemu a interference [5].....	22
Obr. 3.7 Vícerozměrné měření [5]	23
Obr. 4.1 CMOS kamera Olympus i-Speed DF	26
Obr. 4.2 Objektiv Questar QM-100 MKIII.....	27
Obr. 4.3 Detail uchycení laserové hlavy	27
Obr. 4.4 Výroba desek pomocí CNC stroje s laserovým zdrojem.....	28
Obr. 4.5 Model upraveného držáku testovací desky.....	29
Obr. 4.6 Fotografie uzavíratelné kouřové komory.....	29
Obr. 4.7 Model komory s přístupem pro zdroj kouře.....	30
Obr. 4.8 Model aerodynamického tunelu	30
Obr. 4.9 Vyrovnání aerodynamického tunelu.....	31
Obr. 4.10 Vyrovnání laserové hlavy.....	32
Obr. 4.11 Finální upravená trať	32
Obr. 5.1 Kalibrační deska s body [9].....	34
Obr. 5.2 Kalibrační šachovnice [9].....	34
Obr. 5.3 Ukázky délkových kalibrů [10]	36
Obr. 6.1 Vánoční františek v komoře tunelu.....	37
Obr. 6.2 Nasycený a osvětlený proud vzduchu	38
Obr. 6.3 Detail desky s měřenou oblastí.....	38
Obr. 6.4 Snímky kalibrace s vybraným bodem	39

Obr. 6.5 Rychlostní pole bez desky	41
Obr. 6.6 Rychlostní profil bez desky	42
Obr. 6.7 Rychlostní pole (20-100) μm nad deskou	43
Obr. 6.8 Rychlostní profil (20-100) μm nad deskou	43
Obr. 6.9 Rychlostní pole (80-160) μm nad deskou	44
Obr. 6.10 Rychlostní profil (80-160) μm nad deskou	44
Obr. 6.11 Rychlostní pole (140-220) μm nad deskou	45
Obr. 6.12 Rychlostní profil (140-220) μm nad deskou	45
Obr. 6.13 Rychlostní pole (1520-1600) μm nad deskou	46
Obr. 6.14 Rychlostní profil (1520-1600) μm nad deskou	46
Obr. 6.15 Výsledné rychlostní pole nad deskou	47
Obr. 6.16 Výsledný rychlostní profil nad deskou.....	48
Obr. 6.17 Průběh tečného napětí v mezní vrstvě	49

Seznam tabulek

Tabulka 1 Zjištěné a vypočítané hodnoty kalibrace	40
---	----

Seznam příloh

Příloha I – Naměřená rychlostní pole a profily v mezní vrstvě	
---	--

Příloha I - Naměřená rychlostní pole a profily v mezní vrstvě

