

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

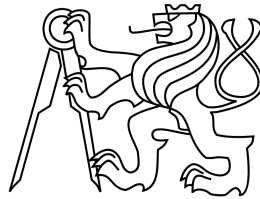
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření parametrů proudu v turbulentní cele

Vedoucí:
prof. Ing. Pavel ŠAFAŘÍK, CSc

Konzultant:
Ing. Jiří VEJRAŽKA, PhD.

Autor:
Jan BENEŠ



31. května 2016
Praha

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....
podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Jiřímu Vejražkovi, Ph.D. za ochotu a rady při zpracování této bakalářské práce a vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Pavlu Šafaříku, CSc. za věcné připomínky. Také děkuji zaměstnancům Ústavu chemických procesů AVČR, kteří byli vždy ochotní a nápomocní.

Použité značky a symboly

| Symbol | Jednotka | Význam |
|------------------|-------------------------------------|---|
| A | [1] | Konstanta |
| C_s | [1] | Smagorinského konstanta |
| d | [m] | Hydraulický průměr |
| \dot{E} | [W] | Energetický tok |
| \dot{E}_{250} | [W] | Energetický tok disipovaný v rovině 250 |
| \dot{E}_{275} | [W] | Energetický tok disipovaný v rovině 275 |
| \dot{E}_{300} | [W] | Energetický tok disipovaný v rovině 300 |
| \dot{E}_{dis} | [W] | Průměrný energetický tok disipovaný ve všech rovinách |
| \dot{E}_{in} | [W] | Energetický tok přivedený do aparatury |
| \dot{E}_t | [W] | Energetický tok tryskou |
| f | [Hz] | Frekvence snímání kamery |
| F | [N] | Síla (obecně) |
| L | [m] | Charakteristický rozměr |
| L_{11} | [m] | Integrální délkové měřítko |
| p | [Pa] | Tlak |
| P | [W] | Výkon |
| Q | [m ³ · s ⁻¹] | Průtok |
| Q_1 | [m ³ · s ⁻¹] | Průtok čerpadlem 1 |
| Q_2 | [m ³ · s ⁻¹] | Průtok čerpadlem 2 |
| Re | [1] | Reynoldsovo číslo |
| Re_{krit} | [1] | Kritická hodnota Reynoldsova čísla |
| Re_t | [1] | Hodnota Reynoldsova čísla v trysce |
| S_{ij} | [s ⁻¹] | Tensor rychlosti smykové deformace |
| \tilde{S}_{ij} | [s ⁻¹] | Tensor rychlosti smykové deformace složený z prostorových derivací vektorů rychlosti rozpoznávaných metodou PIV |
| u | [m · s ⁻¹] | Rychlost |
| u_{cela} | [m · s ⁻¹] | Rychlost proudu v cele |
| u_t | [m · s ⁻¹] | Rychlost proudu v trysce |
| u_0 | [m · s ⁻¹] | Odhad počáteční horizontální rychlosti |
| u' | [m · s ⁻¹] | Fluktuuační rychlost |
| \bar{u} | [m · s ⁻¹] | Střední hodnota rychlosti |
| \tilde{u} | [m · s ⁻¹] | Filtrovaný vektor rychlosti v horizontálním směru |
| v_0 | [m · s ⁻¹] | Odhad počáteční vertikální rychlosti |
| \tilde{v} | [m · s ⁻¹] | Filtrovaný vektor rychlosti ve vertikálním směru |
| w | [m · s ⁻¹] | Rychlost kolmá na rovinu snímání |
| x | [m] | Souřadnice x |

| | | |
|-------------|----------------------|---|
| x_r | $[m]$ | Vzdálenost v potrubí, kde můžeme považovat proudění za vyvinuté |
| y | $[m]$ | Souřadnice y |
| Δ | $[m]$ | Prostorové rozlišení metody LEPIV |
| Δt | $[s]$ | Časový rozdíl pořízení dvou snímků |
| ϵ | $[W \cdot kg^{-1}]$ | Rychlost disipace turbulentní kinetické energie |
| η | $[m]$ | Velikost Kolmogorovových vírů |
| μ | $[m^2 \cdot s^{-1}]$ | Kinematická viskozita |
| ρ | $[kg \cdot m^{-3}]$ | Hustota |
| Π | $[W \cdot kg^{-1}]$ | Energetický spád |
| τ_{ij} | $[Pa]$ | Tensor napjatosti |

Použité zkratky

| | |
|--------|--|
| IA | Interogační oblasti (z angl. interrogation area) |
| LEPIV | Large-Eddy Particle Image Velocimetry |
| LES | Large-Eddy Simulation |
| PIV | Particle Image Velocimetry |
| TuBuBu | Aparatura, ve které je prováděno měření (z angl. Turbulent Bubble Break-up). |

Anotace

Bakalářská práce se zaměřuje na charakteristiku proudění v turbulentní cele, která je součástí pozorovacího zařízení na rozpad bublin na Ústavu chemických procesů AVČR. V práci je popsán postup měření metodou PIV a výpočtu rychlosti disipace turbulentní kinetické energie metodou LEPIV. Je proveden rozbor programu pivSuite. U naměřených výsledků je ověřena validita bilancí kinetických energií.

Klíčová slova

PIV, LEPIV, Rychlost disipace turbulentní kinetické energie.

Abstract

The subject of this bachelor thesis is the characteristics of flow properties in a turbulent cell which is a part of device used for observation of bubble break-up which was built at the Institute of Chemical Process Fundamentals of the Czech Academy of Science. The PIV method for measuring the velocity field and LEPIV method for estimation of the rate of dissipation of kinetic energy are described in this thesis. An analysis of pivSuite program has been carried out. The applicability of measured results has been verified by the kinetic energy balance.

Key words

PIV, LEPIV, the rate of dissipation of kinetic energy.

Obsah

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Stručný úvod do turbulence | 10 |
| 1.1 | Reynoldsovo číslo | 10 |
| 1.2 | Střední a flukтуаční složka rychlosti | 11 |
| 1.2.1 | Velikost vírů | 11 |
| 1.2.2 | Energetický spád | 12 |
| 1.2.3 | Rychlost disipace kinetické energie | 13 |
| 2 | Particle Image Velocimetry (PIV) | 14 |
| 2.1 | Historie a přehled | 14 |
| 2.2 | Základní charakteristika PIV | 15 |
| 2.3 | Částice | 15 |
| 2.4 | Zařízení pro PIV | 16 |
| 2.4.1 | Laser | 16 |
| 2.4.2 | Kamera | 16 |
| 2.5 | Zpracování obrázků | 16 |
| 2.5.1 | Více kroková metoda zpracování | 16 |
| 2.6 | Vyhodnocení výsledků | 17 |
| 2.6.1 | Odhad rychlosti disipace energie a velikosti disipačních vírů | 20 |
| 2.6.2 | Metoda Large-Eddy PIV | 21 |
| 2.6.3 | Faktory ovlivňující přesnost LEPIV | 21 |
| 3 | Schéma měření a použitá technika | 23 |
| 3.1 | Schéma zapojení trati | 23 |
| 3.2 | Trysková hlava | 24 |
| 3.3 | Obsluha trati | 24 |
| 3.4 | Ostatní technika | 24 |
| 3.4.1 | Ochranné prostředky | 24 |
| 4 | Software PivSuite | 26 |
| 4.1 | Funkce masky v PivSuite | 26 |
| 4.2 | Nastavení programu PivSuite | 26 |
| 4.3 | Vliv velikost IA při zpracování | 27 |
| 5 | Zpracování výsledků měření | 30 |
| 5.1 | Naměřená rychlostní pole | 31 |
| 5.2 | Rychlost disipace energie | 31 |
| 6 | Hodnocení výsledků měření | 38 |
| 7 | Použitá literatura | 40 |

Úvod

Na Ústavu chemických procesů AVČR (ÚCHP) probíhá výzkum týkající se rozpadu bublin a kapek v turbulentním proudění. Cílem výzkumu je získat experimentální data o rozpadu bublin (případně kapek nemísitelné kapaliny) v turbulentním proudění vody. Výsledky tohoto výzkumu by měly sloužit k rozvoji numerických modelů turbulentních vícefázových proudění. Za tímto účelem byla sestavena na ÚCHP aparatura, která je dále popsána a ve které se rozpady pozorují. Dosavadní poznatky [6] předpokládají, že pravděpodobnost rozpadu a výsledek rozpadu bublin je řízen především rychlostí disipace turbulentní kinetické energie ϵ , kterou můžeme definovat jako míru přeměny kinetické energie na teplo vlivem vazkosti tekutiny, jednotkou je $[W/kg] = [m^2 \cdot s^{-3}]$. Tímto vzniká potřeba změřit ϵ v aparatuře.

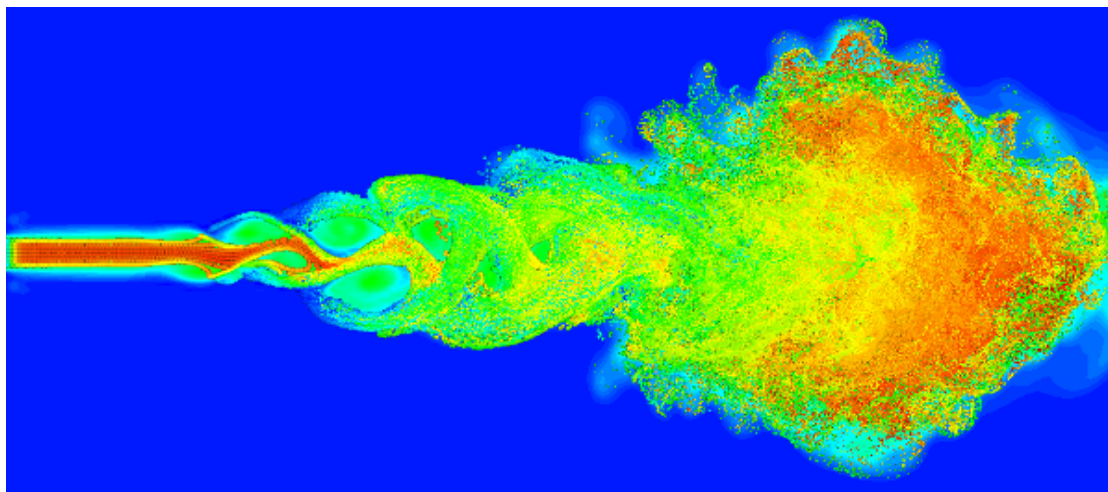
Cíle

Cílem práce je určit pomocí metody LEPIV rychlost disipace turbulentní kinetické energie ve zmíněném zařízení (které je označováno zkratkou TuBuBu - Turbulent Bubble Brake-up). Dalším cílem je provést bilanci turbulentní energie a její pomocí ověřit věrohodnost odhadu hodnoty ϵ .

Následující kapitoly

V následujících kapitolách bude rozvedeno téma:

- turbulence.
- použitých metod PIV a LEPIV.
- aparatury TuBuBu, postupy práce a provedených měření.
- výsledků měření.



Obrázek 1: Laminární proudění přechází postupně se zvyšující se rychlostí do turbulentní fáze. Převzato z: [13]

1 Stručný úvod do turbulence

Turbulence je komplexní jev, kdy proudění má složitou strukturu s celou řadou vírů v širokém rozmezí velikostí. Jde o poměrně dosti popsáný jev, avšak neexistuje univerzální způsob, jak turbulentní proudění řešit. V této kapitole bude proveden krátký úvod do proudění, kde bude ilustrováno turbulentní proudění např. na specifickém případě proudění v trubici.

1.1 Reynoldsovo číslo

Proudění se vyskytuje ve dvou formách: laminární a turbulentní, mezi nimi se mohou nacházet mezistupně, jako je nestacionární laminární proudění (viz. obr. 2) nebo intermitentní proudění. Je zvykem charakterizovat proudění tzv. Reynoldsovým číslem, jež je definováno:

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (1)$$

kde u [$m \cdot s^{-1}$] je rychlost tekutiny, L [m] je charakteristický rozměr, a ν [$m^2 \cdot s^{-1}$] je kinematická viskozita. Reynoldsovo číslo je bezrozměrné podobnostní číslo, které udává vztah mezi setrvačnými a vazkými silami. V laminárním proudění se s rostoucím Reynoldsovým číslem snižují disipační ztráty energie v důsledku klesajícího významu viskózních sil. Často ovšem pro vysoká Reynoldsova čísla proudění přejde do turbulentního stavu, ve kterém opět stoupne význam vazkých sil.

Např. v trubici kruhového průřezu je zvykem považovat proudění za laminární, pokud $Re < Re_{krit}$. Re_{krit} je experimentálně určené číslo, jehož hodnota bývá pro trubku kruhového průřezu uváděna jako $Re_{krit} = 2300$.

V laboratorních podmínkách lze však udržet laminární proudění i při Reynoldsově čísle řádově vyšším. Turbulentní rychlostní profil se vyznačuje vyšší vyrovnaností rychlostního pole v důsledku intenzivního míšení kapaliny, které přenáší hybnost ze středu trubky do zpomaleného proudu v blízkosti stěn a tím jej opět urychluje. Křivka turbulentního rychlostního profilu je poté popsána logaritmickým zákonem. Důležitým faktorem při měření rychlostních profilů je vyvinutost proudění. Vyvinuté proudění se nachází v dostatečné vzdálenosti od nátoky do potrubí a je charakterizováno konstantním tlakovým spádem $\frac{dp}{dx} = konst.$ Dle [3] je vzdálenost od nátoky do potrubí, kde je proudění charakterizováno jako vyvinuté, dáno vztahem

$$\frac{x_r}{d} \approx 50d. \quad (2)$$

1.2 Střední a flukтуаční složka rychlosti

Hlavním znakem turbulentního proudění je nestálost rychlostního pole v čase. Na rozdíl od laminárního proudění je turbulentní proudění plné náhlých změn rychlosti, malých i velkých, postrádá ustálenost nebo periodicitu; turbulentní proudění není opakovatelné. V ustáleném turbulentním proudění je obvyklé rychlost okamžitou u rozdělit na časově střední složku \bar{u} a flukтуаční složku u' .

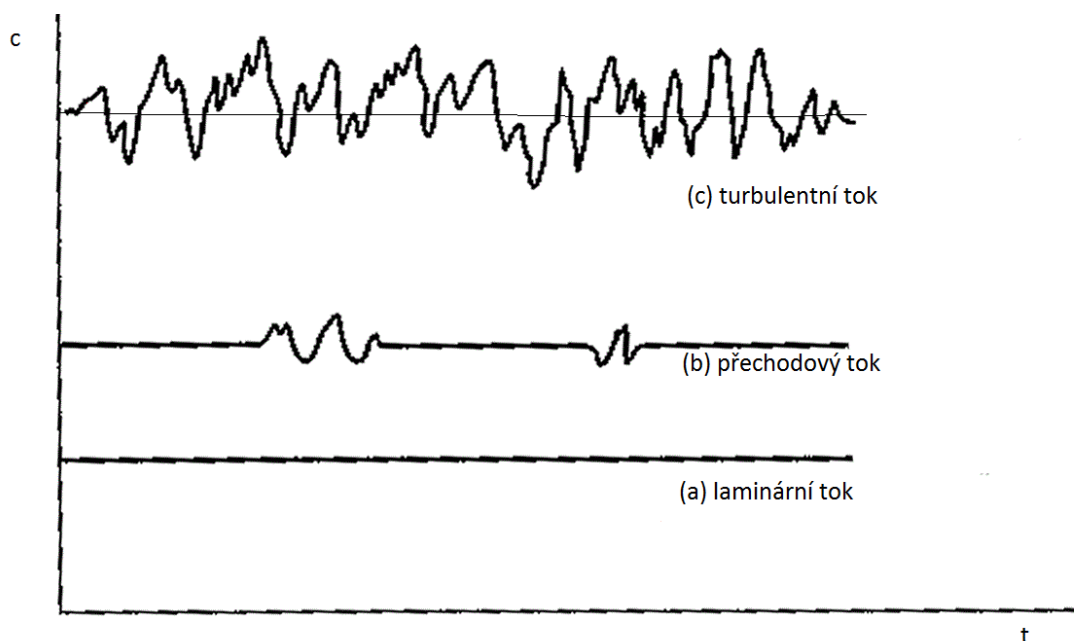
$$u(t) = \bar{u}(t) + u'(t, x) \quad (3)$$

Přestože flukтуаční složka rychlosti u' je svou velikostí nahodilá, např. průměr její druhé mocniny $\langle u'^2 \rangle$ je pro proudění v trubce hladká funkce polohy r . Celkově tedy platí, že ač turbulentní proudění je z pohledu okamžitých hodnot nahodilé, statistické vlastnosti rychlostí bývají reprodukovatelné.

1.2.1 Velikost vírů

Turbulentní proudění je charakterizováno přítomností vírů. Pojem vír (anglicky „eddy“) je poměrně vágně definován, rozhodně se jím nerozumí vírové vlákno, jako má třeba tornádo nebo vodní vír v umyvadle [2], jde spíše o proměnný „shluk“ tekutiny, který koná část rotačního pohybu oproti ostatní tekutině. V turbulentním proudění je přítomna řada vírů, od méně četných velkých až po více četné malé. V obr. 2 se velké víry projevují velkou amplitudou a nízkou frekvencí, naproti tomu malé víry jsou zodpovědné za oscilace s vysokou frekvencí a nízkou amplitudou. Plně vyvinuté turbulentní proudění je charakterizováno spojitým rozložením velikostí vírů.

Kinetická energie obsažená v základním (časově středním) proudění postupně přechází nejdříve do největších vírů (např. o velikosti překážky, rozměru trubky) a poté postupně z velkých vírů na menší. Nejmenší z vírů mají velikost, kterou stanovuje tzv. Kolmogorovovo měřítko. Rozměry velkých vírů jsou tedy definovány geometrickými rozměry toku. Reynoldsovo číslo Kolmogorovových vírů je řádu 1, a proto jsou vazké síly pro tyto víry již významné a jsou schopny utlumit složité proudění. Víry určené Kolmogorovovým měřítkem mají velikost danou vztahem:



Obrázek 2: Se vzrůstající rychlostí proudu ve stejném prostředí narůstá Re . Z laminárního profilu (a) přechází proudění do přechodového (b) a později do turbulentního (c). Střední rychlost laminárního proudění je shodná s okamžitou, kdežto turbulentní se řídí vzorcem: 3. Převzato a upraveno z [11].

$$\eta = \frac{\nu^{\frac{3}{4}}}{\epsilon^{\frac{1}{4}}} \quad (4)$$

Velikost disipačních vírů, vypočtených dle tohoto vzorce, v dále popsané aparatuře je možno nalézt v kap. 2.6.1.

Kolmogorovovo měřítko udává vztah mezi velikostí disipačního víru, vazkostí kapaliny a rychlostí disipace energie. Čím má kapalina vyšší viskozitu, tím větší jsou víry, ve kterých se energie disipuje, a naopak.

1.2.2 Energetický spád

Energetický tok (tj. energie předávaná v kaskádě vírů) by měl mít konstantní velikost skrze celé spektrum vírů, vyskytujících se v proudění. Energie energetického toku je disipována ve vírech určených Kolmogorovovým měřítkem. Energetický spád je potom dán vztahem:

$$\Pi \approx \epsilon \sim \frac{u^3}{l} \quad (5)$$

kde $u [m \cdot s^{-1}]$ je charakteristická rychlost víru a $l [m]$ je jeho velikost.



Obrázek 3: Obraz Leonarda da Vinci znázorňující tok vody do nádrže. Můžeme si všimnout různých velikostí vírů. Zdroj: [12]

1.2.3 Rychlost disipace kinetické energie

Důležitým poznatkem je, že viskozita tekutiny nemá vliv na rychlost disipace její kinetické energie. Viskozita ovlivňuje velikost vírů, které jsou přítomny v proudění; tekutiny s nižší viskozitou obsahují menší vírové struktury a tekutiny s vyšší viskozitou zase větší (dáno Kolmogorovovým vzorcem pro velikost disipačních vírů (4)).

Turbulence je v daném místě popsána energetickým tokem Π skrze kaskádu vírů a tedy i ϵ , které je Π ekvivalentní. Energie je na konci kaskády disipována viskozitou. Tuto disipovanou energii by bylo teoreticky možné určit přímo, kdyby byl znám tensor napjatosti τ_{ij} a rychlost smykové deformace S_{ij} podle vzorce

$$\epsilon = \tau_{ij} S_{ij} \frac{1}{\rho} . \quad (6)$$

Tento vztah je ekvivalentem zmařené práce při tření $P = uF$.

V newtonských kapalinách platí

$$\epsilon = 2\mu S_{ij} S_{ij} \quad (7)$$

protože S_{ij} je úměrné prostorovým gradientům rychlosti $\frac{\partial u}{\partial x}$ je

$$\epsilon \approx \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2. \quad (8)$$

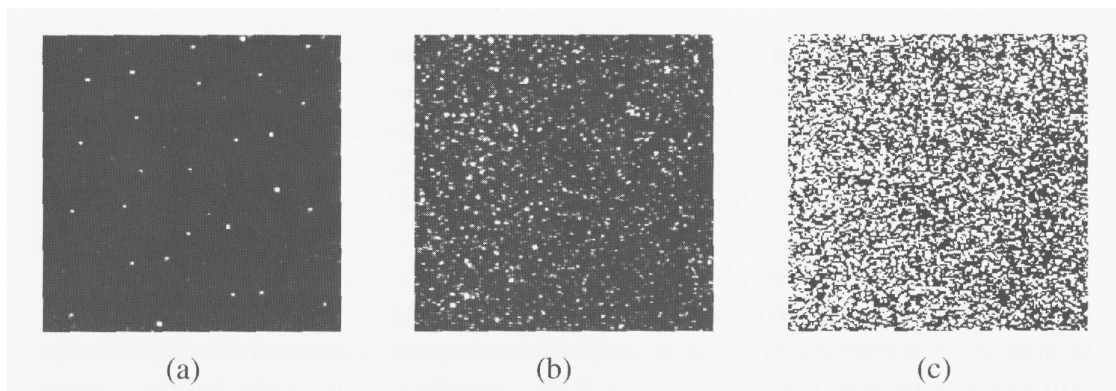
2 Particle Image Velocimetry (PIV)

2.1 Historie a přehled

Před vznikem PIV se rychlostní pole zjišťovala pomocí sond, zavedených do určitých míst proudu, kde se měřila lokální hodnota veličin (tlak nebo přestup tepla); byly používány bodové metody jako třeba HWA (anemometrie žhaveného drátku) nebo LDA (laserová Dopplerovská anemometrie). Takto zjištěné hodnoty v diskretizovaném prostoru se daly do určité míry vztáhnout na plochu/prostor jako celek v omezeném rozsahu.

Particle Image Velocimetry je metoda používaná ke zjištění celého rychlostního pole v jedné rovině, a z nich plynoucích dalších veličin v proudících tekutinách. Jedná se o metodu relativně mladou vyvíjenou v 80. letech 20. století. Dnes je název metody ustálený a jiné názvy se pro tuto metodu nepoužívají.

Na poli zkoumajícím pohyb tekutin nalezneme také mnoho dalších velmi podobných metod. Můžeme zmínit: PTV - Particle Tracking Velocimetry, která na rozdíl od PIV nezkoumá přemístění skupin částic, ale jednotlivých částic. Nebo LSV - Laser Speckle Velocimetry, která je opět obdobou PIV, liší se pouze v četnosti částic, jak je patrné z obr. 4. Dále je užíváno mnoho metod na bázi PIV, které jsou však jistým způsobem upraveny (Stereo PIV, μ PIV, single-pixel PIV ...)



Obrázek 4: Návaznost označení metod (PTV, PIV a LSV) a jejich závislost na počtu částic v IA. Malá četnost částic v IA v obr. a) - PTV, střední četnost b) PIV, velká četnost c) LSV. Zdroj: [4] str. 7.

2.2 Základní charakteristika PIV

PIV nám poskytuje náhled na vektorové pole rychlostí v rovině měření a umožňuje nám z pohledu vnějšího pozorovatele efektivně vizualizovat tato pole.

Principem takové metody je zkoumání přemístění jednotlivých skupin částic. Obecný průběh měření vypadá takto:

- I. Připravená aparatura s opticky přístupným místem měření (akvárium, otevřený skleněný kanál, trubice,...) je napojena na trať (může být cirkulační) s tekutinou obsahující trasovací částice, o kterých bude pojednáno později v textu.
- II. Laser, který je synchronizován se snímací frekvencí kamery, je instalován tak, aby jeho paprsek byl kolmo na osu objektivu kamery. Paprsek laseru je vhodnou optikou (např. cylindrickou čočkou) „roz- tažen“ do roviny, tzv. laserového nože.
- III. Pomocí kamery je vždy zaznamenáno několik dvojic snímků, které zachycují rozmístění částic. Vzhledem ke statistické povaze turbulentního proudění je třeba nahrát velké množství takových dvojic snímků.
- IV. Z takto získaných fotografií se poté pomocí softwaru (viz. kapitola 2.5) pro zpracování PIV snímků získávají nejčtetnější přemístění částic pro jednotlivé podoblasti snímku. Přemístění částic pak odpovídá přemístění kapaliny a z něj je tedy možné určit její rychlost.

2.3 Částice

Částice pro metodu PIV je třeba dělit dle použití pro plyn či kapalinu. V plynu se užívá zejména roztroušených kapiček rostlinných olejů. V rámci zaměření této bakalářské práce budou rozebrány pouze trasovací částice pro kapaliny. Pro částice užívané v kapalinách je důležité několik aspektů, především:

- I. Velikost - Na trhu je pestrá škála velikostí částic pohybující se od jednotek po stovky mikrometrů. Teorie [1] říká, že velikost částic by měla být 2-3 pixely pro snížení chyb měření, Pro menší částice je vhodné silně zvýšit jejich četnost - tím se PIV přiblíží metodě LSV.
- II. Reflexivita - Kvalita povrchu a velikost částice hrají významnou roli v množství odraženého světla od částice. Také záleží na materiálu a jeho charakteristikách.
- III. Tvar a kvalita povrchu - Jedná se zejména o to, jestli je daná částice symetrická. Symetričnost ovlivňuje její unášení a stejnoměrnost odrazu světla od různých stran.

- IV. Hustota - částice vnášené do toku plynů by měly mít přibližně stejnou hustotu jako proudící plyn. Při užití PIV pro kapaliny není hustota tak důležitá, jelikož částice povětšinou dobře sledují proudění.

Částice jsou obvykle dostupné ve formě: dutých skleněných kuliček, polystyrenových, latexových, melaminových kuliček. Někdy mohou být také ve tvaru zrněk (např. použití pilu z jehličnatých stromů, viz.[1] str. 60).

V kapalinách s možným výskytem plynu se používají fluorescenční částice, barvivem je kupříkladu rhodamin. Takové částice je možné pozorovat i přes filtr, který zamezuje vniku laserového záření do objektivu kamery.

Při výběru částic je třeba dbát na: velikost snímané oblasti, sílu světelného zdroje, druh a rychlost kapaliny. Podrobnější informace lze nalézt v [1] nebo [4].

2.4 Zařízení pro PIV

Vybavení pro PIV sestává především z pulzního laseru a kamery, osazených vhodnou optikou, doplněných počítačem a softwarem. Následuje podrobnější popis komponent.

2.4.1 Laser

Používáme laser, který má dostatečný výkon, pro prosvícení zkoumané kapaliny. Nejčastěji se používají lasery pulzní s dvěma kavitami (obvykle typu Nd:YAG nebo Nd:YLF) s energií pulzu v desítkách mJ . Potřebná energie laseru se odvíjí od velikosti osvětlovaného prostoru, osvětlované látky a dalších aspektů.

2.4.2 Kamera

Používají se digitální černobílé kamery s rozlišením v řádu megapixelů. Pro studium rychlých jevů potom rychloběžné kamery s frekvencemi snímání až 200 kHz; avšak frekvence snímání se odvíjí od rozlišení snímků - čím je rozlišení nižší, tím vyšší může být frekvence kamery.

2.5 Zpracování obrázků

2.5.1 Vícekroková metoda zpracování

Pro plné pochopení problematiky zpracování a z toho plynoucích nepřesností je třeba vysvětlit princip zpracování dvojic snímků. Dvojice snímků postupujících do softwaru pro zpracování jsou rozřezány na stejně velké dílčí snímky, tzv. interogační oblasti (angl. interrogation area, dále IA). Sousední IA se v snímku překrývají o hodnotu, která je definována krokem, po kterém se IA posunují.

Nejobvyklejším algoritmem dnes je metoda nazývaná anglicky „multi-pass multi-grid approach“. Metoda nazývaná „multi-pass multi-grid approach“ spočívá v provedení kroku popsaném níže vícekrát, přičemž velikost IA je postupně zmenšována, stejně tak velikost kroku. Síť je poté zjemňována a přesnost vektorů by měla narůstat. Zpracování snímků je prováděno iteračně v několika průchodech; každá iterace sestává z těchto

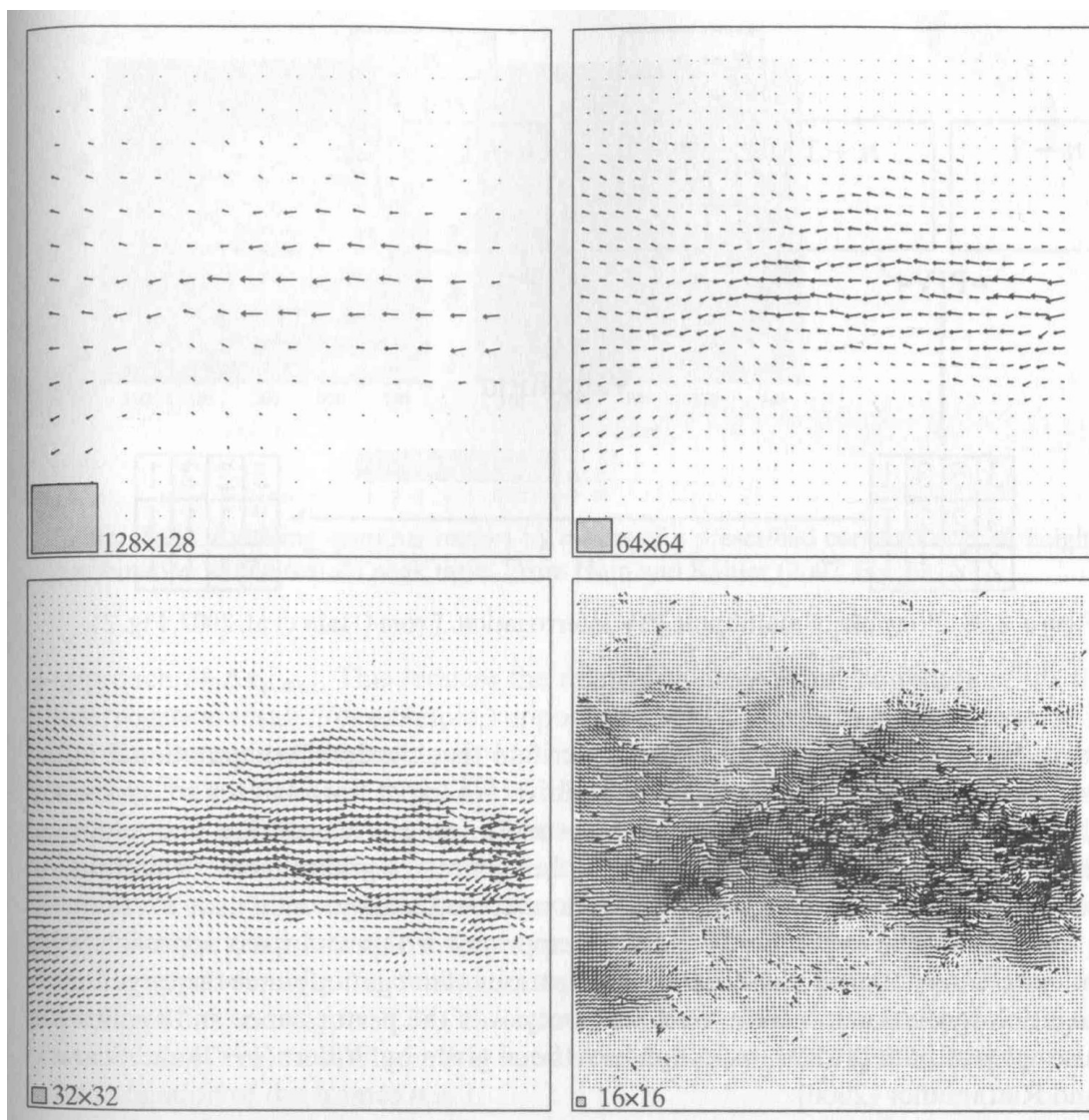
kroků:

1. V softwaru pro zpracování jsou předvoleny velikosti interogačních oblastí a jejich počet. Velikosti IA se pro následující iterace postupně zmenšuje, jak je možno vidět na obr. 5 nebo 6.
2. Z předchozí iterace je znám odhad rychlostního pole (přemístění částic); pro první iteraci pokládáme $u_0 = v_0 = 0$.
3. Snímky jsou přepočítány a jsou vytvořeny „nové snímky“, které jsou odhadem stavu částic v čase $t_1 + \frac{1}{2}\Delta t$ pro snímek 1 a $t_2 - \frac{1}{2}\Delta t$ pro snímek 2, přičemž se předpokládá posun částic odpovídající odhadnuté rychlosti. Za ideálních podmínek (přesný původní odhad u a v , částice pohybující se pouze ve snímané rovině, tj. nemizejí z důvodu složky rychlosti w) by tyto snímky byly identické.
4. Pomocí vzájemné korelační funkce je nalezeno (na deformovaných snímcích z předchozího bodu) pro každou IA optimální přemístění tak, aby se snímky nejlépe shodovaly.
5. Přemístění je přičteno k původnímu odhadu rychlosti.
6. Vypočtená přemístění, a tedy rychlosti, jsou ověřována (jsou hledány „vadné“ vektory). Pokud se přemístění příliš liší od přemístění sousedních buněk, je toto přemístění vyhodnoceno jako neplatné a je nahrazeno interpolací sousedních hodnot.
7. Proces se opakuje pro zmenšující se oblasti IA a krok (popř. stejné IA a krok).

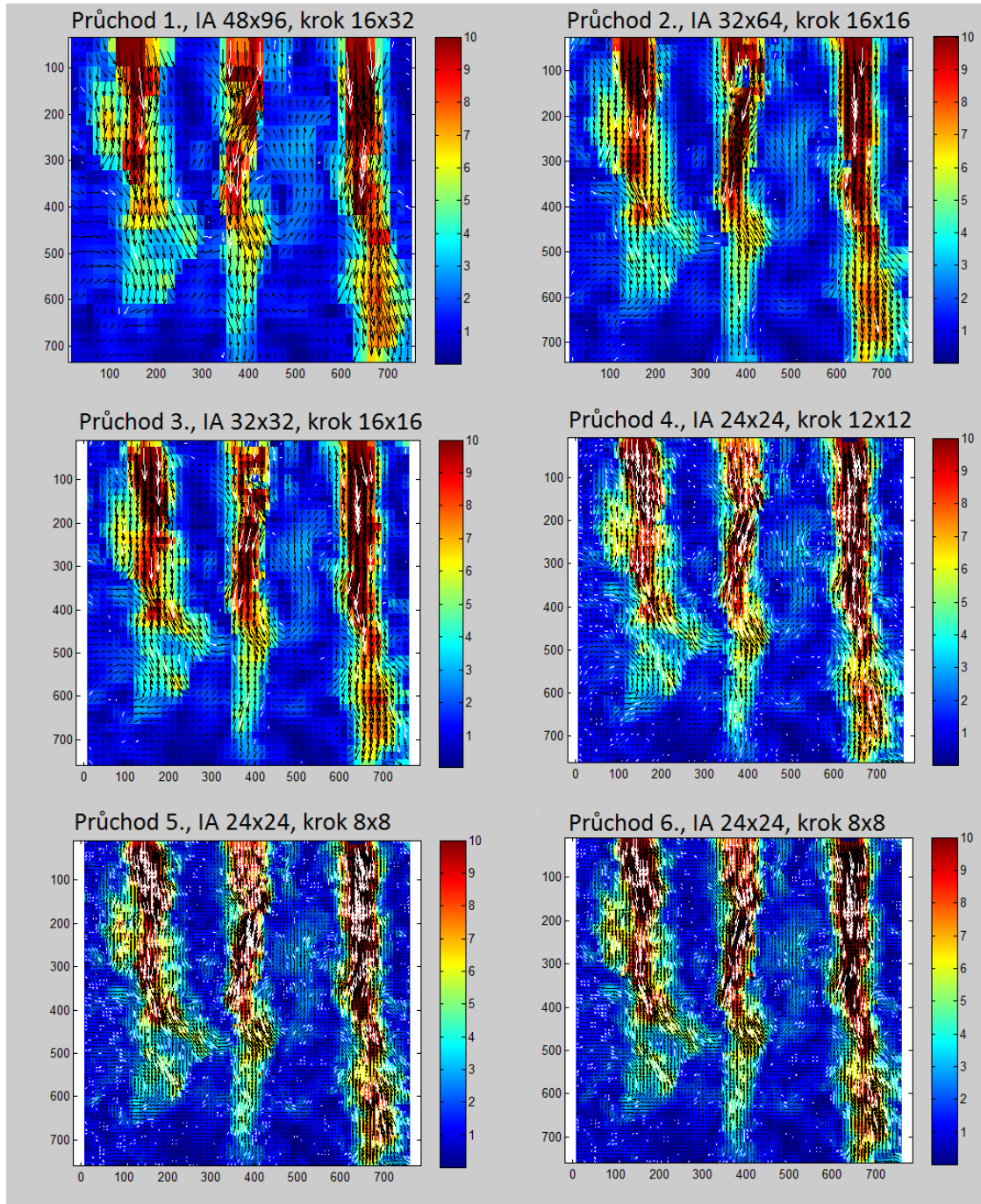
Pro objektivitu výsledků rychlosti je třeba znát měřítko velikosti snímané oblasti a jejího průmětu na fotografický obraz v pixelech.

2.6 Vyhodnocení výsledků

Výstupem zpracování obrázků je tabulka dat, ve které jsou souřadnice x , y v pixelech (popřípadě přepočítané pomocí měřítka na reálnou hodnotu) a složky vektoru rychlosti. V tabulce se taktéž mohou objevit dopočítané veličiny jako například rychlost disipace energie ϵ nebo turbulentní kinetická energie k . V některých případech (jako například v popisované soustavě) je potřeba spojit více tabulek (vektorových obrázků) dohromady pro získání širšího pohledu. Z takových dat je možné spočítat a vizualizovat další veličiny. Pro potřeby této práce to jsou zejména: turbulentní kinetická energie, rychlost disipace turbulentní kinetické energie, vertikální a horizontální složky rychlosti.



Obrázek 5: Víceprůchodová metoda (multipass approach) pro interogace v postupně se zmenšujících interogačních oblastech. Zakreslení směru proudění je netypické, zprava doleva. Převzato z: [1] str. 409.



Obrázek 6: Ukázka postupné iterace jedné dvojice snímků při zmenšujících se integračních oblastech. Barevné pozadí znázorňuje absolutní rychlost v pixelech za sekundu, vektory rychlosti potom směr (směr proudění shora dolů). Osy znázorňují polohu měření v pixelech - zde celá měřená oblast. Bílé vektory neprošly validací a byly nahrazeny interpolací okolních buněk.

2.6.1 Odhad rychlosti disipace energie a velikosti disipačních vírů

Rychlost disipace turbulentní kinetické energie ϵ [$m^2 \cdot s^{-3} = W/kg$] je definována vzorcem (6).

Střední rychlost disipace turbulentní kinetické energie pro proudění vody v trubici kruhového průřezu lze určit podle vzorce

$$\epsilon = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{d} u^3 \quad (9)$$

kde součinitel tlakové ztráty za předpokladu $Re < 8000$ je

$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{\frac{1}{4}}} \quad (10)$$

Ilustračním případem může být proudění vody v trubici o $d = 200$ mm, rychlosti $u = 0.25$ m · s⁻¹ a $Re = 47\,170$ kde poté $\epsilon = 8.25 \cdot 10^{-4}$ W/kg. Velikost vírů, ve kterých dochází k disipaci je dle vzorce (4) $\eta = 0.195$ μm.

Pro případ měření v aparatuře TuBuBu však rychlost disipace nemůže být vyjádřena přímo z měření prostřednictvím rovnice (6). Velikost ϵ v uvedené aparatuře se pohybuje v rozmezí $\epsilon = (10^{-3}$ až $10^3)$ W/kg, což odpovídá velikosti disipačních vírů (opět dle vzorce (4)) $\eta = (0.19$ až $0.0059)$ mm; PIV má však prostorové rozlišení $0.5 \div 1$ mm. Tudíž víry, kde se disipace odehrává, zjevně není možno touto metodou zachytit.

Pro kalkulaci rychlosti disipace turbulentní kinetické energie lze použít několik metod, podrobněji popsanych v [7]. Mezi metody pro kalkulaci ϵ patří:

- Direct method - česky přímá metoda kalkulace ϵ ; rovnice (7) může být zjednodušena (za předpokladu izotropní turbulence) na

$$\epsilon = 15\mu \left\langle \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 \right\rangle \quad (11)$$

Tato metoda tedy počítá ϵ z prostorových derivací získaného vektorového pole. Předpokladem metody je vysoké prostorové rozlišení naměřeného rychlostního pole, a tento předpoklad v prezentovaných měřeních nebyl splněn.

- Structure function fit - metoda je založena na poklesu strukturální funkce (druh vzájemné korelace rychlosti ve dvou bodech), jako funkce vzdálenosti těchto bodů. Pomocí teorie izotropní homogenní turbulence je možné z takovéto funkce určit ϵ . Tato metoda zde není použita z důvodu nízké homogenity turbulentního proudění.
- Large-Eddy PIV - metoda zde zvolená pro výpočet ϵ , je popsána v odstavci 2.6.2.
- Scaling argument metoda - plyne z dimenzionální analýzy, podle které

$$\epsilon = A \frac{u'^3}{L_{11}} \quad (12)$$

kde A je konstanta, L_{11} je integrální délkové měřítko a u' je flukтуаční složka rychlosti.

Porovnání výsledků při použití každé metody je možné nalézt v literatuře [7].

2.6.2 Metoda Large-Eddy PIV

Metoda Large-Eddy PIV (dále jen LEPIV) vychází z metody LES (Large Eddy Simulation), která se používá pro numerické modelování proudění. Metoda předpokládá, že prostorové rozlišení Δ PIV měření je větší (tj. horší) než je velikost Kolmogorovových vírů η , tj. $\Delta > \eta$. Metoda LEPIV předpokládá přechod energie ve vírech od počátečních rozměrů po rozměry, kde se energie disipuje. Takový tok energie může být přibližně popsán pomocí tenzoru deformace S_{ij} a smykového turbulentního (Reynoldsova) napětí τ_{ij} poté:

$$\epsilon = -\left\langle \tau_{ij} \tilde{S}_{ij} \right\rangle \quad (13)$$

kde

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (14)$$

kde \tilde{u} je „filtrovaný“ vektor rychlosti, tedy takový, který je možno rozpoznat pomocí PIV metody (lze se domnívat, že \tilde{u} zhruba odpovídá průměrné rychlosti v IA, ovšem skutečný vztah mezi u a \tilde{u} je asi složitější) a nikoliv skutečný vektor rychlosti.

Pro modelování turbulentního napětí τ_{ij} se používá Smagorinského model [8], podle kterého

$$\tau_{ij} = -2C_s^2 \Delta^2 |S_{ij}| S_{ij} . \quad (15)$$

Zde C_s je empirická konstanta, která bývá obvykle stanovena na $C_s = 0.17$ a prostorové rozlišení Δ je velikost oblasti, přes kterou je rychlost průměrována. Problémem LEPIV metody je to, že není zřejmé, jak přesně hodnotu Δ stanovit a není jasné, jak Δ přispívá k chybě výpočtů. V našem programu za hodnotu Δ volíme velikost kroku.

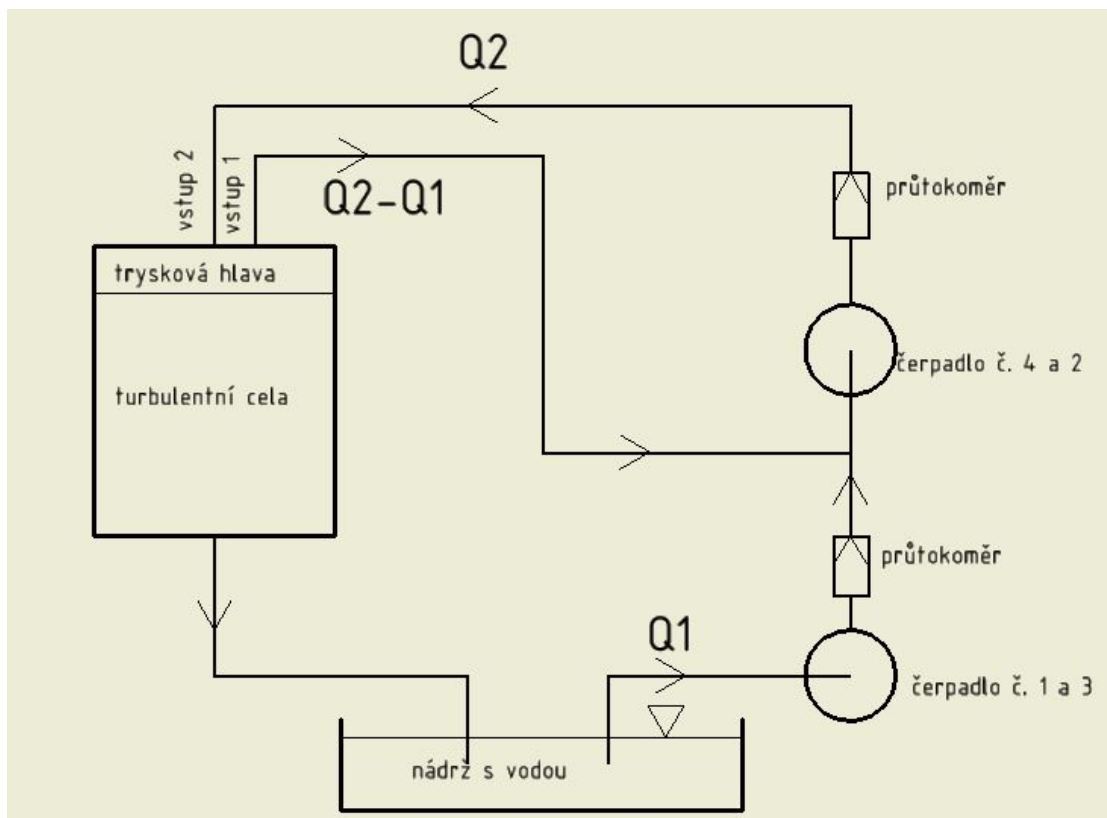
2.6.3 Faktory ovlivňující přesnost LEPIV

U LES je koncept určení turbulentních napětí (a tedy i ϵ) poměrně jasný. U LEPIV tento přístup kolísá na řadě věcí:

- Není zcela jasné, jakým způsobem PIV filtruje skutečná rychlostní pole (jak souvisí u a \tilde{u} , v a \tilde{v}).;
- Není tedy jasná přesná hodnota Δ . Můžeme tedy Δ nastavit na délku kroku, velikost IA nebo např. tloušťku laserového nože.
- PIV měření neumožňuje nalézt všechny složky tenzoru deformace. Neznámé složky, v rovině kolmé k rovině laserového nože, jsou potom nahrazeny složkami naměřenými. Je tedy předpokládáno, že mají podobnou hodnotu.

Měření ϵ je tedy nutné považovat za semiempirické. Dalšími faktory jsou velikost IA, kroku, počet iterací, četnost částic, tloušťka laserového nože. Z výčtu je možné vidět, že aspektů, jež ovlivňují přesnost metody, je mnoho a stanovení ϵ je nutné považovat za odhad.

Více informací je možné najít v [1], [7] a [8].



Obrázek 7: Schéma měřicí trati.

3 Schéma měření a použitá technika

3.1 Schéma zapojení trati

Trať byla sestavena již dříve pro podobný experiment, který probíhal na Ústavu chemických procesů Akademie věd České republiky. Schéma na obr. 7 objasní fungování celého systému.

Na začátku trati je nádrž s destilovanou vodou o objemu asi 20 dm^3 , která slouží jako uklidňující místo pro vodu, místo pro údržbu (přidávání barviva, částic, dezinfekce,...). V nádrži je také umístěna chladicí spirála, která drží teplotu vody na 24°C .

Z nádrže je voda nasávána skrz čerpadla č. 1 a 3 (označováno jako čerpadlo 1), která tvoří celkový oběh v měřicí trati. Čerpadla č. 2 a 4 (označováno jako čerpadlo 2) jsou regulujícím prvkem, který buď a) při stejném průtoku jako čerpadlo č. 1 pouze prohání vodu dále celým okruhem; b) při vyšším průtoku přisává vodu z mezikruží trysek, čímž vzniká v cele proudění o vyšší intenzitě turbulence.

3.2 Trysková hlava

Rozmístění trysek a jejich zapojení popisuje obrázek 8. Průřez přívodních kanálů je větší než celkový průřez trysek, aby byly zanedbatelné dynamické tlaky na vstupu do každé trysky a průtok všemi tryskami byl tak stejný.

Trysky jsou umístěny v 10 řadách po 5, na desce je tedy 50 trysek. Každá tryska má dvě části, je to: a) střed, kterým teče voda dolů; b) mezikruží mezi středem a tělem trysky, kudy je možné vodu odsávat směrem do čerpadla č.2. Čerpadlo 2 tedy nasává vodu z mezikruží a vrací ji zpět do jejich středů.

Samotná cela je poté tvořena tryskami ve své vrchní části, skleněnými stěnami a ocelovým odtokem v dolní části. Více je patrné ze schématu trati (obr. 7) a celý (obr. 8).

pozn.: Důležitým poznatkem je, že turbulence v popisované turbulentní cele je dosaženo intenzivním mícháním kapaliny pomocí přívodu kapaliny z trysek a přisávání kapaliny do mezikruží trysek. Reynoldsovo číslo pro proudění v trysce i cele se však nachází v oblasti laminárního proudění.

3.3 Obsluha trati

Měřicí trať je obsluhována počítačem. Čerpadla (Ebara CD70/05) jsou napojeny na frekvenční měniče (Commander SK). Frekvence motorů je nastavována pomocí PID regulátorů (ty jsou součástí měničů) tak, aby průtokoměry dosahovaly požadované hodnoty. Požadované hodnoty průtoků jsou nastavovány pomocí počítače (software LabView, měřicí systém NI cDAQ). Chod každého čerpadla lze ovládat zvlášť nastavením jeho průtoku, existují tedy 2 parametry, které je možno měnit. Maximální průtok každého čerpadla při plném výkonu je asi $88\text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

3.4 Ostatní technika

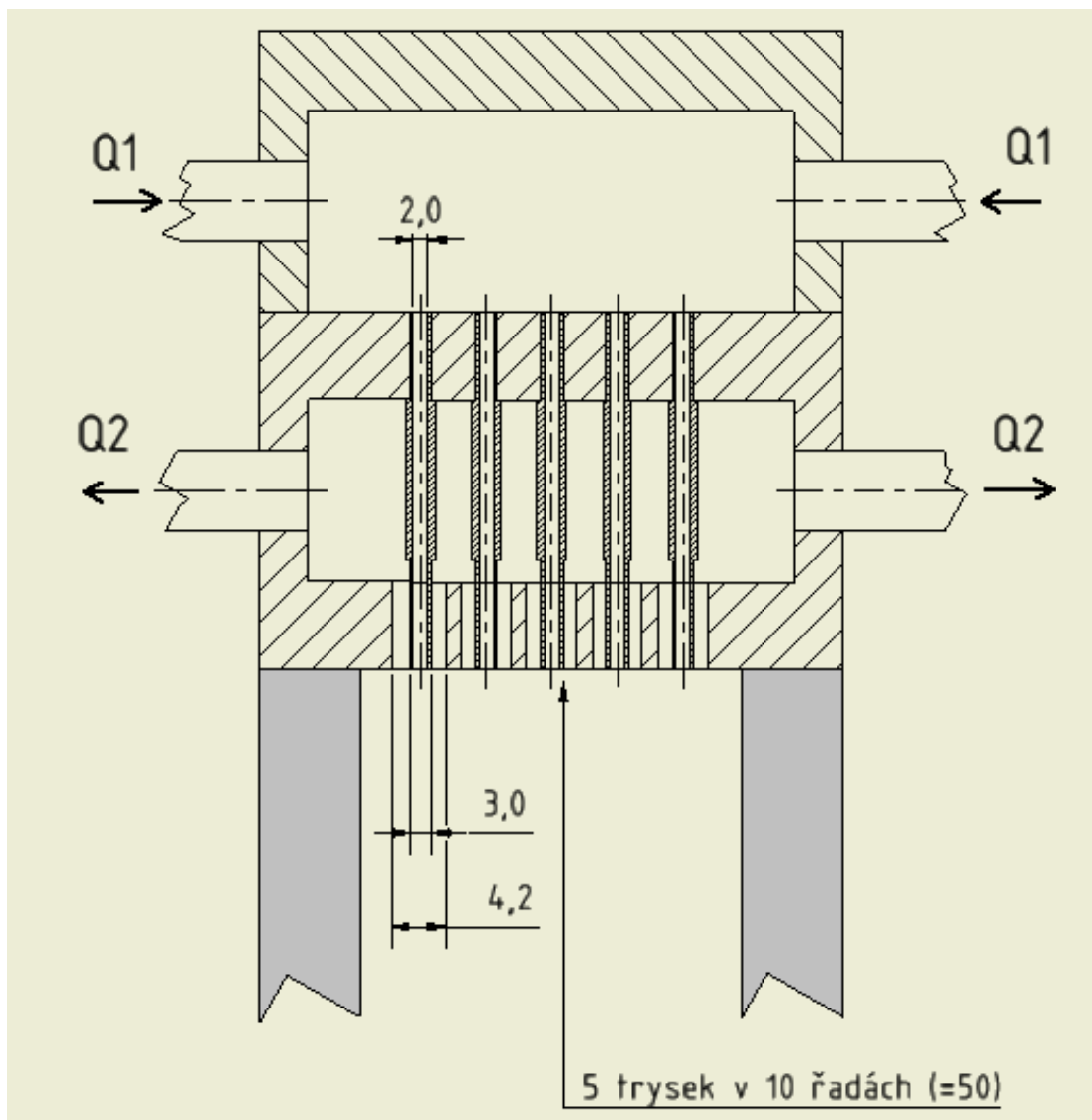
Při měření byl použit Laser Quatronix Darwin-Duo se dvěma kavitami, každé o maximálním výkonu 40 W a maximální frekvenci záblesků 10000 Hz a vlnové délce 527 nm . Laser i kamera musí být nastaveny na stejnou frekvenci, konkrétně kamera vysílá impuls do spouště laseru, který vydá emisi záření právě v expoziční době kamery. Snímacím prvkem je vysokofrekvenční kamera Photron SA1.1. Použitý objektiv Nikkor 60 mm , $f2.8$.

3.4.1 Ochranné prostředky

Při zacházení s laserem tohoto výkonu je třeba dbát zvláštních opatření. Při práci všichni přítomní použili ochranné brýle LaserShield filtrující záření o vlnových délkách nižších než 532 nm . Též objektiv kamery a čip byly chráněny tímto filtrem. Vzhledem k hlučnosti laseru a měřicí trati bylo nutné použít ochranu sluchu.

Celá měřicí oblast prosvícená laserovým nožem byla v době snímání zakryta. Otevření dveří nepovolnou osobou vede k vypnutí laseru clonkovým spínačem.

Byly dodrženy všechny bezpečnostní pokyny a směrnice.



Obrázek 8: Schéma zapojení trysek v hlavě turbulentní cely.

4 Software PivSuite

Pro zpracování fotografií při PIV byl použit program PivSuite [10]. Tento software byl vytvořen na Ústavu chemických procesů AVČR, Oddělení vícefázových reaktorů. Jedná se o balíček podprogramů a skriptů běžících v prostředí programu MatLab.

4.1 Funkce masky v PivSuite

Pro vymezení míst, která budou v programu PivSuite zpracovávána se používá tzv. maska. Jde o 8-bitový obrázek, ve kterém je bílou barvou zakryta ta část, která je zpracovávána a černou barvou ta část, která není zpracovávána (např. stěny, trysky ap.).

4.2 Nastavení programu PivSuite

Program pro zpracování série fotografií z jedné části cely má následující strukturu:

```
% Načtení složky s fotografiemi.
imagePath = '../Plane A300 Q22-22';
% Doplnění masky pro požadovanou oblast zpracování.
pivPar.imMask1 = '../Plane A300 Q22-22/mask.BMP';
pivPar.imMask2 = '../Plane A300 Q22-22/mask.BMP';
% Zadání expozičního času pro výpočet rychlosti z přemístění.
pivPar.expFPS = 10000;
% Inicializace proměnných.
clear('im1','im2');
pivData = [];
% Načtení seznamu obrázků a jejich seřazení.
aux1 = dir([imagePath, '*1.BMP']);
aux2 = dir([imagePath, '*2.BMP']);
for kk = 1:numel(aux1)
    im1(kk, 1) = [imagePath, '/', aux1(kk).name];
    im2(kk, 1) = [imagePath, '/', aux2(kk).name];
end
% Vyhodnocená data se budou ukládat do složky s příponou
PivOut-A.
pivPar.anTargetPath = [imagePath, 'pivOut-A'];
% Obrázky budou zpracovány s následujícím nastavením:
% Velikost IA v jednotlivých iteracích algoritmu.
pivPar.iaSizeX = [48 32 32 24 24 24];
pivPar.iaSizeY = [96 64 32 24 24 24];
% Velikost kroku v jednotlivých iteracích algoritmu.
pivPar.iaStepX = [16 16 16 12 8 8];
pivPar.iaStepY = [32 16 16 12 8 8];
% Není použit odhad rychlosti z předchozích dvojic snímků.
```

```

pivPar.anVelocityEst = 'none';
% Uložení výsledků do složky, zpracování dosud nezpracovaných snímků.
pivPar.anOnDrive = true;
pivPar.anForceProcessing = false;
% Průběžné vykreslování grafu. Platné vektory jsou vykresleny černě a ne-
platné bíle.
pivPar.qvPair = ...
'Umag', 'clipHi', 10, ...
'quiver', 'selectStat', 'valid', 'linespec', '-k', ...
'quiver', 'selectStat', 'replaced', 'linespec', '-w';
% Vyhlazování prvních pěti iterací, poslední nevyhlazena.
pivPar.smMethod = 'smoothn', 'smoothn', 'smoothn', 'smoothn', 'smoothn', 'none';
% Nastavení všech parametrů na výchozí.
pivPar.vlTresh = [5 5 5 2];
pivPar.vlDist = [1 1 1 2];
pivPar.vlMinCC = 0.15;
[pivPar2, pivData] = pivParams(pivData, pivPar, 'defaultsSeq');
% Provedení algoritmu a uložení výsledků.
[pivData] = pivAnalyzeImageSequence(im1, im2, pivData, pivPar2);

```

Výsledkem zpracování je proměnná `pivData`, která obsahuje:

- Pole x a y s tabulkami souřadnic bodů, pro které jsou určeny rychlosti.
- Tabulky u a v se složkami vektorů rychlosti.
- Pomocné údaje (např. počet platných a neplatných vektorů rychlosti).

Pro složitost a délku programu nebudou uvedeny skripty pro spojování jednotlivých rovin.

4.3 Vliv velikost IA při zpracování

Rozhodujícím vlivem ve zpracování obrázků je velikost a tvar interogačních oblastí; také počet iterací.

V tomto odstavci bude uvedena demonstrace tohoto jevu na několika případech nastavení.

Prvním případem bude nastavení, které se osvědčilo nejvíce. Proces je tvořen 6 iteracemi, o velikostech:

$$\text{pivPar.iaSizeX} = [48\ 32\ 32\ 24\ 24\ 24]$$

$$\text{pivPar.iaStepX} = [16\ 16\ 16\ 12\ 8\ 8]$$

$$\text{pivPar.iaSizeY} = [96\ 64\ 32\ 24\ 24\ 24]$$

$$\text{pivPar.iaStepY} = [32\ 16\ 16\ 12\ 8\ 8]$$

Pro první nastavení je zaznamenáno **12,53%** neplatných vektorů. Všimněme si, že na počátku je IA o rozměrech 48x96 a 32x64, tedy obdélník s delší stranou ve směru proudu.

Jako druhý případ je uvedeno standardní nastavení o 4 iteracích.

$$\text{pivPar.iaSizeX} = [64\ 32\ 16\ 16]$$

$$\text{pivPar.iaStepX} = [32\ 16\ 8\ 8]$$

$$\text{pivPar.iaSizeY} = [64\ 32\ 16\ 16]$$

$$\text{pivPar.iaStepY} = [32\ 16\ 8\ 8]$$

Pro druhé nastavení je zaznamenáno **20,63%** neplatných vektorů

V třetím případě jsou voleny 4 iterace a nastavení:

$$\text{pivPar.iaSizeX} = [96\ 64\ 32\ 16]$$

$$\text{pivPar.iaStepX} = [32\ 32\ 16\ 8]$$

$$\text{pivPar.iaSizeY} = [96\ 64\ 32\ 16]$$

$$\text{pivPar.iaStepY} = [32\ 32\ 16\ 8];$$

Pro třetí nastavení je zaznamenáno **23,59%** neplatných vektorů.

Pro poslední nastavení je použito opět 6 iterací se čtvercovými IA.

$$\text{pivPar.iaSizeX} = [128\ 96\ 64\ 32\ 24\ 24]$$

$$\text{pivPar.iaStepX} = [32\ 32\ 32\ 16\ 8\ 8]$$

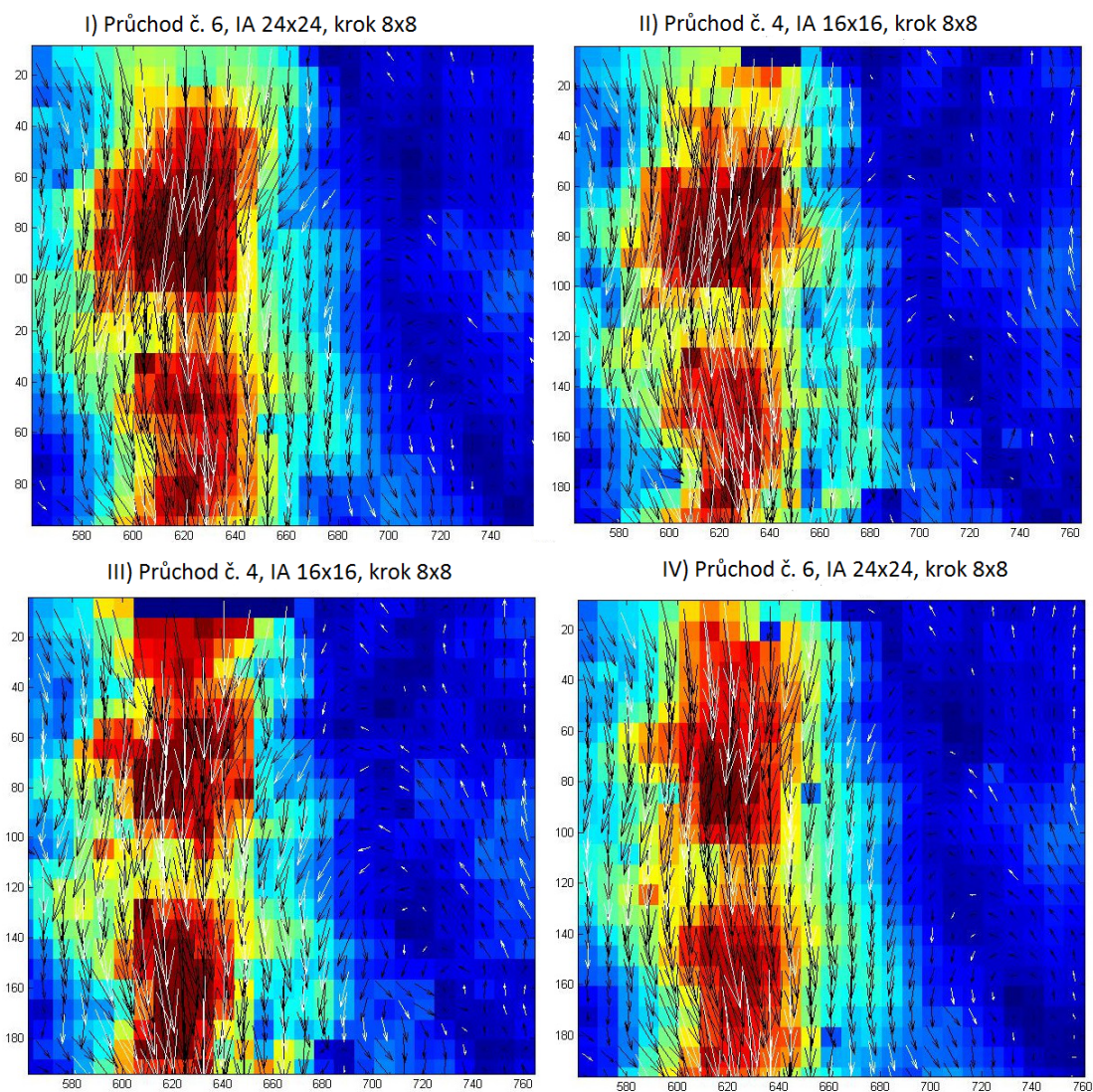
$$\text{pivPar.iaSizeY} = [128\ 96\ 64\ 32\ 24\ 24]$$

$$\text{pivPar.iaStepY} = [32\ 32\ 32\ 16\ 8\ 8]$$

Pro čtvrté nastavení je zaznamenáno **13,88 %** neplatných vektorů.

Grafické porovnání pro situace I–IV je zobrazeno v obrázku 9.

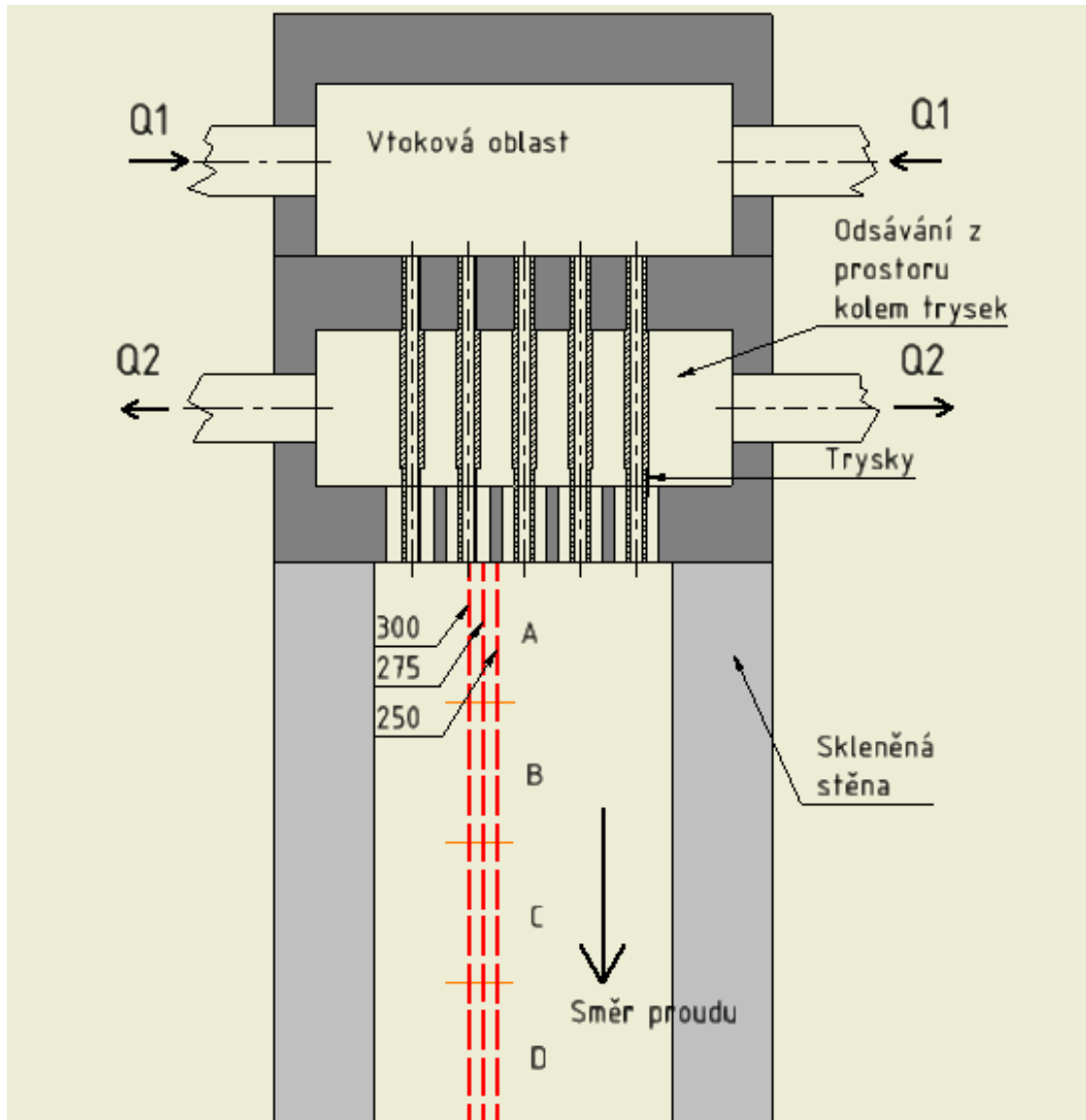
Z grafického porovnání a číselného vyjádření počtu vadných vektorů je zřejmé, že nejlépe jsou obrázky vyhodnocovány v případě I. V tomto případě byly použity obdélníkové interogační oblasti v prvních dvou iteracích, jejichž delší strana byla ve směru toku. Tyto obdélníkové IA jsou užitečné především tam, kde je rychlost proudu velká zejména ve vertikálním směru a zároveň ve vodorovném směru se rychlosti výrazně mění (pro měření v aparatuře TuBuBu jsou to zejména oblasti A a B, viz. obr. 10). U oblastí C a D je rychlostní pole více vyrovnané ve všech směrech. U oblastí C a D by velikost IA neměla hrát velkou roli, proto nastavení zůstala stejná pro všechny oblasti roviny. Zde si je také možno všimnout, že se zvyšováním počtu iterací se zlepšuje přesnost. Při vyšším počtu iterací roste doba zpracování obrázku neúměrně výsledku.



Obrázek 9: Porovnání výsledků zpracování při různých velikostech IA a počtech iterací. Nejmenšího počtu nahrazených vektorů, značených bílou barvou, bylo dosaženo v případě I. Lze si povšimnout, že ač se jedná o výřez zpracování jednoho snímku, výsledné vektorové pole rychlostí se drobně liší.

5 Zpracování výsledků měření

Rychlostní pole bylo proměřeno v cele ve třech rovinách, které jsou na obr.10 znázorněny červenou barvou.



Obrázek 10: Grafické znázornění umístění měřících rovin.

5.1 Naměřená rychlostní pole

V každé rovině bylo zjištěno rychlostní pole pro 3 různá nastavení průtoků. Byla spočtena rychlost v tryskách a průměrná rychlost v cele. Rychlost v cele se změnou průtoku čerpadla 2 nemění. Data nastavení průtoků, rychlostí v cele a trysce a vpravený energetický tok jsou uvedena v tabulce 1. Střední rychlost v trysce u_t byla vypočítána z průřezu trysky a průtoku. Energetický tok \dot{E} [W] poté odpovídá

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \rho u_t^2 Q \quad (16)$$

Tabulka 1: Rychlost v cele, trysce (označeno dolním indexem t) a velikost disipované energie v závislosti na nastavení průtoku.

| Q_1 [$l \cdot \text{min}^{-1}$] | Q_2 [$l \cdot \text{min}^{-1}$] | u_{cela} [$m \cdot s^{-1}$] | u_t [$m \cdot s^{-1}$] | \dot{E}_t [W] |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------|
| 44 | 44 | 0.20 | 4.67 | 7.98 |
| 44 | 60 | 0.20 | 6.37 | 20.25 |
| 44 | 80 | 0.20 | 8.49 | 47.84 |

Příklady naměřených rychlostních polí (časově průměrné hodnoty) jsou uvedeny v grafech 11, 12 a 13. Grafy jsou označeny podle schématu 10.

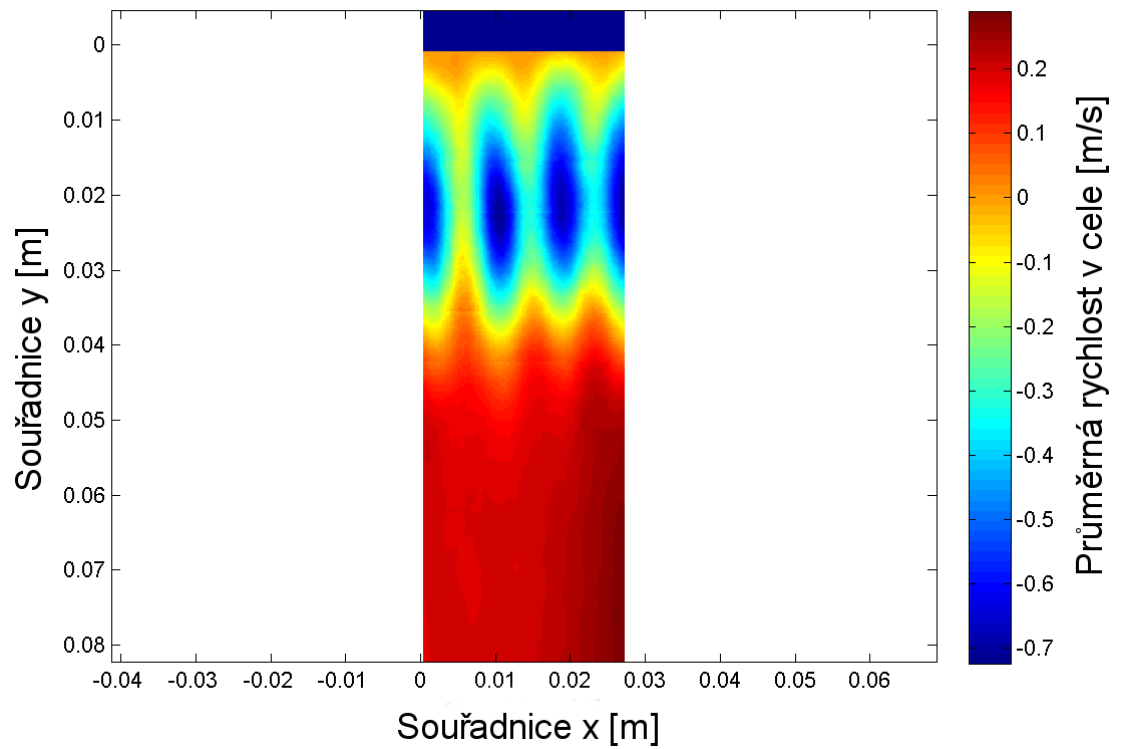
Z vynesení grafů je možno vidět, že při skládání dat oblastí A,B,C,D do jednoho souboru interpolací bylo dosaženo uspokojivého výsledku - v grafech nejsou vidět ostré přechody a průběh je plynulý (s výjimkou roviny 300). Zpracování všech rychlostních profilů proběhlo úspěšně.

5.2 Rychlost disipace energie

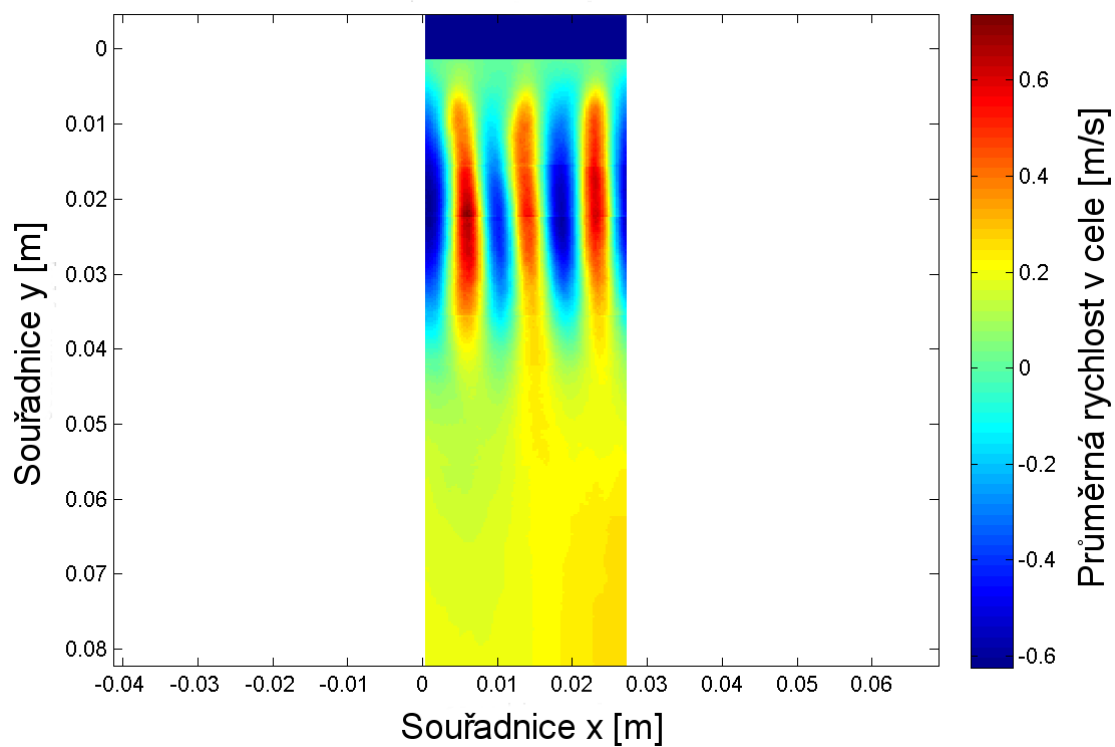
V grafu 14 je zobrazeno pole ϵ v rovině 300 při průtoku $Q_1 = 44 l \cdot \text{min}^{-1}$, $Q_2 = 44 l \cdot \text{min}^{-1}$. Jelikož hodnota ϵ v cele kolísá o několik řádů, je graf vynesěn v logaritmických hodnotách. Patrný může být nespojitý přechod mezi oblastmi, který lze však tolerovat a nehraje významnou roli.

Pro získání průměrné hodnoty ϵ pro každé nastavení průtoku bylo provedeno průměrování hodnot přes jednotlivé roviny (250, 275, 300). Hodnoty ϵ pro každou rovinu a jejich průměr jsou znázorněny v obr. 15.

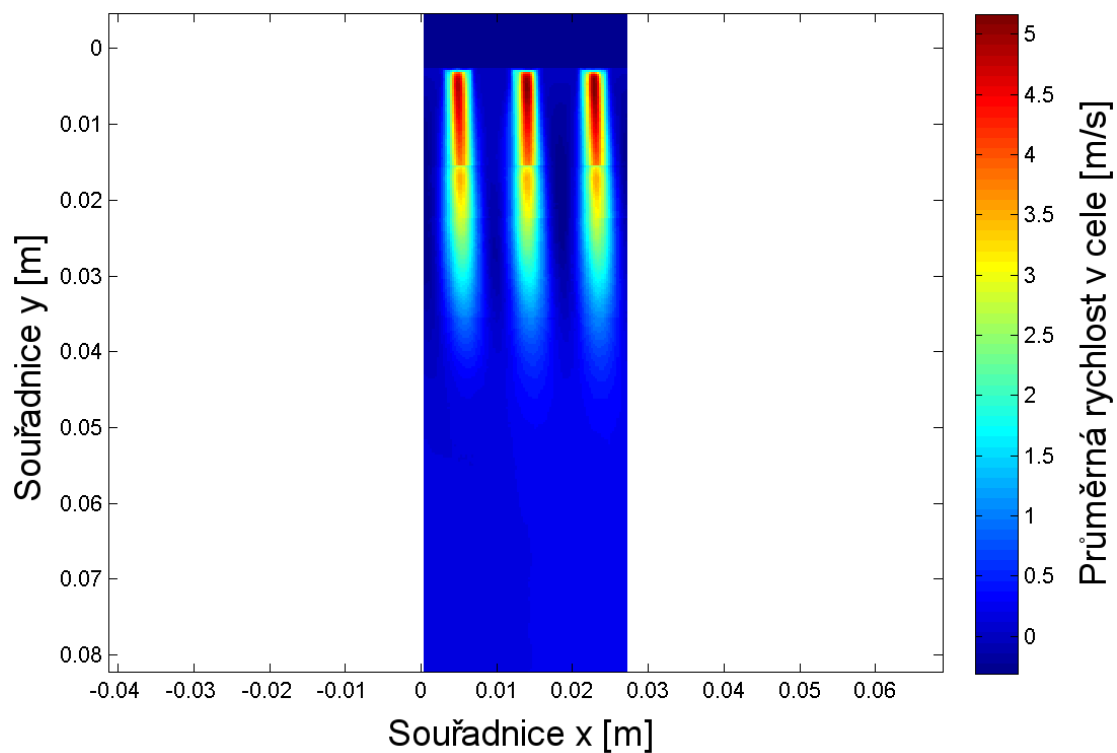
V grafech 15 a 16 je možno všimnout si lokálních chyb (špiček na jinak hladké funkci), které jsou zapříčiněny zejména velkou chybou měření na hranici oblastí (okrajích snímku). Porovnání průměrů pro všechny roviny při odlišných průtocích je znázorněno v obrázku 16.



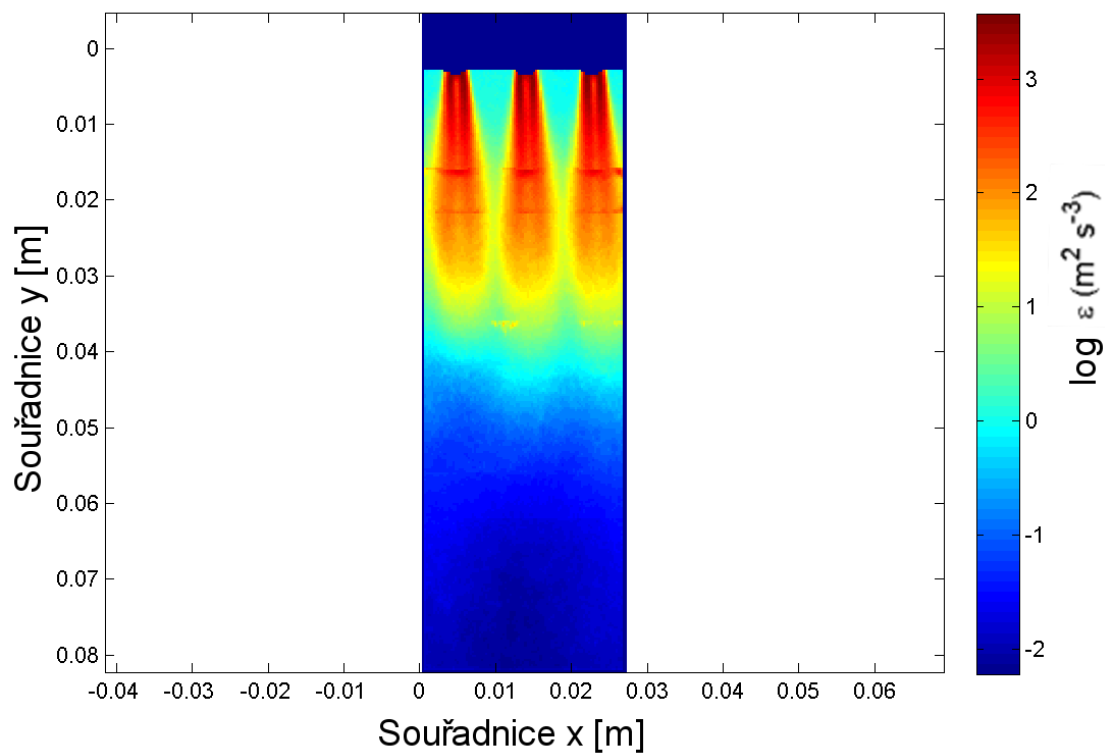
Obrázek 11: Rychlostní pole v rovině 250 při průtoku $Q_1 = 44 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$,
 $Q_2 = 80 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.



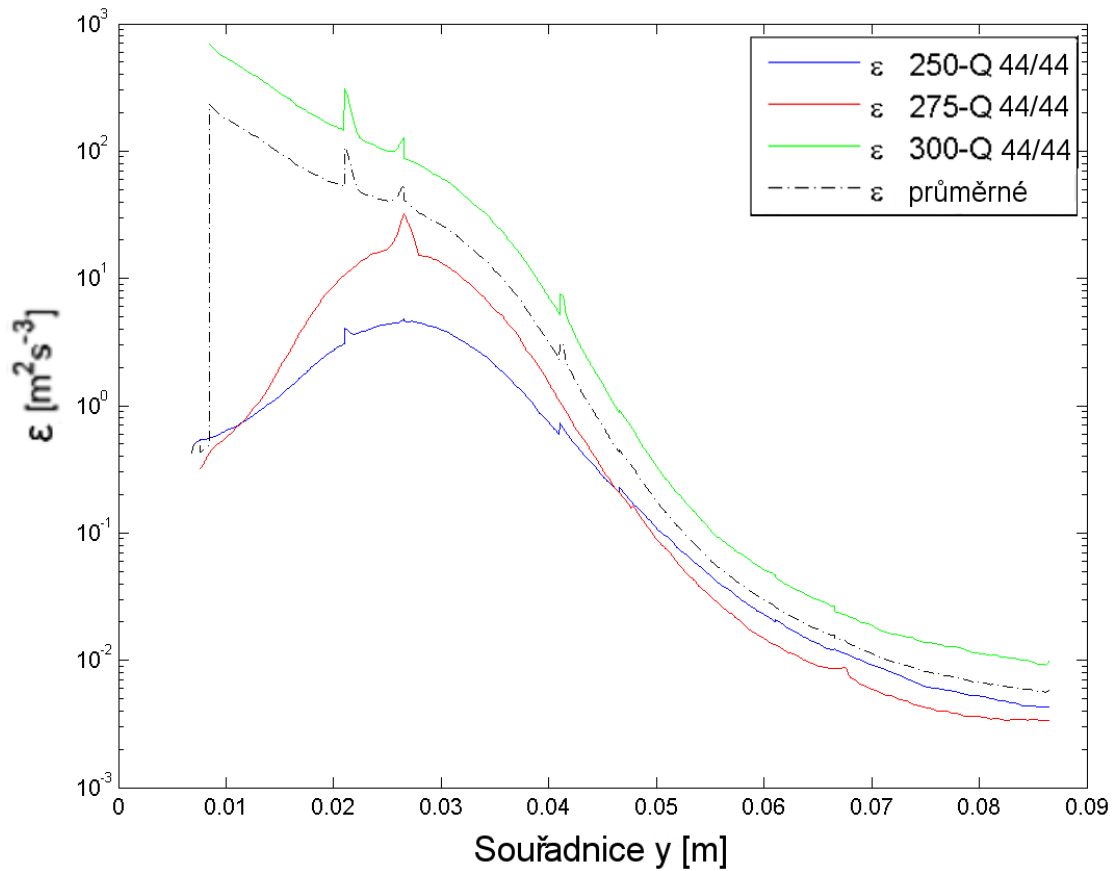
Obrázek 12: Rychlostní pole v rovině 275 při průtoku $Q_1 = 44 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$,
 $Q_2 = 80 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obrázek 13: Rychlostní pole v rovině 300 při průtoku $Q_1 = 44 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$,
 $Q_2 = 80 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.



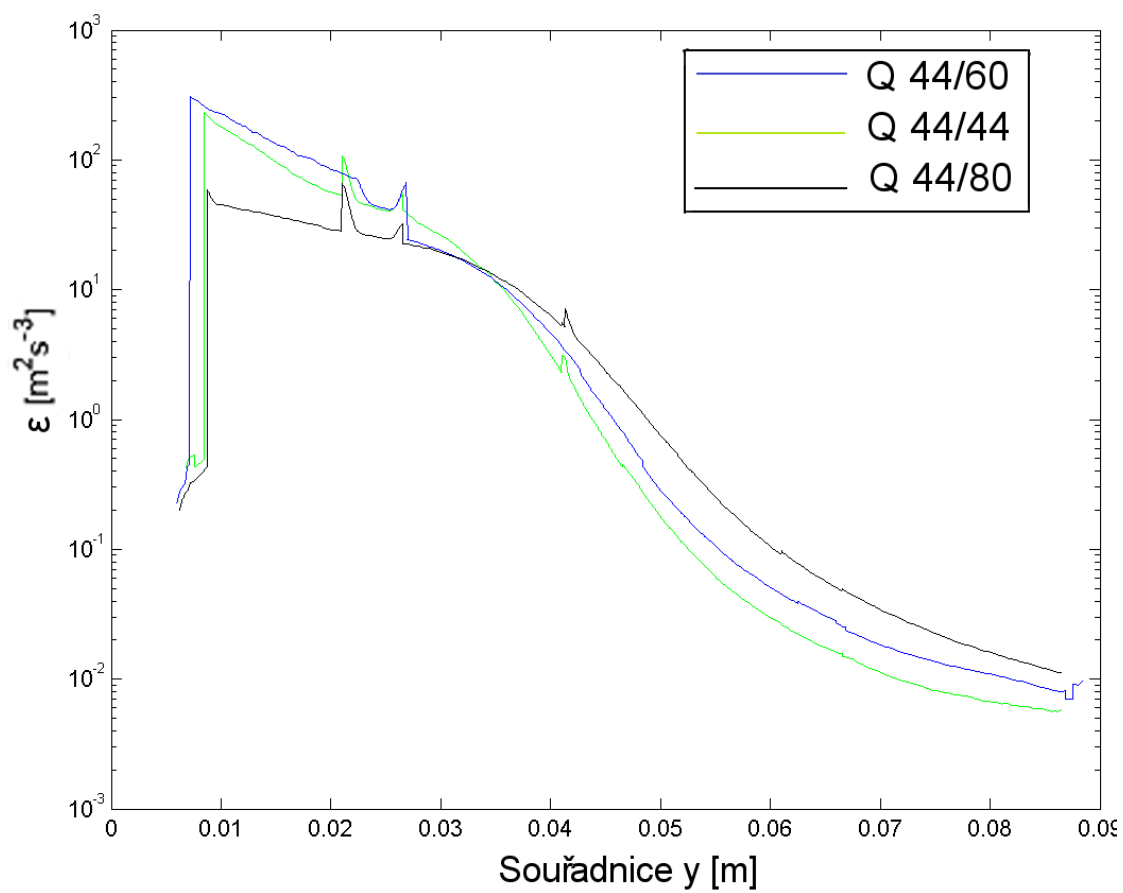
Obrázek 14: Graf rychlosti disipace kinetické energie ϵ vynesných v hodnotách $\log(\epsilon)$ v rovině 300 při průtoku $Q_1 = 44 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, $Q_2 = 44 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obrázek 15: Graf průměrování hodnoty ϵ pro roviny 250 (modrá), 275 (červená), 300 (zelená) pro průtok $Q_1 = 44 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, $Q_2 = 44 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

Tabulka 2: Vypočtené hodnoty energie dodané a disipované. Označeno podle čísla roviny v indexu.

| $Q_1/Q_2 \text{ [l} \cdot \text{min}^{-1}]$ | $\dot{E}_{in} \text{ [W]}$ | $\dot{E}_{dis.250} \text{ [W]}$ | $\dot{E}_{dis.275} \text{ [W]}$ |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 44 / 44 | 7.98 | 0.33 | 0.93 |
| 44 / 60 | 20.25 | 0.32 | 1.31 |
| 44 / 80 | 47.84 | 0.32 | 1.08 |
| $Q_1/Q_2 \text{ [l} \cdot \text{min}^{-1}]$ | $\dot{E}_{dis.300} \text{ [W]}$ | $\dot{E}_{dis} \text{ [W]}$ | $ \Delta \dot{E} \text{ [W]}$ |
| 44 / 44 | 21.17 | 7.48 | 0.50 |
| 44 / 60 | 30.60 | 10.74 | 9.51 |
| 44 / 80 | 8.65 | 3.35 | 44.49 |



Obrázek 16: Graf průměrných hodnot ϵ pro různé průtoky v závislosti na vertikální poloze v cele.

6 Hodnocení výsledků měření

Porovnání dodané energie a energie disipované, která byla měřena pro 3 roviny a 3 nastavení průtoků (tj. celkem 9 měření), je provedeno v Tabulce 2. Poslední sloupec označený \dot{E}_{dis} je průměr hodnot ze 3 naměřených rovin. Tento průměr by se poté měl blížit k hodnotě vypočítané z rychlosti v trysce. V posledním sloupci Tabulky 2 nalezneme absolutní hodnotu rozdílu disipované energie vypočtené pomocí LEPIV a energie dodané.

Cílem práce bylo určit rychlost disipace turbulentní kinetické energie v turbulentní cele. Bilancí kinetické energie a její disipace lze ověřit správnost měření. Kinetická energie byla do cely distribuována soustavou trysek (viz. obr. 8); většina této energie je disipována viskozitou vlivem turbulentního proudění. Z ϵ určeného pomocí metody LEPIV je možné podle vzorce

$$\dot{E} = \rho \iiint_V \epsilon dV \quad (17)$$

vyčíslit celkové množství disipované energie, které by se mělo blížit toku kinetické energie přinášené prouděním skrze trysky.

Tabulka 2 uvádí tok kinetické energie skrze trysky a dále disipovaný výkon naměřený v rovinách 250, 275 a 300; za celkový disipovaný výkon \dot{E}_{dis} je pak považována jejich průměrná hodnota. Při nahlédnutí do Tabulky 2 je patrné, že absolutní hodnota rozdílu dodané energie a energie disipované $\Delta\dot{E}$ je velká pro průtoky $Q_1/Q_2 = 44/60 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a $Q_1/Q_2 = 44/80 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Shodu v případě prvního průtoku $Q_1/Q_2 = 44/44 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ můžeme tedy považovat za téměř náhodnou.

Velkou odchylku měření pro průtoky $Q_1/Q_2 = 44/80 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ zřejmě mohl zapříčinit fakt, že roviny pro tento průtok byly snímány s nižší frekvencí snímků, než roviny předchozí z důvodu poruchy laseru, což mohlo mít za následek nižší prostorové rozlišení metody. Roviny pro průtoky $Q_1/Q_2 = 44/44 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a $Q_1/Q_2 = 44/60 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ byly snímány s frekvencí 10 kHz , roviny pro průtoky $Q_1/Q_2 = 44/80 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ pouze 8 kHz .

Měření v příspěvku [9], kde probíhalo podobné měření avšak na větších tryskách, tudíž rychlostní pole bylo vyrovnanější, dosahovalo lepších výsledků. Hodnoty ϵ v příspěvku [9] určené pomocí LEPIV byly vždy zhruba poloviční než hodnoty dodaného energetického toku, tento rozdíl bylo možné korigovat nastavením Smagorinského konstanty. Je tedy možné konstatovat, že výsledek měření neodpovídá skutečnosti a tato metoda odhadu ϵ není vhodná a je nutné použít pro odhad ϵ jinou metodu. Naměřené parametry proudu v cele - vektorové rychlostní pole, jsou však pravděpodobně použitelné i pro jiné metody odhadu ϵ a není tedy nutné provádět snímání znovu.

Závěr

Hlavním cílem práce bylo změřit - odhadnout rychlost disipace turbulentní kinetické energie v popsané aparatuře a posoudit, zda je odhad věrohodný, či ne. Z nasnímaných dat pomocí metody PIV byl odhad rychlosti disipace turbulentní kinetické energie proveden a pomocí energetické bilance bylo zjištěno, že metoda odhadu LEPIV není pro měření v této aparatuře vhodná. Nasbíraná data z PIV měření lze pravděpodobně využít i pro aplikaci další metody odhadu rychlosti disipace turbulentní kinetické energie, které byly uvedeny v kapitole 2.6.1 a tudíž není nutno zdlouhavé měření provádět znovu.

Při průběhu měření nebyly zjištěny žádné chyby ani nedostatky měření, které by mohly takto výrazně ovlivnit jeho správnost a jedná se tedy nejspíše o chybu pramenící ve výběru nevhodné metody. Pracovníky ÚCHP AVČR bude pravděpodobně proveden odhad jinou metodou a pomocí energetické bilance opět ověřena jeho správnost.

7 Použitá literatura

- [1] Adrian, R. J. a J. Westerwell. *Particle Image Velocimetry*. 1. vydání. New York: Cambridge University Press, 2012. 558 stran. ISBN 978-0-521-44008-0.
- [2] Davidson, P. A.. *Turbulence*. 2. vydání. New York: Oxford, 2006. 657 stran. ISBN 019852948-1.
- [3] Noskievič, J. a kol.. *Mechanika tekutin*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1987. 356 stran. ISBN 04-233-87.
- [4] Raffel, M., C. Willert, S. Wereley a J. Kompenhans. *Particle Image Velocimetry*. 2. vydání. New York: Springer, 2007. 438 stran. ISBN 978-3-540-72307-3.
- [5] White, F. M.. *Fluid Mechanics*. 6. vydání. New York: McGraw Hill, 2006. 864 stran. ISBN 978-0-07-128645-9.
- [6] Lasheras, J., C. Eastwood, C. Martinez-Bazan a J. L. Montanes (2002): *A Review of the Statistical Models for the Break-up of an Immiscible Fluid Immersed into a Fully Developed Turbulent Flow*. International Journal of Multiphase Flow, roč. 28, číslo 2, str. 247-278.
- [7] de Jong, J., L. Cao, S. H. Woodward, J. Salazar, L. Collins a H. Meng. *Dissipation Rate Estimation from PIV in Zero-mean Isotropic Turbulence*. Experiments in Fluids (2009), roč. 46, str. 499–515. Springer. New York.
- [8] Sheng, J., W. Meng a R. Fox. *Validation of CFD Simulations of a Stirred Tank Using Particle Image Velocity Data* (1998); Chemical engineering science, roč. 55, str. 4423-4434.
- [9] Vejražka, J., P. Stanovský a J. Tihon. *Break-up of Bubbles in a Turbulent Flow Generated by a Set of Nozzles*. 6th International workshop on Bubble and drop Interface, 2015. July 6-10, 2015, Potsdam/Gi olm, Germany.
- [10] Vejražka, J. (2013), PIVsuite. Počítačový program, dostupný na adrese: [www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45028 – pivsuite](http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45028-pivsuite). [3.8.2015]
- [11] webová stránka: www.mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_avdonly/aero/fprops/pipeflow/node8.html [8.9.2015]
- [12] webová stránka: www.giss.nasa.gov/research/briefs/canuto01/ [15.9.2015]
- [13] webová stránka: www.classes.yale.edu/fractals/Aut14/MultifracExs/Turb.html [22.9.2015]