



Diplomová práce

Experimentální metody pro měření parametrů turbulence

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Bc. Luboš Rampas

Vedoucí práce:

Ing. Jan Novosád, Ph.D.

Katedra energetických zařízení

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Experimentální metody pro měření parametrů turbulence

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Luboš Rampas
<i>Osobní číslo:</i>	S21000244
<i>Studijní program:</i>	N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra energetických zařízení
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

Předmětem práce je experimentální výzkum turbulentního proudění v potrubí. Cílem je ověření výsledků měření a vyhodnocení nízkofrekvenčním PIV systémem. Pro validaci bude provedeno komparativní měření metodou CTA s výrazně vyšší vzorkovací frekvencí.

Hlavní cíle práce jsou:

- Provedte teoretický rozbor řešeného problému.
- Navrhněte a sestavte experiment vhodný pro obě měřicí metody.
- Provedte měření oběma metodami.
- Zpracujte výsledky měření, vč. porovnání mezi metodami.
- Provedte diskuzi přínosů a limitů metody PIV s ohledem na získaná data.

Rozsah grafických prací: 5 s.
Rozsah pracovní zprávy: 50 s.
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

1. NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
2. URUBA, Václav. *Turbulence. 2.*, přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05600-4.
3. DAVIDSON, P. A. *Turbulence: an introduction for scientists and engineers*. Second edition. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press, 2015. ISBN 978-0-19-872259-5.
4. DOEBELIN, Ernest O. *Measurement systems: application and design*. Fourth edition. New York: McGraw-Hill Publishing Company, [1990]. McGraw-Hill international editions. Mechanical engineering series.
5. BRUUN, H.H. *Hot-wire anemometry: principles and signal analysis*. 2 ed. Oxford: Oxford University Press, 1995. ISBN 978-0-19-856342-6.
6. GREATER, Clive, John COSGROVE a James BUICK. *Optical Methods for Data Processing in Heat and Fluid Flow*. Bury St. Edmunds: Professional Engineering Publishing, 2002. ISBN 1-86058-281-8
7. Willert, C.E. a M. Gharib. Digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 10, s. 181-193. Springer, 1991. ISSN 0723-4864
8. RAFFEL, Markus. *Particle image velocimetry: a practical guide*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2007. ISBN 978-3-540-72307-3.
9. Manuály a výukové materiály LaVision. LaVision GmbH

Vedoucí práce: Ing. Jan Novosád, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce: 1. listopadu 2022
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování Ing. Janu Novosádovi, Ph. D za jeho cenné rady, doporučení a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Taktéž bych chtěl poděkovat Ing. Jaroslavu Pulcovi za vstřícnost, ochotu a pomoc při získání potřebných informací a podkladů.

Abstrakt

Tato práce se zaměřuje na experimentální výzkum turbulentního proudění v potrubí a představuje ověření relevance výsledků měření nízkofrekvenčním PIV (Particle Image Velocimetry) systémem. Pro validaci bude provedeno komparativní měření s využitím metody CTA (Constant Temperature Anemometry), která disponuje o několik řádů vyšší vzorkovací frekvencí. Hlavním cílem práce je provedení teoretického rozboru problému a návrh experimentu, který je vhodný pro obě měřicí metody. Následně jsou provedena měření pomocí PIV a CTA a získané výsledky jsou detailně zpracovány a porovnány. V diskuzi jsou analyzovány přínosy a limity metody PIV s ohledem na získaná data. Výsledky této práce budou přispívat k lepšímu porozumění turbulentního proudění v potrubí.

Klíčová slova

Turbulence, termoanemometrie, CTA, drátková sonda, PIV

Abstract

This thesis focuses on the experimental investigation of turbulent flow in pipelines and presents the verification of the relevance of the measurement results of the low-frequency PIV (Particle Image Velocimetry) system. For validation, a comparative measurement will be performed using the CTA (Constant Temperature Anemometry) method, which has several orders of magnitude higher sampling frequencies. The main goal of the work is to perform a theoretical analysis of the problem and design an experiment that is suitable for both measurement methods. Subsequently, measurements are performed using PIV and CTA, and the results are processed and compared in detail. In the discussion, the benefits and limits of the PIV method are analyzed with respect to the obtained data. The results of this work will contribute to a better understanding of turbulent flow in pipes.

Key words

Turbulence, termoanemometry, CTA, wire probe, PIV

Obsah

1	Úvod	11
2	Teoretická část.....	12
2.1	Turbulence.....	12
2.1.1	Turbulentní veličiny	13
2.1.2	Vznik turbulence	14
2.2	Metoda PIV	15
2.2.1	Snímací technika	16
2.2.2	Osvětlovací technika	17
2.2.3	Sycení	18
2.2.4	Záznam	19
2.2.5	Analýza snímků	20
2.3	Termoanemometrie	24
2.3.1	Drátková anemometrie	24
2.3.2	Princip	24
2.3.3	Anemometrické sondy.....	26
2.3.4	Kalibrace	27
3	Praktická část.....	29
3.1	Experimentální zařízení.....	30
3.2	Rozbor úlohy	30
3.3	Generace turbulence	31
3.3.1	Styčnickový plech	31
3.3.2	Mřížka	31
3.4	Experimentální měření	32
3.4.1	PIV.....	32
3.4.2	CTA.....	38
3.5	Zpracování naměřených dat	40
4	Výsledky.....	41
4.1	Pozice 100 mm – styčnickové plechy	41
4.2	Pozice 100 mm – mřížka	45

4.3	Pozice 160 mm – styčnickové plechy	49
4.4	Pozice 160 mm – mřížka	52
5	Diskuse	55
6	Závěr.....	56
	Seznam obrázků	57
	Bibliografie.....	59

Přehled vybraných veličin

L	m	charakteristická délka
u	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost
\bar{u}	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	střední rychlost
u'	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	fluktuace rychlosti
\bar{u}'	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	střední fluktuace rychlosti
ν	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	kinematická viskozita
I_u	%	intenzita turbulence
$\overrightarrow{D_{max}}$	m	vektor maximálního posunutí v obrazové rovině
Z	1	zvětšení
$\overrightarrow{v_{max}}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	vektor maximální rychlosti
N_{int}	1	strana vyhodnocovací oblasti
d_{pixel}	m	rozteč mezi sousedními pixely
Δt	s	časový interval mezi snímky
R	Ω	odpor
\dot{Q}	W	tepelný tok
S	m^2	teplosměnná plocha drátku
t_w	$^{\circ}\text{C}$	teplota povrchu drátku
t_{∞}	$^{\circ}\text{C}$	teplota proudícího média
Nu	1	Nusseltovo číslo
D	m	charakteristický rozměr
P	W	příkon
I	A	proud procházející drátkem
Re	1	Reynoldsovo číslo
d	m	charakteristický rozměr potrubí
M	m	vzdálenost mezi jednotlivými oky mřížky
L_u	m	vzdálenost měřícího prostoru od mřížky

Řecké symboly

α	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla
η	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	dynamická viskozita
λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota

Přehled zkratk

CTA	anemometrie za konstantního proudu (z AJ constant temperature anemometry)
CCA	anemometrie za konstantního proudu (z AJ constant current anemometry)
PIV	laserová anemometrie (z AJ particle image velocimetry)

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá experimentálním výzkumem turbulentního proudění v potrubí pomocí nízkofrekvenčního systému PIV (Particle Image Velocimetry). Cílem této práce je nejen provést samotné měření, ale také vyhodnotit získaná data porovnat je s výsledky metody CTA (Constant Temperature Anemometry), která pracuje s výrazně vyšší vzorkovací frekvencí.

Hlavní cíle této práce jsou:

- poskytnutí teoretického rozboru problému,
- návrh a sestavení vhodného experimentu pro obě měřicí metody,
- provedení měření pomocí obou metod,
- zpracování výsledků měření.

Zahrnuje také porovnání mezi metodami a diskusi o přínosech a limitech metody PIV s ohledem na získaná data.

Dalším krokem je návrh a sestavení experimentu, který je vhodný pro provedení obou měřících metod. Je třeba zajistit správné parametry proudění, vhodné umístění snímačů a optických systémů, a také zvolit vhodnou experimentální aparaturu.

Po provedení měření oběma metodami následuje jejich zpracování a vyhodnocení. Získaná data jsou analyzována a porovnána, aby bylo možné zhodnotit přesnost a spolehlivost PIV systému ve rovnání s metodou CTA. Jsou zkoumány jak kvantitativní, tak kvalitativní aspekty měření, jako je rychlost proudění, vektorové pole a charakteristika turbulence. Důkladné porovnání a hodnocení těchto výsledků přispívá k objektivnímu zhodnocení přínosů a limitů metody PIV v experimentálním výzkumu turbulentního proudění.

V závěrečné diskusi jsou prezentovány výsledky jejich interpretace. Jsou diskutovány přínosy a omezení metody PIV na základě získaných dat a provedeného porovnání s metodou CTA. Dále jsou navržena možná rozšíření a další směry výzkumu. Které mohou přispět k dalšímu zdokonalení a aplikaci metody PIV v experimentálním výzkumu turbulentního proudění.

Celkově má tato práce za cíl poskytnout ucelený pohled na problematiku turbulentního proudění v potrubí a přispět k lepšímu porozumění tohoto fenoménu. Zkoumání a porovnání metod PIV a CTA přinese nové poznatky o přesnosti a spolehlivosti nízkofrekvenčního PIV a jeho využití v experimentálním prostředí. Výsledky a diskuse budou sloužit jako základ pro budoucí výzkum a zdokonalení měřících metod v oblasti turbulentního proudění.

2 Teoretická část

Následující část práce bude věnována základním informacím o turbulentním proudění. V další části budou popsány metody CTA a PIV.

2.1 Turbulence

Turbulence je náhodný, neuspořádaný pohyb částic tekutiny. Turbulentní proudění se tedy skládá z vírů různých velikostí. Velké víry obsahují většinu energie ve formě energie kinetické. Víry se dále rozpadají na menší. Rozpad vírů je ukončen disipací energie nejmenších vírů v teplo. Víry lze charakterizovat makroměřítky [1, 2]:

- charakteristickou délkou L (m)
- rychlostním měřítkem u ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- molekulárními vlastnostmi
- kinematickou viskozitou ν ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Samotná definice turbulence je velice komplexní problém. Lze říci, že turbulentní proudění je nepravidelné v čase i prostoru. Reynoldsovo číslo definuje tato rovnice:

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot u}{\eta}, \quad (2.1)$$

kde Re (1) je Reynoldsovo číslo, ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) hustota, d (m) charakteristický rozměr, u ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) rychlost, η ($\text{Pa} \cdot \text{s}$). Při vyšších Reynoldsových číslech částice tekutiny konají neuspořádaný pohyb různými směry.

Následkem míchání tekutiny dochází ke snížení rozdílů mezi rychlostmi v různých místech průřezu. Tyto rozdíly jsou menší než v případě laminárního proudění. Pouze v oblasti v blízkosti stěny je turbulentní složka rychlosti utlumena a tekutina se pohybuje tak pomalu, že má charakter laminárního proudění. Vírové struktury, které jsou součástí turbulentního proudění, mohou mít rovinný i prostorový charakter. V následujících odstavcích budou popsány vlastnosti, které jsou jedny z hlavních parametrů turbulentního proudění [1]

Disipace energie

V turbulentním proudění vznikají prostorové struktury, tzv. turbulentní víry různých velikostí. Velké víry se postupně rozpadají na menší. Při turbulentním proudění je kinetická energie v malých vírech přeměňována na teplo. Z tohoto důvodu je třeba pro dlouhodobé zachování turbulence dodávat energii z vnějšku. Samotné velké víry mají omezenou životnost. Vznikají na základě vysokého rychlostního gradientu. Je vysoce nepravděpodobné, aby docházelo ke spojování menších vírů do stále větších vírů i přes náhodný charakter turbulentního proudění. Celý proces rozpadu vírů je ukončen přeměnou energie na teplo [3].

Vířivost

Turbulentní proudění zahrnuje víry, které mají rotační složku rychlosti. Na základě matematické definice je vířivost definována jako rotace vektoru rychlosti proudového pole se současným zachováním hybnosti. Na základě této definice je zřejmé, že vířivost může energii pouze disipovat. Narůstat může pouze s energií přidanou zvenčí. Turbulentní proudění obsahuje velké množství rotujících vírů [4].

Náhodnost

Turbulentní proudění je nepředvídatelný proces. Malé náhodné poruchy se v počátečním čase zesilují do takového stupně, že po určité době nelze jejich další vývoj předpovědět [2].

Nelinearita

Turbulentní proudění je nelineární svou podstatou, kdy při vzniku turbulence dochází k nárůstu poruch. Vývoj vírových struktur lze popsat pouze nelineárním matematickým modelem. Lineární modely dostatečně nepopisují klíčové vlastnosti turbulence [2].

2.1.1 Turbulentní veličiny

Intenzita turbulence

Intenzita turbulence je měřítkem míry kolísání rychlosti a směru proudění tekutiny. Vyjadřuje úroveň nepředvídatelných a chaotických pohybů ve fluidním prostředí. Vyšší intenzita turbulence je spojena s většími fluktuacemi rychlosti a změnami směru proudění, zatímco nižší intenzita indikuje stabilnější proudění s menším kolísáním. Intenzita turbulence je stupnice charakterizující turbulenci vyjádřenou v procentech. Idealizované proudění tekutiny s absolutně žádnými výkyvy rychlosti nebo směru vzduchu by mělo hodnotu intenzity turbulence 0 %. Obecně se idealizované stavy v reálném světě nevyskytují [2].

Střední rychlost

$$\bar{u} = \int_t^{t+T} u(t) dt = \frac{1}{N} \sum_1^N u_i \quad (2.2)$$

Fluktuace rychlosti

$$u'(t) = u(t) - \bar{u} \quad (2.3)$$

Intenzita turbulence

$$Iu = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{u}} \quad (2.4)$$

Turbulentní kinetické energie κ

Turbulentní kinetická energie je fyzikální veličina, která vyjadřuje množství energie spojené s fluktuacemi rychlosti proudění v turbulentním toku. Kinetická energie turbulence je určována prostřednictvím střední hodnoty kinetické energie fluktuací rychlosti. Fluktuace rychlosti jsou odchylky od průměrné hodnoty rychlosti v jednotlivých bodech nebo časech. Tyto fluktuace mají svou vlastní kinetickou energii, která je přítomna ve formě pohybové energie částic tekutiny. Při analýze kinetické energie turbulentního proudu se často používá střední kvadratická odchylka fluktuací rychlosti. Tato hodnota udává míru rozptylu fluktuací rychlosti od průměrné hodnoty. Čím vyšší hodnota fluktuací, tím větší je kinetická energie turbulence [1].

Rozptyl rychlostí

$$Var(u) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2 \quad (2.5)$$

Turbulentní kinetická energie

$$\varepsilon = \frac{Var(u)}{2} \quad (2.6)$$

Rychlost disipace ε

Rychlost disipace je důležitým parametrem turbulentního proudění, který odráží proces přeměny kinetické energie na teplo v tekutině. Rychlost disipace je definována jako rychlost změny kinetické energie turbulence na jednotku objemu tekutiny. Vyšší hodnoty rychlosti disipace naznačují, že energie turbulence se rychleji transformuje na tepelnou energii. Tento proces disipace je způsoben vzájemným působením vnitřních třecích sil a turbulentních fluktuací, které postupně rozptylují energii a zpomalují proudění tekutiny [1].

2.1.2 Vznik turbulence

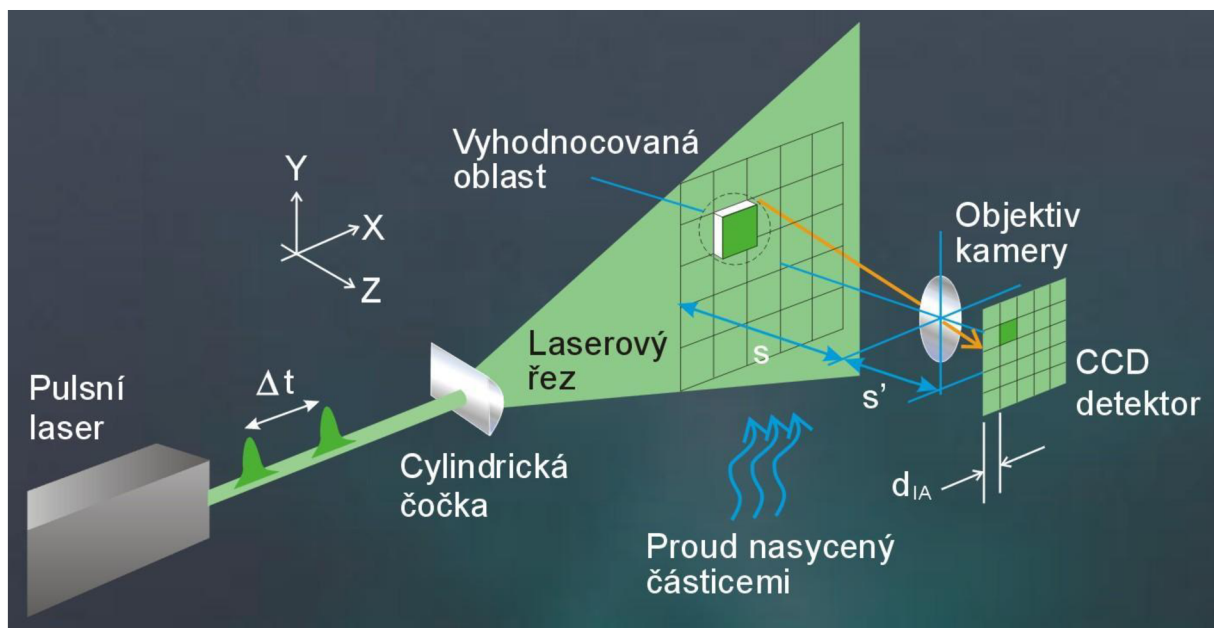
V následujících odstavcích bude popsán přechod laminárního proudění v turbulentní. Následně budou popsány příklady vzniku turbulentního proudění, se kterými se lze v technické praxi nejčastěji setkat.

Přechod z laminárního na turbulentní proudění

Přechod z laminárního proudění do turbulence nastává v případě, kdy je překročena určitá rychlost, tzv. kritická, a poměr třecích a setrvačných sil dosáhne kritické hodnoty. Při ztrátě stability laminárního proudění dochází ke vzniku pravidelných vírových struktur, které dále narůstají. Tento proces nejdříve probíhá lineárně, později se stává nelineárním. Ve zkoumané oblasti dochází ke vzájemným interakcím vírových struktur [2].

2.2 Metoda PIV

Particle Image Velocimetry (PIV) je optická měřicí metoda určená pro měření rychlostního pole. Základním principem této metody je změření posunutí částic unášených proudícím médiem a následné vyhodnocení tohoto posunu. Tyto částice, nazývané trasovací, sytící nebo stopovací, jsou přidány do proudící tekutiny. Volba stopovacích částic závisí na povaze měřeného proudění a jejich schopnosti sledovat tok a dobře odrážet světlo. Pro osvětlení se využívá laserového paprsku, který je optickou soustavou zaměřen na požadovanou oblast. Pomocí optických čoček se laserový paprsek rozšiřuje do podoby laserového řezu (pro 2 D PIV nebo stereo PIV) nebo objemu (pro 3D PIV). Osvětlení laserem je pulzní, ne kontinuální. Pro správné měření pomocí metody PIV je klíčový stroboskopický efekt, který "zmrazí" pohyb stopovacích částic v daném časovém okamžiku [6, 7].



Obr 1 Princip metody PIV (upraveno) [8].

2.2.1 Snímací technika

Pro nalezení osvětlených částic se využívá CCD kamera (Charge Coupled Device), která je umístěna v pravém úhlu vzhledem k laserovému řezu a měřené oblasti. Tento přístup se uplatňuje při 2D měření, které je součástí praktické části diplomové práce. Na snímcích jsou osvětlené částice zachyceny jako jasné body na tmavém pozadí. Laser a kamera v této práci jsou synchronizovány tak, že první snímek zachycuje částice během prvního laserového pulzu a druhý snímek během druhého pulzu. Tento způsob záznamu je novější. Pro měření dvou složek rychlosti se používá základní konfigurace s CCD kamerou umístěnou kolmo k laserovému paprsku, který je rozšířený cylindrickou čočkou.

Pro měření tří složek rychlosti se používají dvě kamery, které jsou umístěny pod úhlem 30-60 stupňů vůči laserovému paprsku ve stereoskopickém uspořádání. Tímto způsobem lze vypočítat všechny tři složky rychlosti, přičemž ve třetím rozměru je možné získat pouze přesnější informace o částicích, které se pohybují mimo rovinu zkoumaného objektu. Tento princip je podobný funkci lidského oka.

Snímky z kamer jsou rozděleny do jednotlivých vyhodnocovacích oblastí. Pro každou z těchto oblastí se provádí korelace, čímž se získá průměrný vektor posunu pro danou oblast. Poté se vypočítá průměr vektorů pro každou oblast, čímž se získá jeden vektor rychlosti. Pro výpočet rychlosti se velikost vektoru dělí známým časovým rozdílem mezi dvěma snímky. K urychlení výpočtu se využívá Rychlá Fourierova transformace. Výsledkem je hrubá vektorová mapa, která obsahuje nezpracované informace. Při tomto procesu jsou vyhodnoceny výsledky z každé zkoumané oblasti, přičemž některé oblasti mohou být nízké kvality. Proto je nezbytné použít kontrolní postupy k identifikaci chybných vektorů. Na základě toho je vytvořena finální vektorová mapa [3, 5, 7].



Obr 2 Kamera.

2.2.2 Osvětlovací technika

Klíčovým prvkem osvětlovací techniky PIV je vysoce výkonný světelný zdroj, který se používá k osvětlení částic přítomných v proudícím médiu. Nejčastěji se používá výkonný pulzní laser, který generuje krátké světelné impulsy. Na základě těchto impulzů je vytvořen tenký laserový řez. Světlo, které je rozptýleno na sytících částicích rozptýleno, reprezentuje vstupní signál, který je zaznamenáván. Z tohoto důvodu musí osvětlovací technika dodržovat základní kritéria.

Osvětlení musí poskytovat dostatečnou intenzitu světla, aby bylo možné správně detekovat a zaznamenat částice v tekutině. Příliš slabé osvětlení může vést k nedostatečnému kontrastu a sníženému rozlišení obrazových snímků. Osvětlení by mělo generovat krátké světelné impulsy, aby nedošlo k velkému posunu stopovací částice. V případě velkého posunu může dojít až ke ztrátě páru, viz kapitola Chybné korelace. Ideální interval je takový, při kterém urazí částice maximálně čtvrtinu délky vyhodnocovací oblasti.

Parametry osvětlení, jako je intenzita, doba expozice a frekvence pulzů, by měly být konzistentní a opakovatelné. To zajišťuje konzistenci a spolehlivost výsledků při opakovaném měření. Ideální interval je takový, při kterém je maximální posunutí částice ve vyhodnocovací oblasti menší než jedna čtvrtina její délky.[12]

Pro vytváření laserového řezu je nejčastěji používán Nd: YAG laser (Neodimium Doped Yttrium Aluminium Garnet). Jedná se o laser zelené barvy o vlnové délce 532 nm [13].

2.2.3 Sycení

Sycení představuje klíčový krok při použití metody PIV. Při měření metodou PIV je do vzduchu vstřikován jemný aerosol. Tento aerosol je vytvářen generátorem, do kterého je nalita speciální tekutina, například komerční HFBS a DEHS od firmy LaVision. V případech, kdy je lepší použít přírodní látky, které jsou volně dostupné prostředky, jako je například olivový olej. V některých případech obsahuje samotné proudící médium dostatečné množství nečistot, takže nevyžaduje sycení.[12]

Stopovací částice

V případě metody PIV není měření samostatné proudění média, ale rychlost částic unášených v proudu tekutiny. Tyto částice slouží k vizualizaci a sledování proudění tekutin a umožňují získávání důležitých informací o rychlosti a směru toku.

Stopovací částice se volí s ohledem na specifika měřeného systému a požadavky experimentu. Ideální stopovací částice musí splňovat několik důležitých vlastností, aby bylo možné provést přesné a spolehlivé měření.

Stopovací částice by měly mít malou velikost, typicky v rozmezí desetin až desítek mikrometrů, aby byly dostatečně citlivé na pohyb v proudící tekutině. Částice by dále měly mít odlišný index lomu než médium, ve kterém jsou umístěny. To umožňuje snadné rozpoznání částic v obrazec. Dalšími vlastnostmi

Pokud při provádění měření můžeme zanedbat vnější síly, jako je gravitace, odstředivá síla nebo elektrostatické síly, schopnost částice sledovat proudění je ovlivněna především tvarem, velikostí, hustotou částic a viskozitou měřené kapaliny. Při výběru částic pro vhodné sledování proudění je preferován sférický tvar částic, protože tvar částice ovlivňuje odpor v proudící tekutině. Vzhledem k tomu že je prakticky nemožné dosáhnout dokonale sférického tvaru, často se pracuje s nepravidelnými částicemi, jako se sférickým tvarem. Toto zanedbání má minimální vliv na kvalitu získaných dat. Při volbě částic je důležité zvolit vhodné parametry. Větší částice mají tendenci lépe odrazit laserové světlo a být snadněji zaznamatelné, avšak s větším rozměrem částic se snižuje jejich schopnost sledovat proudění. Z tohoto důvodu je nutné najít vhodný kompromis. Je třeba zdůraznit, že přestože tvar, velikost a hustota částic hrají důležitou roli při sledování proudění, vhodná volba stopovacích částic v konečném důsledku ovlivňuje kvalitu získaných dat jen částečně. Přesné a spolehlivé měření rychlosti a směru proudění je zajištěno kombinací správné volby částic, optimalizací osvětlení a vhodného zpracování obrazových dat. [14, 15]

Maximální posunutí částic

Maximální posunutí částic v libovolném směru by nemělo být větší než polovina vyhodnocovací oblasti. Tato hodnota je pouze teoretická. Pro praktické použití je doporučeno nepřekračovat maximální posunutí D_{max} větší, než je jedna čtvrtina vyhodnocovací oblasti:

$$|D_{max}| = |v_{max}| \Delta t \cdot Z \leq \frac{d_1}{4} = \frac{N_{int} \cdot d_{pixel}}{4}, \quad (2.7)$$

kde Z (-) je zvětšení, v_{max} ($m \cdot s^{-1}$) vektor maximální rychlosti, d_1 (m) strana vyhodnocovací oblasti, N_{int} strana vyhodnocovací oblasti v pixelech, d_{pixel} (px) rozteč mezi sousedními pixely, Δt (s) časový interval mezi prvním a druhým snímkem [12].

2.2.4 Záznam

Po průchodu laserového paprsku optickým systémem, například válcovou optikou, je paprsek transformován do specifického tvaru nazývaného laserový řez. Laserový řez musí mít dostatečnou intenzitu, aby došlo k optimální expozici obrazu, avšak zároveň musí být dostatečně krátký, aby bylo možné přesně zachytit okamžitou polohu stopovacích částic. Tyto částice, unášené proudem tekutiny, potom odrážejí světlo, které je zachycováno kamerou.

Měření pomocí techniky PIV probíhá na základě posunutí částic mezi dvěma po sobě jdoucími snímky, které jsou pořízeny v určitém časovém intervalu. Pro dosažení přesných výsledků je třeba vytvořit více dvojic těchto snímků. První snímek zachycuje výchozí polohu částic, zatímco druhý snímek zobrazuje konečnou polohu.

Existují dva základní přístupy k vytvoření snímků pro další zpracování v rámci PIV. Prvním přístupem je technika dvojité expozice, při které jsou oba snímky pořízeny a zaznamenány v rámci jednoho výsledného obrazu. Druhým přístupem je technika jednotlivé expozice, při které jsou dva snímky pořízeny odděleně s definovaným časovým odstupem, a na každém snímku je zachycena výchozí nebo konečná poloha stopovacích částic.

Zvolený způsob závisí na konkrétních požadavcích měření a vlastnostech systému. Obě metody mají své výhody a omezení, a je třeba pečlivě vybrat ten nejvhodnější přístup, který zaručí správné zachycení a analýzu pohybu částic v tekutině během experimentu [8, 17, 18].

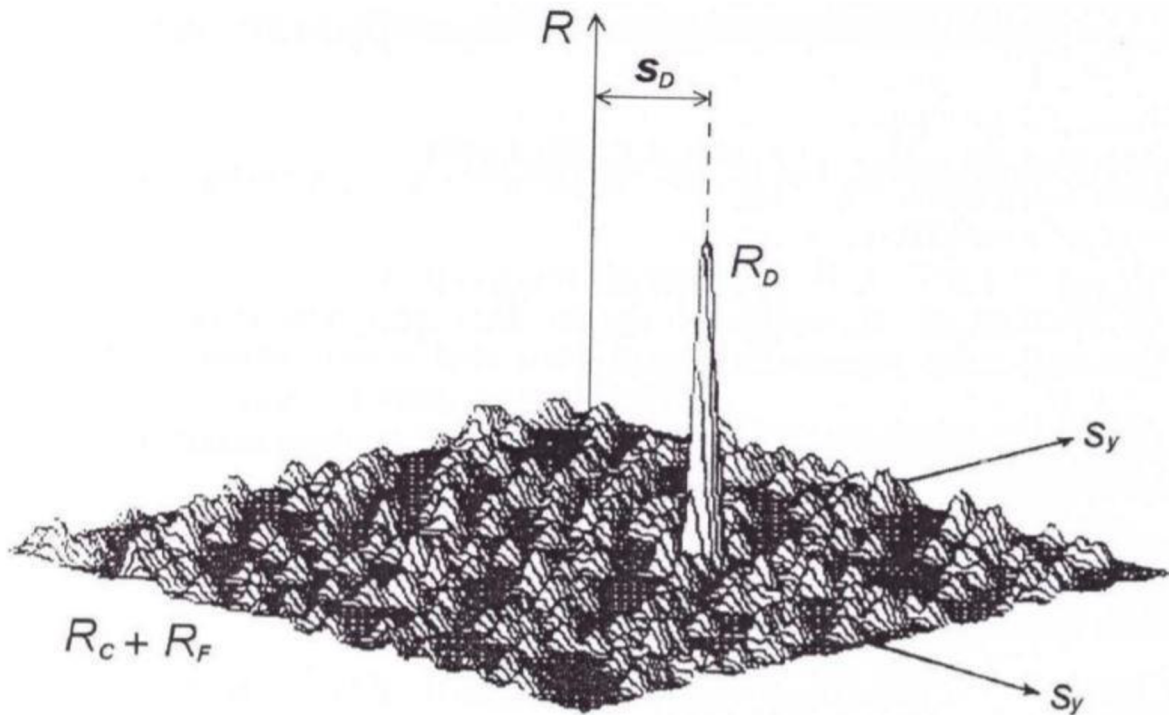
2.2.5 Analýza snímků

Proces zpracování vektorové mapy získané z CCD kamery je prováděn pomocí techniky korelace. Obraz z kamery je rozdělen na několik vyhodnocovacích oblastí a v každé z těchto oblastí jsou první a druhý snímek vzájemně korelovány, což vytváří vektor průměrného posunutí. Tento postup umožňuje získat informace o rychlosti a směru pohybu stopovacích částic. Jednou z výhod této metody je, že nevyžaduje sledování jednotlivých částic, ale je důležité zajistit dostatečný počet stopovacích částic pro spolehlivé výsledky.

Existují dvě hlavní metody korelace, které se používají při zpracování vektorové mapy z CCD kamery. První z nich je autokorelace, druhou metodou je vzájemná korelace. Obecně platí, že vzájemná korelace poskytuje lepší výsledky než autokorelace, a proto se častěji používá. V následujících odstavcích bude podrobněji popsána každá z těchto metod korelace a také budou zmíněny možné chyby, které se mohou vyskytnout při jejich použití. [8, 12]

Vzájemná korelace

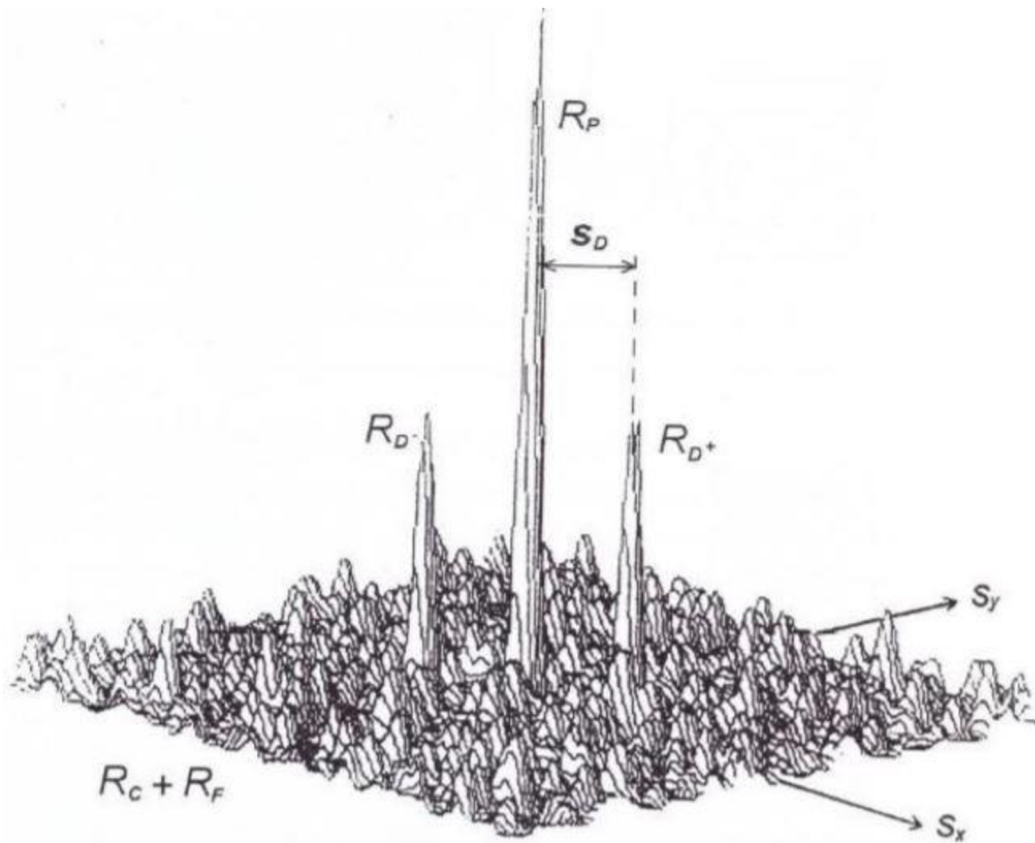
Při použití metody vzájemné korelace je v korelační rovině vytvořen pouze jediný hlavní vrchol R_D . Směr a velikost posunutí částic je dána spojnicí vrcholu R_D a středu korelační roviny. [8, 12]



Obr 3 Výsledky analýzy PIV metodou vzájemné korelace [17].

Autokorelace

Výsledek analýzy PIV snímků pomocí autokorelace přináší dva vrcholy R_{D+} a R_{D-} , které jsou symetricky umístěny vůči hlavnímu vrcholu R_P . Vzdálenost mezi hlavním vrcholem a jedním z vedlejších vrcholů poskytuje informaci o velikosti posunu částic ve zkoumané oblasti. Avšak, při pokusu o určení směru pohybu částic nastává problém. Protože výsledná analýza autokorelace vykazuje přítomnost dvou vedlejších vrcholů, není možné jednoznačně stanovit směr proudění [8, 12].

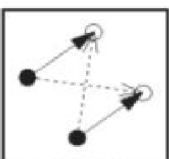
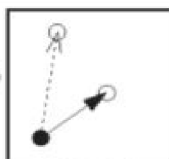
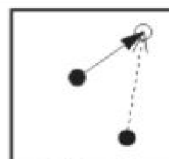
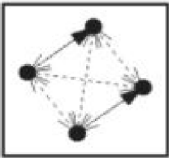
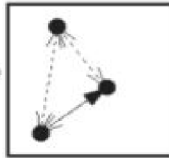
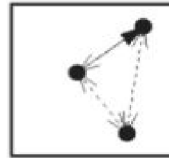


Obr 4 Výsledky analýzy PIV metodou autokorelace [17].

Chybné korelace

Při využití automatické nebo vzájemné korelace může nastat situace, kdy dochází k náhodným korelacím mezi počátečními a konečnými polohami různých částic. Tento jev je známý jako šum a může ovlivnit přesnost výsledků měření. Aby se minimalizoval vliv šumu a zajistila přesnější interpretace, je důležité pracovat s dostatečným počtem částic v každé vyhodnocovací oblasti.

Následující sada ilustrací ukazuje příklady dvou částic, které se pohybují v čase. První skupina obrázků zobrazuje metodu, kde jsou počáteční a konečné polohy částic zaznamenány na oddělených snímcích, což umožňuje jednoznačné určení obou poloh. Druhá skupina obrázků ilustruje situaci, kdy jsou počáteční a konečné polohy zachyceny na jednom snímku, což vytváří nejistotu ohledně toho, která poloha je počáteční a která konečná. Tyto příklady ukazují různé konfigurace částic, přičemž v některých případech se částice nacházejí i mimo vyhodnocovací oblast. [8]

	Výchozí i konečná pozice uvnitř vyhodnocovací oblasti	Jedna výchozí pozice mimo vyhodnocovací oblast	Jedna konečná pozice mimo vyhodnocovací oblast
Dva jednotlivé snímky: Vzájemná korelace	 S/N=2/1	 S/N=1/1	 S/N=1/1
Dvojnásobná expozice: Auto-korelace	 S/N=2/2	 S/N=1/1	 S/N=1/1

Obrázek 8 Chybné korelace (upraveno) [8].

V levém horním rohu ilustrací jsou zobrazeny dva správné vektory posunutí a dva nesprávné. V ideálním případě by bylo možné s použitím pouze dvou částic ve vyhodnocovací oblasti správně určit vektor rychlosti. Nicméně další snímky naznačují, že v praxi je obtížné použít pouze dvě částice na snímek. Čtyři následující snímky ukazují chybu nazývanou "ztráta páru". Tato chyba často nastává při pohybu částic s vysokou rychlostí nebo blízko hranic vyhodnocovací oblasti. V důsledku této chyby je ve vyhodnocovací oblasti vypočtena nižší průměrná rychlost posunutí, než je skutečná. Ve všech těchto příkladech je správný vektor posunutí stejně pravděpodobný jako ostatní možné vektory, a proto nelze jednoznačně určit, který je ten správný. Příklad vlevo dole ukazuje situaci, kdy jsou počáteční polohy obou částic zachyceny na jednom společném snímku. V tomto případě vzniká mnoho korelací mezi počátečními a konečnými polohami různých částic, stejně jako mezi dvěma počátečními polohami a dvěma konečnými polohami. Opět není možné jednoznačně určit správnou korelaci [8].

Ztracené páry

Ztracené páry představují častou systematickou chybu při vyhodnocování metody PIV. Tato chyba se objevuje, když částice v intervalu mezi dvěma snímky opustí nebo vstoupí do vyhodnocovací. Výsledkem je neschopnost nalézt původní polohu částice pro párování a vznikají nesprávné korelace. Nejvíce ztracených párů se obvykle vyskytuje při vysokých rychlostech [18].

2.3 Termoanemometrie

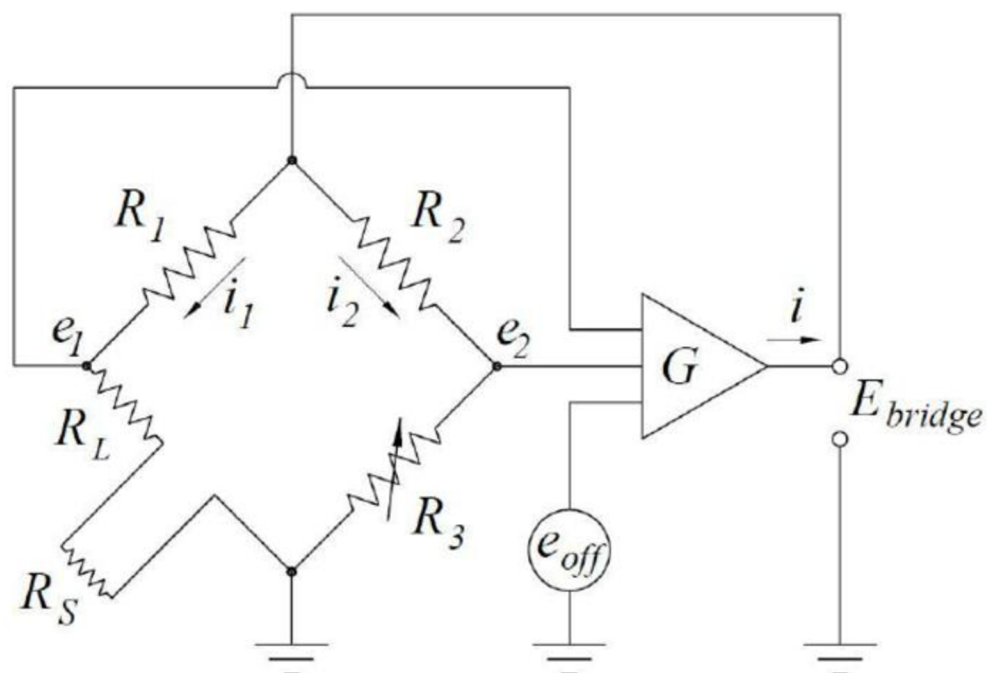
Termoanemometrie je metoda měření rychlosti tekutin založená na principu konvektivního přenosu tepla z ohřívaného čidla, jako je žhavený drátek (hot wire anemometry), nebo film (hot film anemometry), do proudící tekutiny. Přenos tepla z čidla konvekcí závisí především na rychlosti tekutiny [3], ale také na fyzikálních vlastnostech tekutiny, jako je viskozita, tepelná vodivost a teplota. Tyto vlivy jsou zohledněny pomocí kalibrace a teplotní korekce. Existují dva základní přístupy: buď se udržuje konstantní napětí na čidle a měří se změna odporu s teplotou (constant current anemometry, CCA), nebo se udržuje konstantní teplota čidla a měří se napětí (constant temperature anemometry, CTA). Tímto způsobem termoanemometrie umožňuje přesné a citlivé měření rychlosti proudění tekutin. Jedná se o techniku určenou k měření proudění v 1D, 2D a 3D pomocí sond vložených do proudící tekutiny. Metoda CTA je vhodná pro měření proudění s velmi vysokou rychlostí fluktuací a pro měření mikrostruktur [19].

2.3.1 Drátková anemometrie

Princip této metody je založen na ochlazování rozžhaveného drátkového senzoru, případně filmové sondy proudící tekutinou. Sonda v zjednodušeném principu funguje jako převodník odvedeného tepla na odpor. Průchodem elektrického proudu skrze sondu je generována konstantní tepla, respektive odpor, který se mění na základě rychlosti proudící tekutiny. Aby bylo dosaženo konstantního odporu žhaveného drátku, musí se změnit přiváděný proud [20, 21].

2.3.2 Princip

Měřicí sonda je umístěna v jedné straně Wheatstonova můstku, na druhé straně je umístěn proměnný odpor, který určuje provozní odpor. Pokud se rychlost proudění zvýší, bude odpor drátu klesat a na vstupu proudového zesilovače se bude nacházet chybové napětí. To způsobí zvětšení proudu protékajícího sondou, a tedy i zvětšování odporu drátu, dokud nebude dosaženo rovnováhy [22].



Obr 5 Wheatstonův můstek.

Obvod je tvořen dvěma odpory se známými hodnotami R_1 a R_2 a proměnným rezistorem R_3 . Měřicí sonda nahrazuje odpor R_w , se neznámou hodnotou. Můstek je vyvážený v případě, kdy platí $R_1/R_w = R_2/R_3$. Obvod pracuje následovně: Když je teplota a odpor na základní hodnotě, dochází k nastavení hodnoty proměnného odporu R_3 , tak aby byl můstek vyvážený. V případě, že se rychlost proudění zvýší, případně poklesne, dochází ke změně teploty a také odporu drátku. Tímto dojde ke ztrátě stability můstku, mezi body 1 a 2 dojde ke změně napětí, která je zaznamenaná ampérmetrem. Následně je upravena hodnota elektrického proudu tak, aby došlo vyvážení můstku, a tedy i k ustálení teploty a odporu drátku na výchozí hodnotě. Tyto změny proudu nutné k zachování stability jsou zaznamenávány a přepočítávány na rychlost proudění [23].

Teplu přenesené mezi povrchem drátku a proudícím médiem popisuje Newtonův ochlazovací zákon:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (t_w \cdot t_\infty) \quad (2.8)$$

, kde \dot{Q} (W) je tepelný tok, S (m²) teplosměnná plocha žhaveného drátku, α (W·m⁻²·K⁻¹), t_w (°C) teplota povrchu drátku, t_∞ (°C) teplota proudící látky.

Pro definici konduktivního a konvektivního přenosu je použito Nusseltova čísla:

(2.6)

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} \quad (2.9)$$

, kde Nu (-) je Nusseltovo číslo, D (m) charakteristický rozměr (v tomto případě průměr drátku sondy), λ (W·m⁻¹·K⁻¹).

Dále následuje vztah pro příkon, který způsobuje ohřev drátku:

$$P = R \cdot I^2 \quad (2.10)$$

, kde P (W) je výkon, R (Ω) odpor drátku, I (A) proud procházející drátkem.

Po následném dosazení do rovnice (2.8) získáme rovnici, která definuje základní princip termoanemometrie:

$$R \cdot I^2 = \frac{\lambda \cdot Nu}{D} \cdot S \cdot (t_w \cdot t_\infty) \quad (2.11)$$

2.3.3 Anemometrické sondy

Pro měření metodou CTA se obvykle využívají následující typy senzorů: miniaturní sonda, zlacená sonda, vláknová filmová sonda a filmová sonda.

Drátky z wolframu drátkových sond mají obvykle v průměru 5 μ m a délku přibližně 1,2 mm a jsou bodově přivařeny mezi hroty z nerezové oceli, které jsou kryty keramickým povrchem. Pozlacené sondy mají mezi hroty také umístěný drát, jehož konce jsou pokoveny zlatem a mědí, aby byl co nejvíce odstraněn vliv hrotů.[20]

Drátkové sondy

Drátkové sondy se nejčastěji používají u turbulentního proudění vzduchu. Tyto sondy mají nejvyšší frekvenční odezvu. Tyto sondy jsou citlivé na malé změny rychlosti proudění a poskytují vysokou přesnost měření. Jsou také odolné vůči prachovým částicím a minimalizují riziko kontaminace měřeného prostředí. Navíc umožňují rychlé a spolehlivé měření rychlosti proudění ve širokém rozsahu aplikací [4, 6].

Filmové sondy

Filmové senzory jsou pokryty tenkou vrstvou niklu. Tenké filmové sondy se používají pro aplikaci ve vzduchu. Frekvenční odezva je menší než u sond drátkových. Dále jsou tyto sondy odolnější než sondy drátkové a lze je použít například i ve znečištěném prostředí [4].

2.3.4 Kalibrace

V měřicím modulu CTA anemometru se vyhodnocují změny napětí (nebo odporu) a tyto změny se přeměňují na rychlost pomocí předchozí kalibrace. Kalibrace musí být provedena před každým měřením a často také během série měření. K provedení kalibrace se používá kalibrační soustava, která zahrnuje kalibrátor s otočným držákem, mikroanemometr a regulovatelný přívod vzduchu. Rychlostní kalibrace a směrová kalibrace (pouze u vícedrátkových sond) jsou nezbytné [4].



Obr 6 Kalibrátor sondy CTA.

Rychlostní kalibrace

Rychlostní kalibrace se provádí tak, že je měřicí sonda postupně vystavena známým rychlostem (například ve větrných tunelech nebo ve speciálních kalibračních zařízeních) a následně se u každé rychlosti zaznamenává hodnota napětí. Získané body jsou dále proloženy křivkou, která představuje přenosovou funkci, z níž se dále převádí hodnoty napětí na rychlost. Během kalibrace je důležité sledovat teplotu, která může ovlivnit hodnoty napětí (odporu) drátu [4, 8].

Směrová kalibrace

Aplikace vícedrátkových sond zahrnuje rozložení rychlosti do tří složek pomocí koeficientů citlivosti k (yaw factor) a h (pitch factor). Tyto koeficienty jsou specifické pro každý typ sondy a jsou k dispozici v softwarové databázi. Nicméně, pro dosažení maximální přesnosti měření se doporučuje provést kalibraci, při které jsou koeficienty k a h přesně stanoveny pro danou sondu. Kalibrace se provádí pomocí speciálního držáku umožňujícího současnou rotaci v horizontální rovině a vertikální náklon [4].

3 Praktická část

Praktická část této práce se zaměřuje na provádění měření turbulentního proudění v obdélníkovém potrubí. Cílem je získat konkrétní data a informace o charakteristikách a vlastnostech turbulentního proudění v tomto prostředí. Pro realizaci měření bude použito vhodné měřicí zařízení pro sběr dat. Odtahové ventilátory budou umístěny ve strategických pozicích, aby umožnily generování požadovaného proudění.

Získaná data budou důkladně analyzována a vyhodnocena. Bude se zkoumat průběh rychlosti proudění, rozložení tlaku a další charakteristiky turbulencí. Porovnání dat z různých měřicích bodů a dvou rychlostí odtahového ventilátoru umožní identifikovat vliv těchto faktorů na vlastnosti proudění.

Výsledky měření budou podrobeny statistické analýze a budou porovnány s teoretickými modely a očekávanými hodnotami. Na základě těchto výsledků budou formulovány závěry a diskuse, které přispějí k lepšímu porozumění turbulencím a proudění v obdélníkovém potrubí spojeném s odtahovými ventilátory.

3.1 Experimentální zařízení

Experimentální zařízení bylo sestaveno ze vzduchotechnického potrubí o délce 3,5 m. V tomto potrubí byl umístěn jeden úsek, který je z důvodu optického přístupu pro PIV měření vyroben z transparentního plexiskla. Toto uspořádání bylo zvoleno z důvodu již existující sestavy vytvořené z tohoto potrubí. Další výhodou obdélníkového profilu byla snadná montáž prvků pro generování turbulence. Stejný prvek byl použit i v případě CTA metody, aby bylo zachováno stejného uspořádání a výsledky byly co nejlépe porovnatelné. Proudění vzduchu generoval odťahový ventilátor Vents Silent – M 250 o výkonu 127/178 W a maximálním objemovém průtoku $1330 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ se dvěma rychlostními stupni.

Použité vybavení:

- potrubí 220x90x1000 m plast
- potrubí 220x90x500 m plexisklo
- spojky
- redukce
- ventilátor
- hliníkové profily
- mřížka
- ustalovač proudění (brčka)
- styčnickový plech
- traverzér
- drátková sonda Dantec 55P11
- kamera Imager sCMOS
- synchronizační a časovací jednotka – Programmable Timing Unit (PTU X)
- laser – Double-pulse Nd: YAG
- optický systém
- počítač vybavený softwarem pro zpracování záznamu – DaVis
- kalibrační terč
- generátor aerosolu – LaVision Aerosol Generator
- olivový ojel – aerosol
-

3.2 Rozbor úlohy

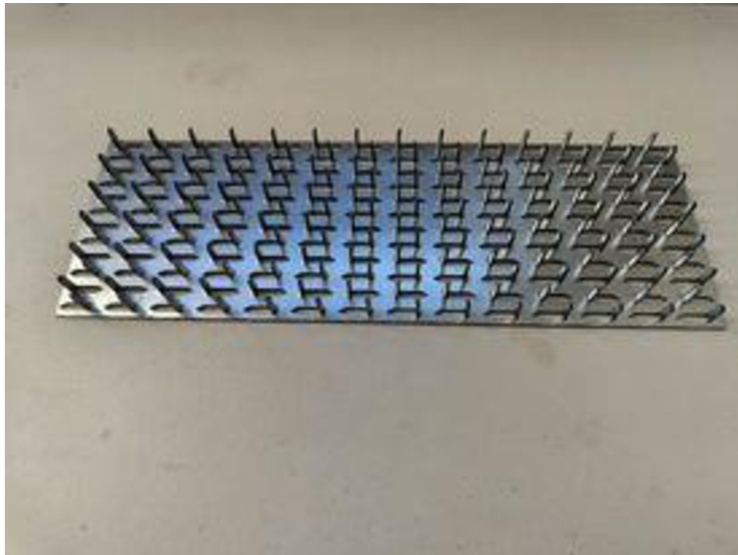
Ve všech případech měření bylo na vstupu do potrubí použito ustalovače proudění pro vytvoření ustáleného proudění bez ovlivnění okolím. Dále byly režimy rozděleny podle použitého prvku pro pokrytí různých režimů proudění s různou mírou turbulence, styčnickových plechů umístěných na spodní ploše potrubí a mřížkou umístěnou na vstupu do měřicího prostoru. Měření probíhalo v obou rychlostních stupních ventilátoru.

3.3 Generace turbulence

Pro řízené generování turbulentního proudění bude využito znalostí úplavu za špatně obtékanými tělesy a mřížkové turbulence.

3.3.1 Styčnickový plech

První prvek pro generování turbulentního proudění byl zvolen styčnickový plech (viz Obr 7), který byl rozložen po spodní ploše obdélníkového potrubí. V celkové délce potrubí před měřicím prostorem bylo použito 10 kusů těchto plechů, které vyplňovaly celou délku potrubí od ustalovače po měřicí prostor.



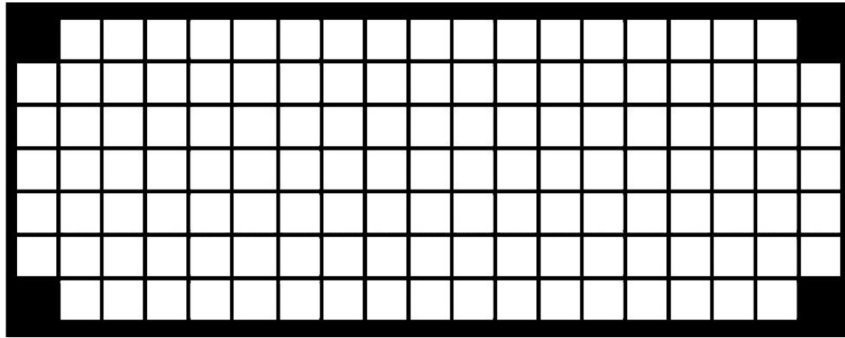
Obr 7 Styčnickový plech.

3.3.2 Mřížka

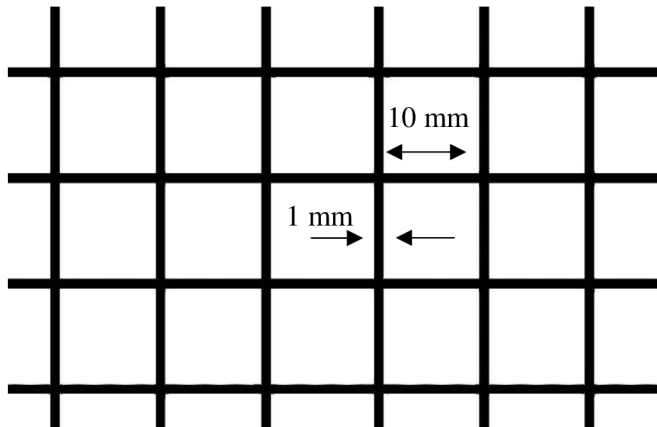
Klasickým způsobem generování turbulentního proudění je použití mřížky se čtvercovými oky. V tomto případě vznikají za pruty úplavy, které se velice rychle mění v homogenní struktury. Návrh mřížky vycházel z práce [9]. Tato práce se zabývala generováním turbulentního proudění za mříží. Na základě experimentálních dat byl v práci vytvořen vzorec pro závislost místa měření na rozměrech mřížky. V tomto případě byla navržena místa pro měření ve vzdálenosti 100 a 160 mm. Pro tuto vzdálenost byla vytvořena mřížka na základě vzorce (3.1), který určuje vzdálenost mezi jednotlivými oky mříže M (m) na vzdálenosti začátku měřicího prostoru od mřížky L_u (m).

$$M = \frac{L_u}{8} \quad (3.1)$$

Na základě toho byla vyrobena mřížka, kde $M = 10$ mm. Pro výrobu bylo použito překližky o tloušťce 3 mm, ze které byla mřížka vyřezána pomocí laseru s přesností na desetiny milimetru. Schéma mřížky je znázorněno na Obr 8.



Obr 8 Mřížka pro generování turbulentního proudění.



Obr 9 Detail mřížky.

3.4 Experimentální měření

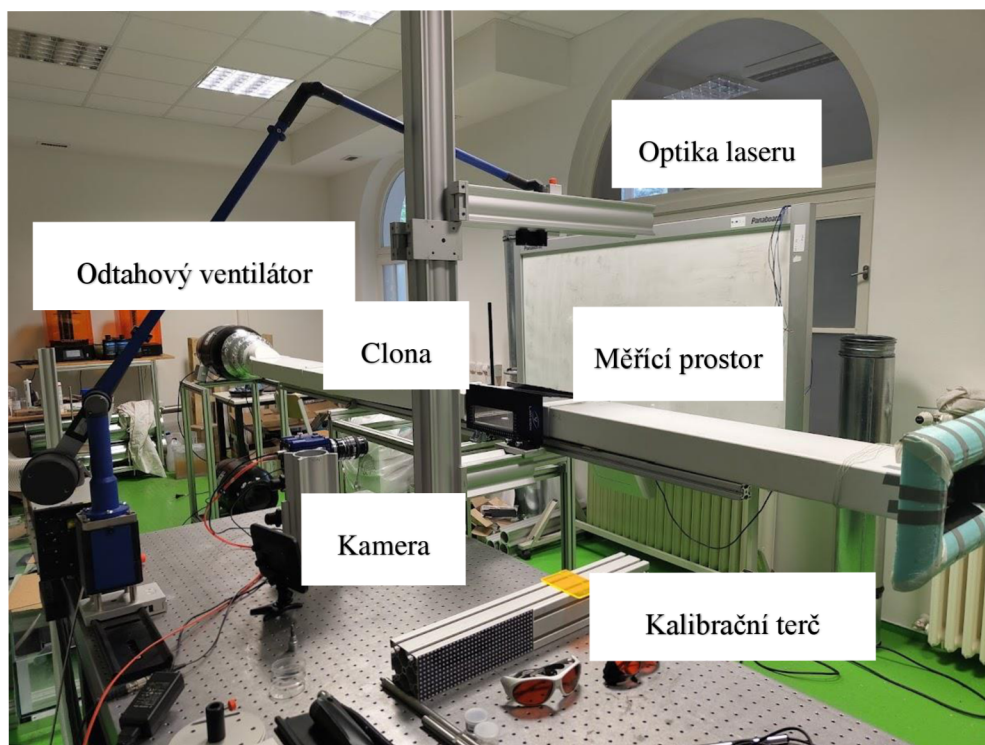
Pro měření pomocí PIV byla využita optická sestava, zahrnující osvětlení laserem a kameru pro snímání částic v proudění. Měření byla prováděna ve dvou různých místech potrubí, a to za turbulizujícími prvky v předem definovaných vzdálenostech. Tím bylo možné získat informace o rychlosti a vektorovém poli turbulencí v obou těchto oblastech.

CTA měření bylo prováděno pomocí drátkové sondy umístěné v potrubí. Tato sonda měřila teplotní změny a na základě těchto změn byla určena rychlost proudění. Měření CTA bylo také provedeno na obou místech potrubí, což umožnilo porovnání výsledků s PIV měřením.

3.4.1 PIV

Uspořádání experimentu

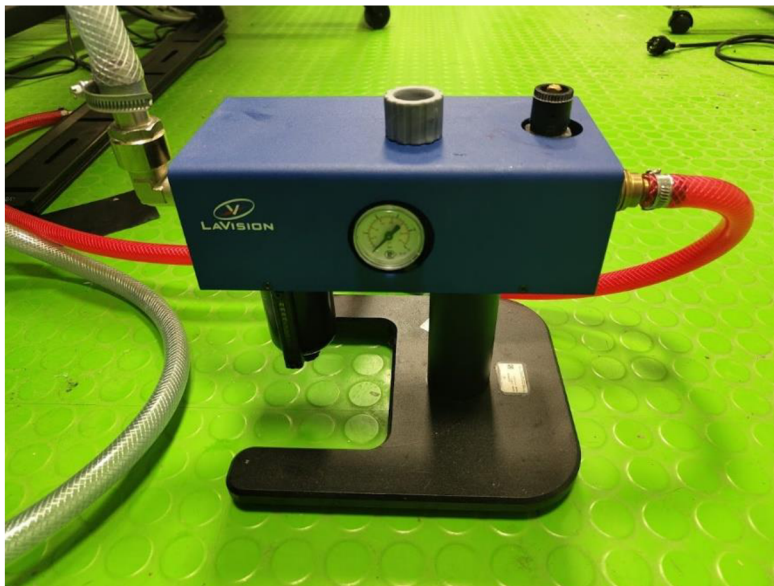
Experiment byl proveden v laboratoři laserové anemometrie katedry. Experimentální zařízení bylo před samotným měřením umístěno v laboratoři a pevně připevněno hliníkovými profily k měřicímu stolu, aby bylo zabráněno nechtěným pohybům. Následně byla ve vhodné vzdálenosti namontována kamera a laser.



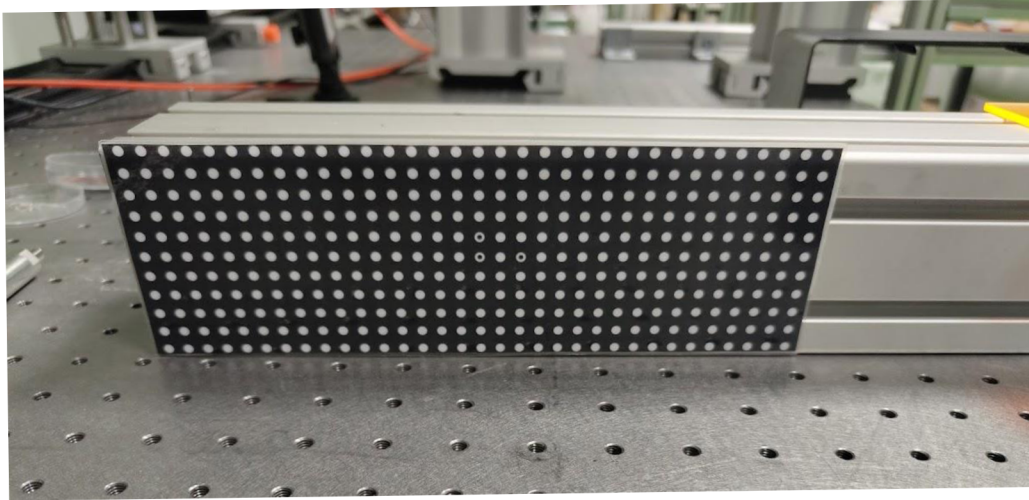
Obr 10 Experimentální zařízení PIV.

Příprava experimentu

Po správném nastavení laseru do středu potrubí ve směru proudění bylo možné přejít k umístění vyrobeného kalibračního terče a provést kalibraci systému. Pro tuto samotnou úlohu byl použit kalibrační terč speciálně navržený pro rozměry potrubí. Pro lepší manipulaci a stabilitu byl terč upevněn na hliníkovém profilu viz Obr 12. Tento terč byl umístěn přesně do středu potrubí. Samotná kalibrace probíhala v programu DaVis společnosti LaVision. Po umístění terče byla zaostřena kamera. Následoval výběr kalibračního terče v systému. Poté mohla být provedena samotná kalibrace. Kalibrace probíhá takovým způsobem, že jsou dle příkazů programu vybrány určité kalibrační markety. Vzhledem k tomu, že program zná reálné rozměry a vzdálenosti marketů, může dopočítat výsledné rozměry. Při kalibraci systému bylo zjištěno, že v měřicím prostoru dochází ke světelným odleskům od lepených hran a muselo se tedy přejít k umístění clony. Po provedení kalibrace následovalo zahájení sycení vzduchu. K tomu účelu byl využit přístroj LaVision Aerosol Generator Obr 11 a jako syčící médium byl zvolen olivový olej z důvodu dostupnosti a vhodných vlastností. Následně byl upravován výkon laseru a množství syčícího média, tak aby byly jednotlivé částice dobře rozeznatelné a v jednotlivých vyhodnocovaných oblastech jich byl vhodný počet.



Obr 11 Aerosolový generátor.



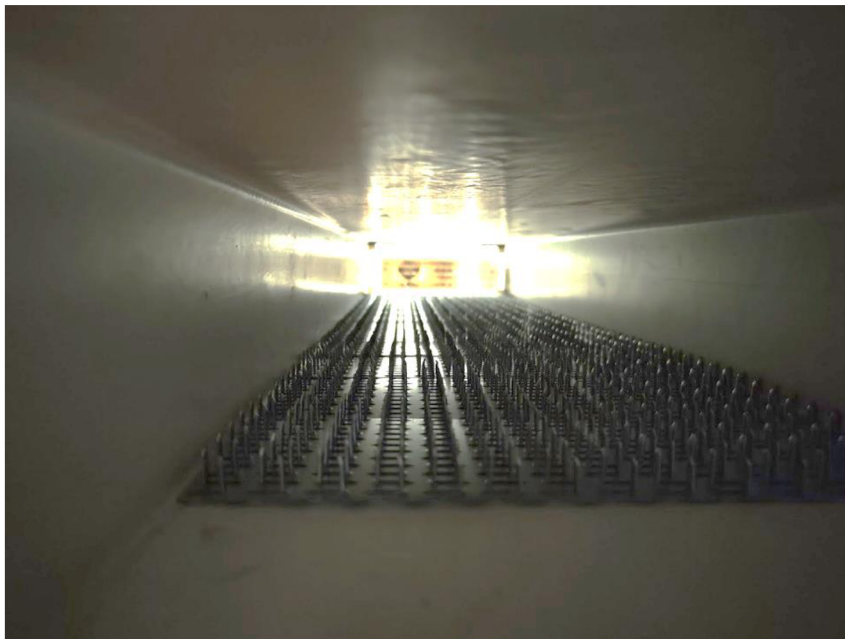
Obr 12 Kalibrační terč.

Průběh měření

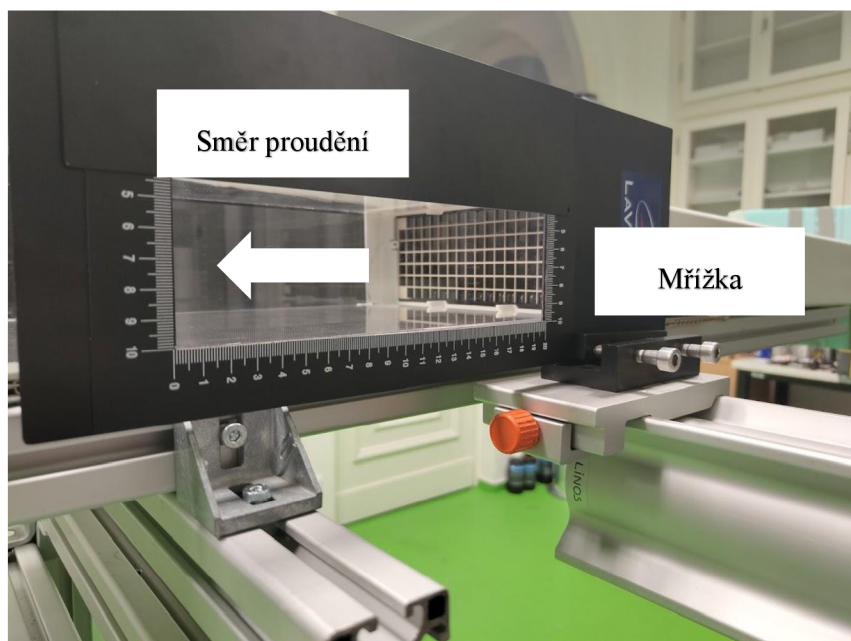
Jako první měření bylo provedeno měření v uspořádání se styčnickovým plechem. Ventilátor byl nastaven na nižší rychlostní stupeň. Po spuštění ventilátoru bylo třeba nechat proudění ustálit. Po ustálení bylo na vstupu do potrubí provedeno měření vstupní rychlosti pomocí ručního anemometru. Toto měření bylo provedeno z důvodu nastavení správného času mezi jednotlivými snímky (dt). Po nastavení dt bylo provedeno 5 jednotlivých měření v délce 60 sekund se snímkovací frekvencí 15 Hz, tedy 900 snímků za minutu. Před započítáním každého jednotlivého měření bylo provedeno nasnímání pozadí z důvodu odfiltrování odlesků a zlepšení výsledků samotného měření.

Další měření bylo provedeno obdobným způsobem, pouze byl nastaven druhý rychlostní stupeň ventilátoru. Stejně jako v předchozím případě byla změřena rychlost proudění anemometrem a dopočteno dt.

Následovalo měření, při kterém byla na vstupu do měřicího prostoru umístěna mřížka definovaná v kapitole výše. Další průběh měření byl stejný, jako v případě styčnickového plechu.



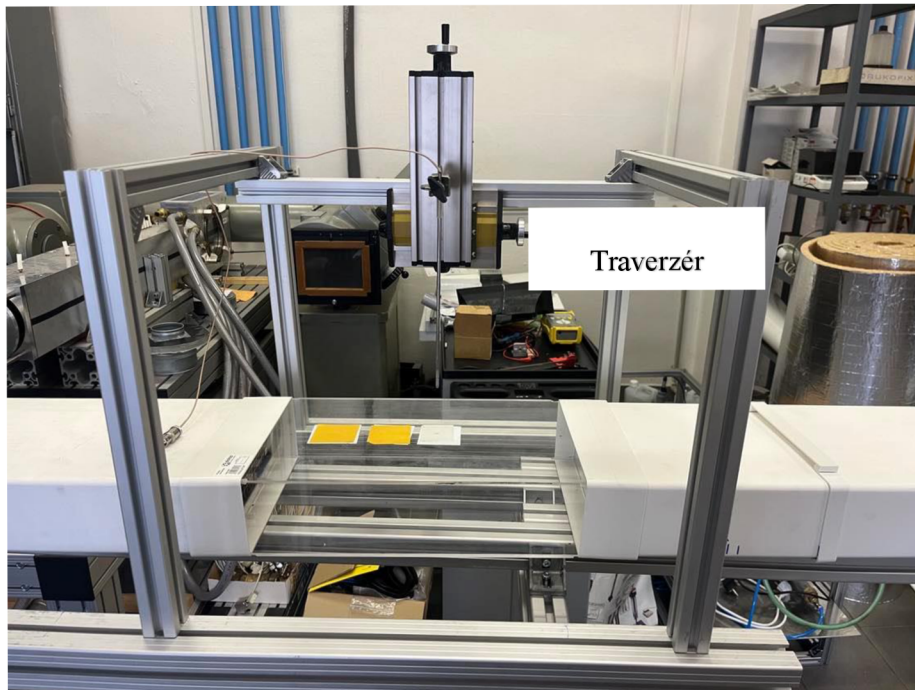
Obr 13 Styčnickový plech v potrubí.



Obr 14 Mřížka před vstupem do měřicího prostoru.

3.4.2 CTA

Experiment pro měření CTA byl postaven v laboratoři anemometrie. Uspořádání bylo provedeno stejným způsobem, jako při měření metodou PIV. Pro způsob měření metodou CTA byl upraven měřicí prostor tak, že ve vzdálenosti 100, 160 a 220 mm od vstupní hrany byly vyvrtány otvory pro měřicí sondu. Měření probíhalo vždy v jedné ze tří pozic zbývající pozice byly pečlivě utěsněny, aby nedocházelo k ovlivnění proudění. Tato sonda byla umístěna v „držáku“ a pevně ukotvena v traverzéro. Traverzér byl pomocí profilů přichycen ke konstrukci, aby nemohlo dojít k posunům a případnému poškození sondy.



Obr 15 Měřicí oblast s traverzéro.

Popis sondy

V případě tohoto měření byla použita jednodrátková sonda 55P11 od firmy Dantec Dynamics. Tato sonda má průměr vlákna 5 mikrometrů a jeho délka je 1,25 mm. Drátek je potažen vrstvou platiny.



Obr 16 Sonda 55P11.

Průběh měření

První měření bylo uskutečněno se styčnickovými plechy, s prvním rychlostním stupněm ventilátoru a soundou umístěnou v prvním otvoru. Sonda byla umístěna v blízkosti dna kanálu a pomocí traverzuru byla následně posouvána do dalších poloh po svislé ose kanálu s krokem 5 mm. Měření bylo uskutečněno celkem v 16 pozicích. Poslední poloha se nacházela 1 mm pod horní stěnou kanálu. Poté se přešlo k měření vyššího rychlostního stupně.

Následovalo rozmontování první části kanálu a na místo plechů umístění mřížky. Tento postup měření byl zvolen z důvodu složitějšího přesunu sondy CTA, a proto byly v každé díře naměřeny všechny režimy.

3.5 Zpracování naměřených dat

Výsledky měření metodou PIV byly zpracovány softwarem DaVis 10.2. Při zpracování dat bylo nejdříve nutné nastavit masku, tedy označit oblast, která je objektem měření a odstranit okolí. Tímto krokem jsou odstíněny odlesky okolí a je zabráněno chybným výpočtům, které by mohly vzniknout.

Výsledkem měření metodou CTA jsou data zaznamenaná softwarem Stream Ware a hodnoty kalibrace. Data byla následně exportována do programu Microsoft Excel. V tomto programu byly za pomoci maker sestaveny výpočetní vzorce a následně vytvořeny výsledné grafy

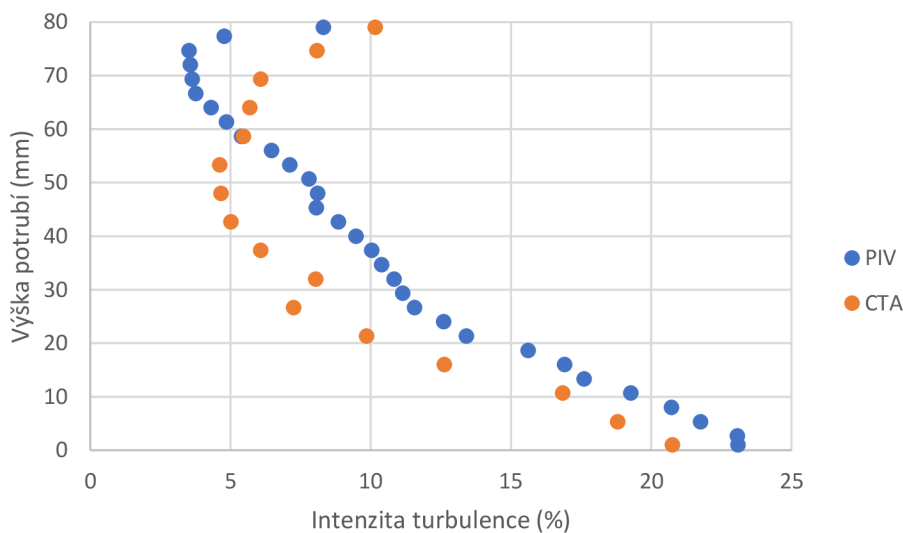
4 Výsledky

V této části jsou uvedeny výsledky vyhodnocení měření turbulentního proudění pro případy proudění přes styčnickový plech a dále případ s umístěnou mřížkou na vstupu do měřicí oblasti. Tyto jednotlivé režimy byly zaznamenány měřicím zařízením PIV a CTA.

4.1 Pozice 100 mm – styčnickové plechy

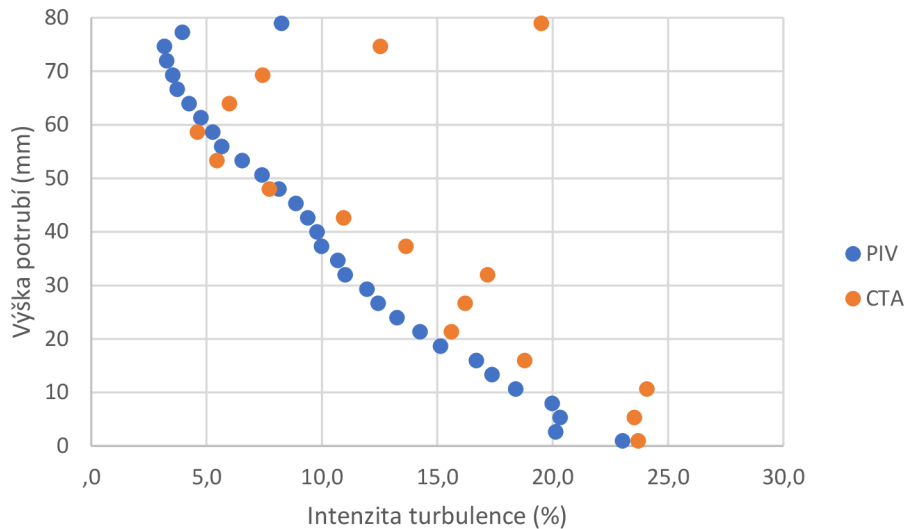
V této části budou porovnány výsledky získané měřením metodou PIV a CTA. Naměřená data pocházejí z pozice 100 mm od vstupního okraje.

Při porovnání intenzity turbulence pro případ s nižším výkonem ventilátoru na Obr 17 lze vidět podobný průběh mezi hodnotami získanými metodou CTA a metodou PIV. V případě CTA lze spatřit mírnější pokles v intenzitě směrem od horního okraje kanálu. Ve vzdálenosti 30 mm od horního okraje potrubí je dosaženo minima intenzity turbulence. Od této oblasti lze pozorovat téměř lineárního růst s menším lokálním maximem v přibližně polovině výšky kanálu. Tuto nelinearitu lze pozorovat i v případě PIV, zde ale nedochází k úplnému vzniku lokálního maxima, ale k pouhému zvlnění průběhu. Maxima intenzity turbulence je dosaženo v blízkosti dna kanálu. Hodnota tohoto maxima je menší než hodnota získaná metodou PIV, které v celé oblasti udává vyšší intenzitu turbulence než CTA. Metoda PIV udává u horního okraje přibližně stejnou hodnotu intenzity turbulence jako CTA. S rostoucí vzdáleností intenzita prudce klesá až do vzdálenosti 10 mm od horního okraje, odkud téměř lineárně narůstá až do maxima v blízkosti dna potrubí. Toto maximum bylo možné předpokládat na základě umístění styčnickových plechů na dně.



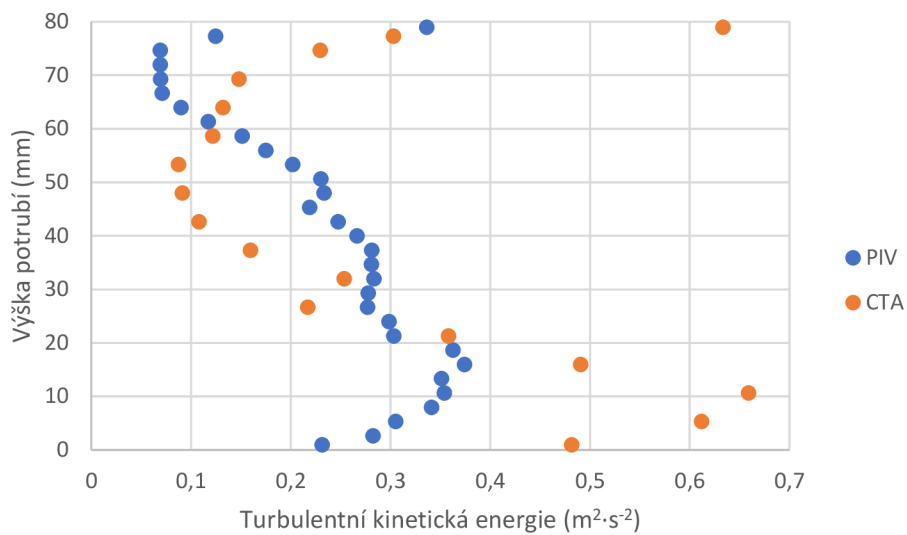
Obr 17 Intenzita turbulence – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost I.

V případě vyššího výkonu lze pozorovat podobný průběh dat získaných jako v případě předchozího režimu. Pokud se zaměříme na metodou PIV, lze spatřit průběh, který je téměř totožný jako v předchozím případě. Metoda CTA zde zobrazuje výsledky s podobně umístěnými extrémy jako při pomalejším proudění. V tomto případě ale extrém v prostřední části kanálu dosahuje více jak dvojnásobných hodnot a je posunut blíže ke dnu potrubí. Tento rozdíl je patrně způsoben vyššími rychlostmi, které způsobují vyšší fluktuaci rychlosti.

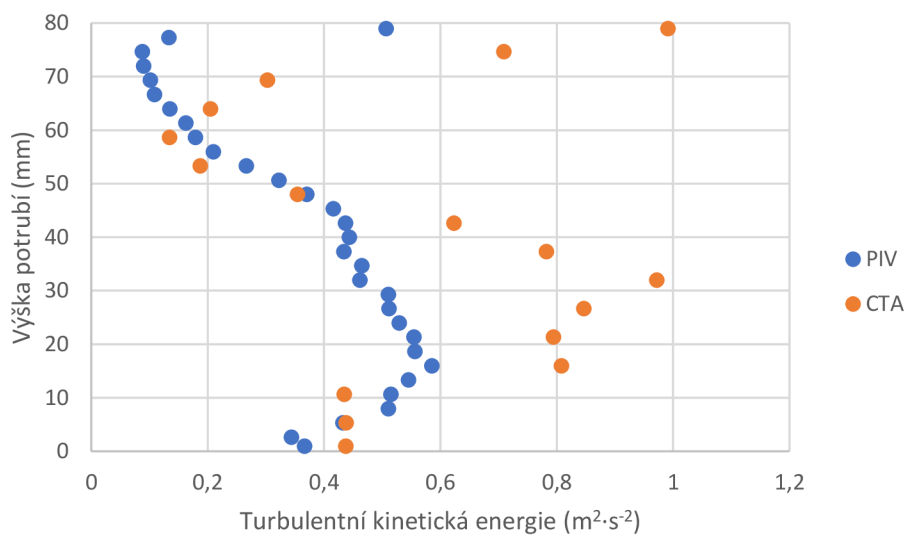


Obr 18 Intenzita turbulence – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost II.

Při porovnání turbulentní kinetické energie z obou měřících metod (viz. Obr 19 a Obr 20), je na první pohled patrný relativní rozdíl v rozmezí 1 až 15 % mezi použitými metodami. Pro energii získanou metodou CTA při nízké rychlosti je patrný podobný průběh jako u PIV, ale s tím rozdílem, že zde dochází k posunutí lokálních extrémů směrem ke dnu potrubí. Samotné extrémy nabývají vyšších hodnot u CTA, než u PIV. Z grafu turbulentní kinetické energie pro vyšší rychlosti je patrný podobný rozdíl jako v předchozím případě. Lokální maximum je zde v případě CTA dat posunuto blíže ke středu a dosahuje podobných hodnot jako v blízkosti horního okraje kanálu. Samotný rozdíl mezi lokálními maximy metod je pravděpodobně způsoben o dva řády vyšší frekvencí u metody CTA než u metody PIV.

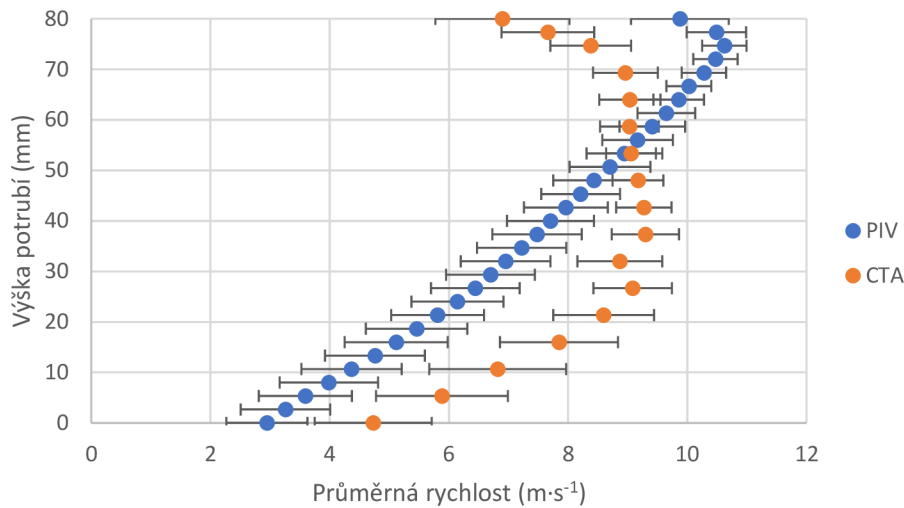


Obr 19 Turbulentní kinetická energie – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost I.

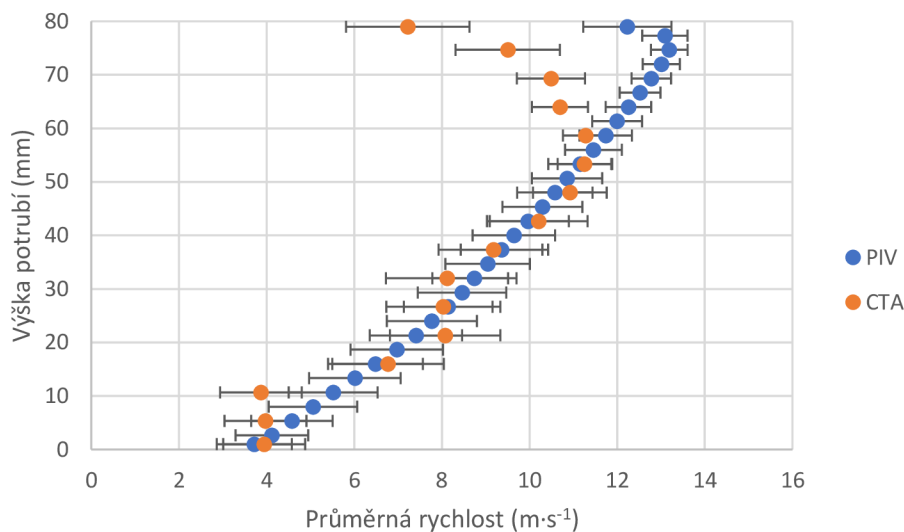


Obr 20 Turbulentní kinetická energie – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost II.

Při porovnání průměrných rychlostí v grafech, kde jsou uvedeny i chybové úsečky je patrný rozdíl v blízkosti stěn potrubí. Tento rozdíl lze připisovat různé frekvenci záznamu jednotlivých metod. Na základě velikosti chybových úseček je možné spatřit, že k největším změnám rychlosti dochází v případě metody CTA u dolní i horní stěny potrubí. U metody PIV je změna v délce chybových úseček patrná v blízkosti horní stěny. Ve vzdálenosti 70 mm od dna dochází k plynulému nárůstu délky chybových úseček, tak že u dna potrubí jsou chybové úsečky nejdelší.



Obr 21 Průměrná rychlost – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost I.

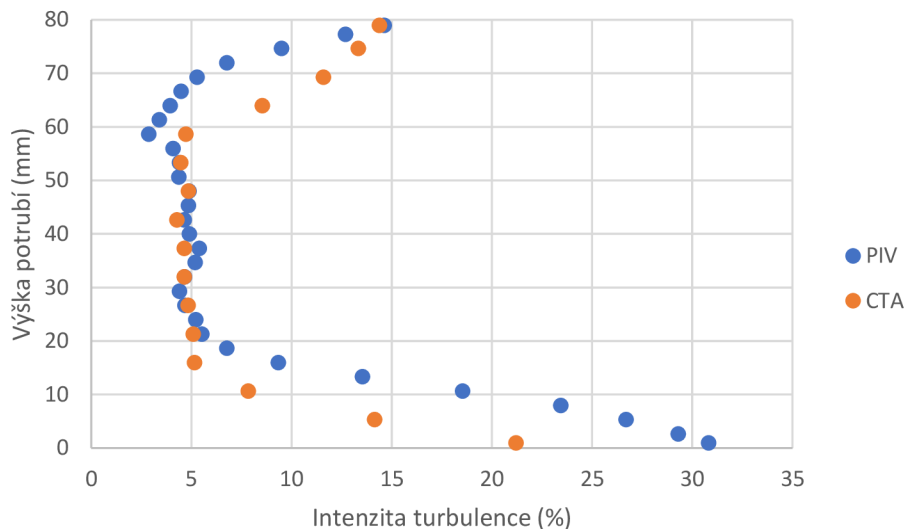


Obr 22 Průměrná rychlost – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost II.

4.2 Pozice 100 mm – mřížka

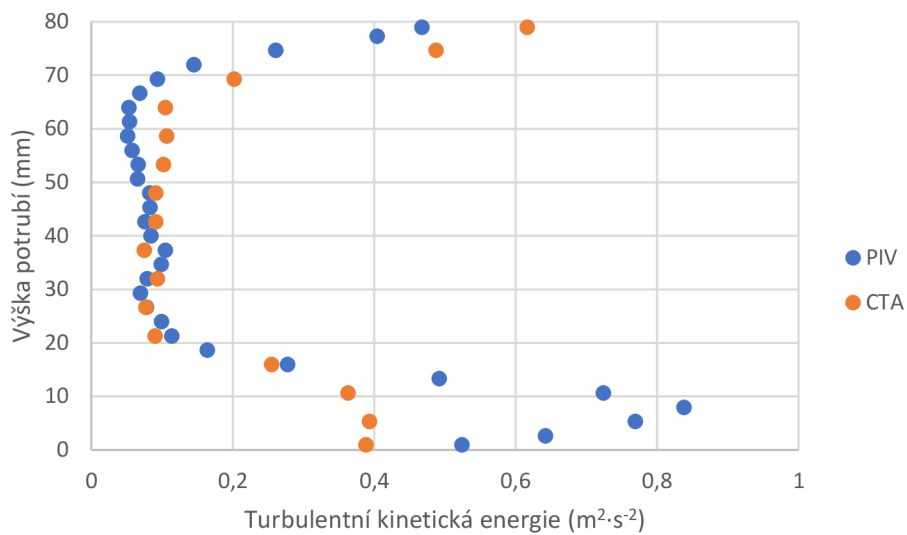
V této části budou rozebrány výsledky ve vzdálenosti 100 mm od vstupní hrany do měřicího prostoru a mřížkou umístěnou na vstupu do měřicího prostoru.

Intenzita turbulence změřená v režimu I i režimu II dosahuje stejných výsledků. Následující část se tedy bude věnovat pouze jednomu režimu. Graf intenzity turbulence zde vytváří v případě obou metod přibližně vanovou křivku s maximem u dna potrubí. U metody CTA je patrný mírnější pokles intenzity směrem k hodnotě 0,05 ve vzdálenosti přibližně 20 mm od horního okraje. Pokles u PIV je intenzivnější a k minimální hodnotě v okolí 0,05 se přibližuje již ve vzdálenosti 15 mm od horního okraje. Při použití mřížky nedochází k tak intenzivní turbulenci a oba režimy vykazují obdobné výsledky.

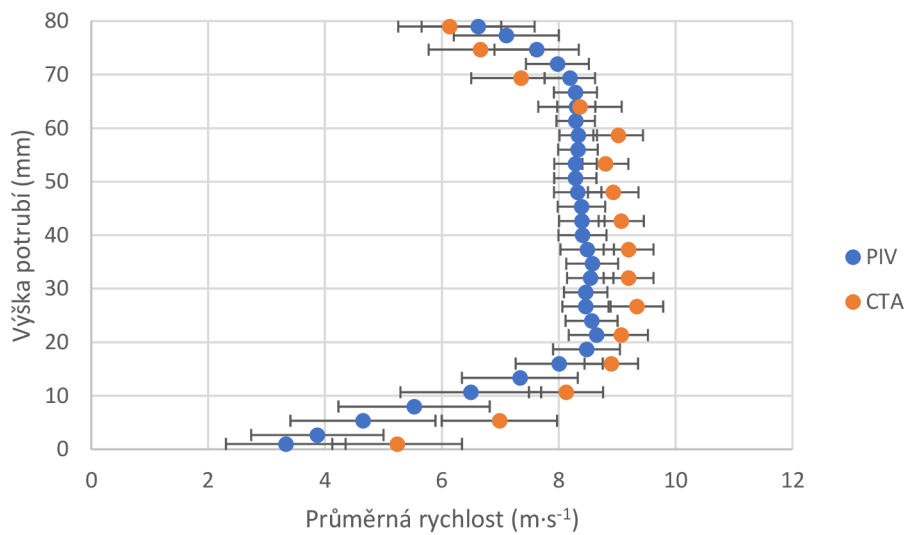


Obr 23 Intenzita turbulence – pozice 100 mm, mřížka, rychlost I.

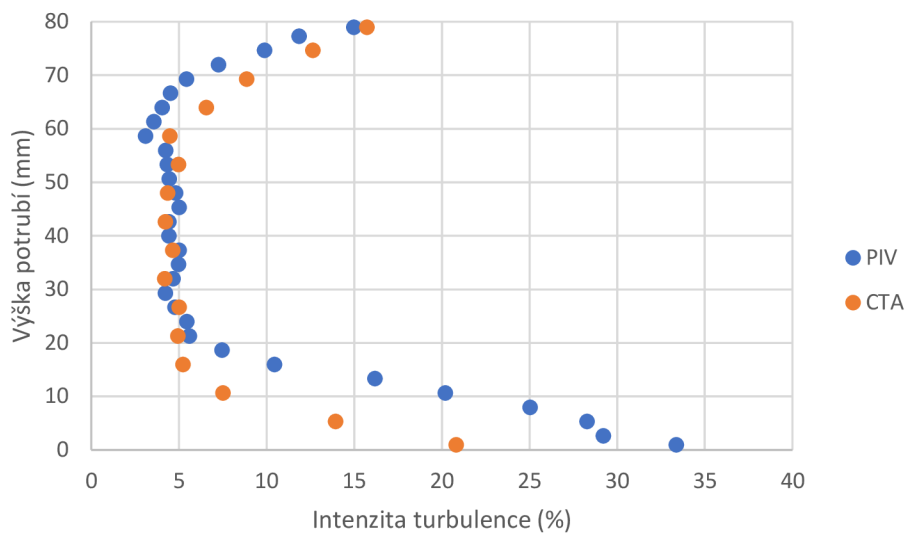
Výsledné grafy turbulentní kinetické energie vykazují shodu, kromě oblasti ve vzdálenosti 20 mm ode dna. V tomto místě se metody PIV vyskytuje velký nárůst turbulentní kinetické energie. Tento nárůst je patrný i v případě CTA, ale není zde vytvořen tak velký vrchol. Tento rozdíl může být způsoben snímkovací frekvencí a dobou existence výrových struktur, které na rozdíl od CTA, PIV hůře zaznamenává.



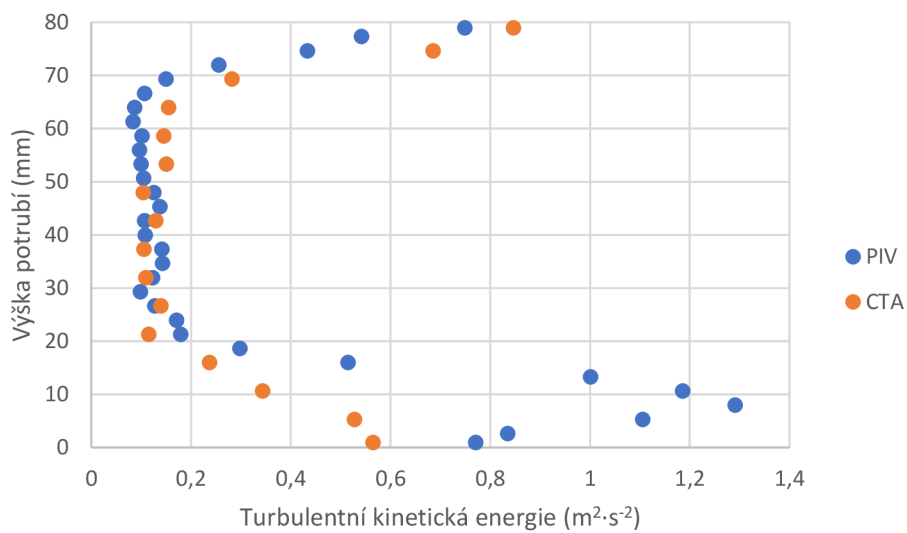
Obr 24 Turbulentní kinetická energie – pozice 100 mm, mřížka, rychlost I.



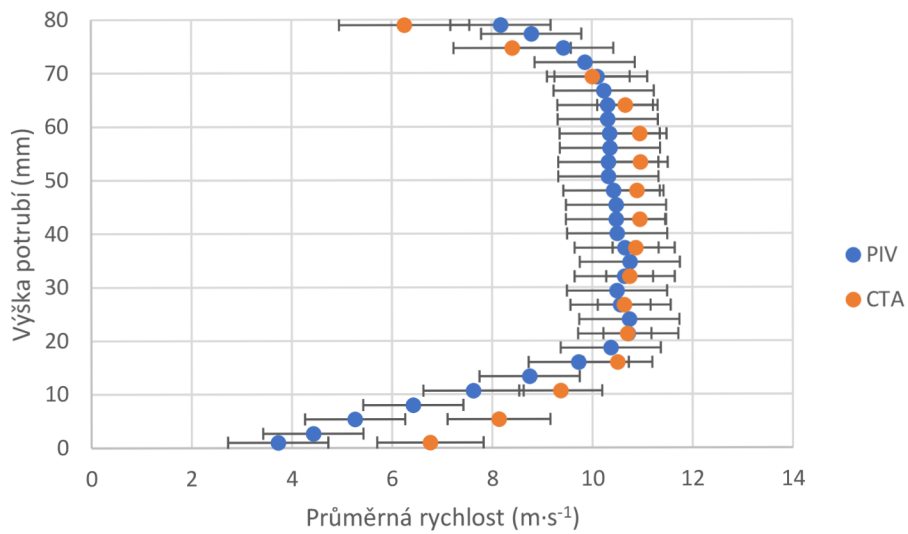
Obr 25 Průměrná rychlost – pozice 100 mm, mřížka, rychlost I.



Obr 26 Intenzita turbulence – pozice 100 mm, mřížka, rychlost II.



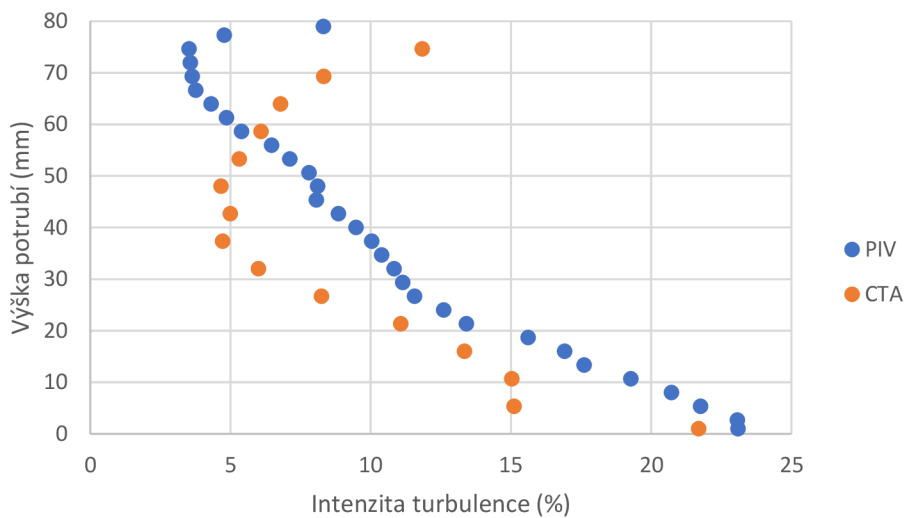
Obr 27 Turbulentní kinetická energie – pozice 100 mm, mřížka, rychlost II.



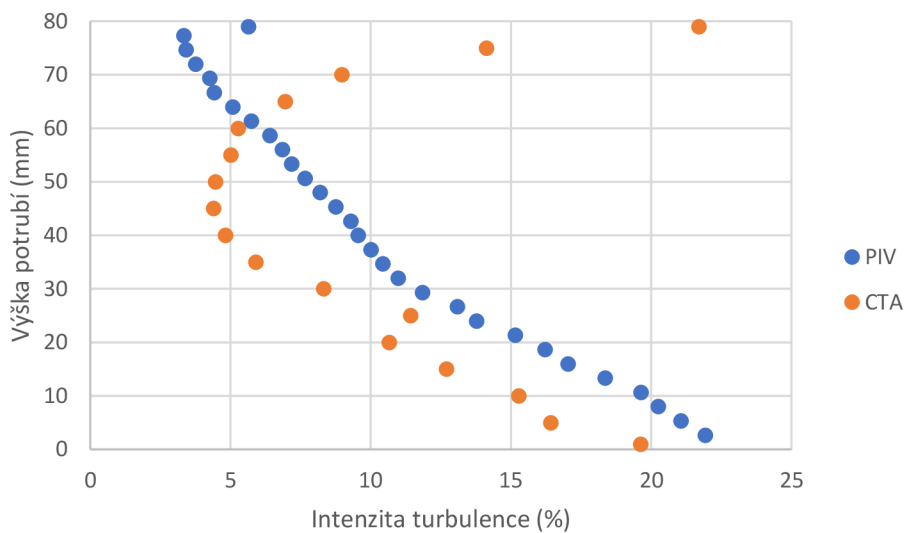
Obr 28 Průměrná rychlost – pozice 100 mm, mřížka, rychlost II.

4.3 Pozice 160 mm – styčnickové plechy

Pokud budeme zkoumat intenzitu turbulence ve vzdálenosti 160 mm od vstupní hrany měřicího prostoru, můžeme vidět rozdíl v poloze minima intenzity mezi metodou CTA a PIV. V případě metody CTA se minimum intenzity turbulence nachází přibližně ve středu potrubí. Vidíme, že průběh je dále v obou případech měřících metod stejný s rozdílem přibližně 3 až 5 %, kdy je intenzita turbulence v případě CTA menší.

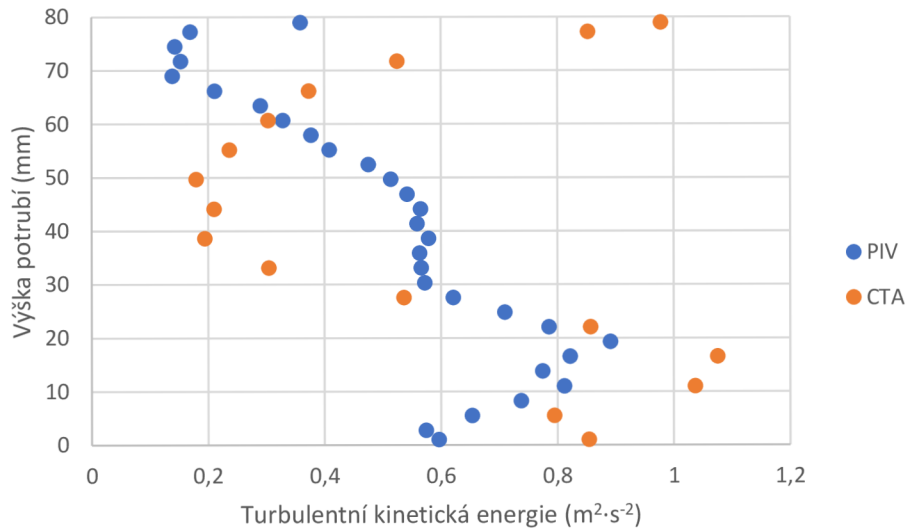


Obr 29 Intenzita turbulence – pozice 160 mm, styčnickový plech, rychlost I.

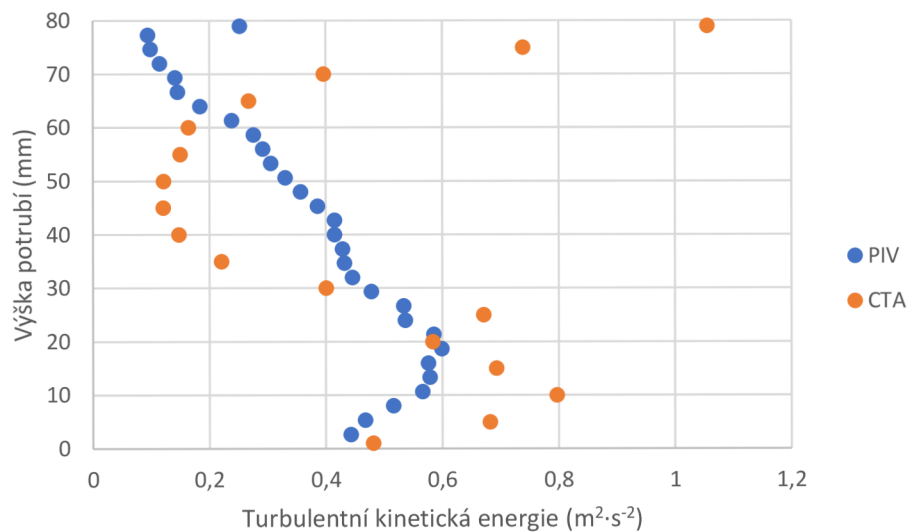


Obr 30 Intenzita turbulence – pozice 160 mm, styčnickový plech, rychlost II.

Pro grafy s turbulentní kinetickou energií je patrný velký rozdíl v okrajových místech potrubí. Ve vzdálenosti 20 mm od dna potrubí je možné spatřit maximální turbulentní kinetickou energii. V těchto místech dochází ke shodě obou metod v průběhu grafu. Metoda CTA zde vykazuje vyšší energii. Minimum energie je v případě CTA posunuto o 30 mm níže oproti PIV přibližně na střed měřicího prostoru.

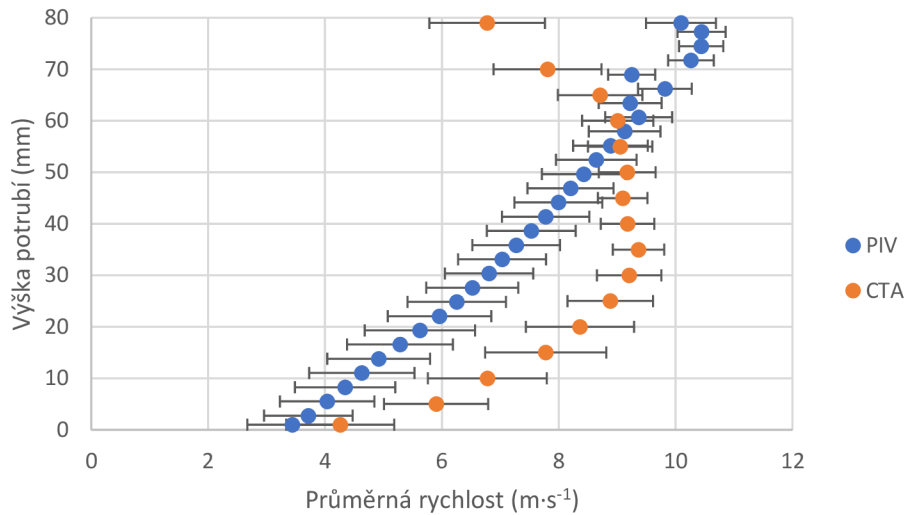


Obr 31 Turbulentní kinetická energie – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost I.

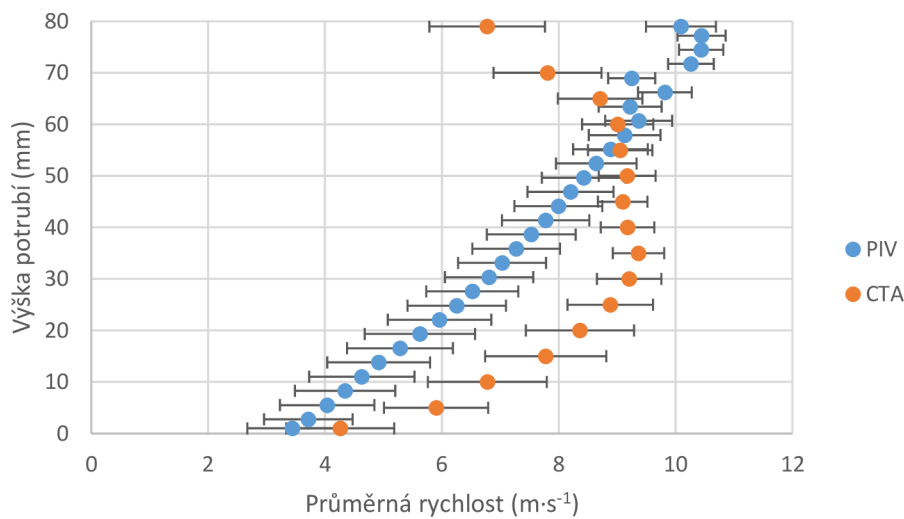


Obr 32 Turbulentní kinetická energie – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost II.

Grafy průměrných rychlostí se od sebe liší nejvíce v blízkosti horní stěny potrubí. CTA zde vykazuje nižší rychlosti s větší směrodatnou odchylkou, než je u metody PIV. Tento rozdíl může být způsoben fluktuací rychlostí, které lépe zaznamená metoda CTA. Všeobecně metoda CTA zaznamenává největší odchylku rychlosti u stěn potrubí a nejmenší ve středu měřicího prostoru. Tento výsledek nelze pozorovat u PIV, u kterého se nejmenší odchylka nachází přibližně na 70 mm od dna potrubí. Odtud odchylka narůstá lineárně v obou směrech K větším rozdílům dochází u druhého rychlostního stupně.



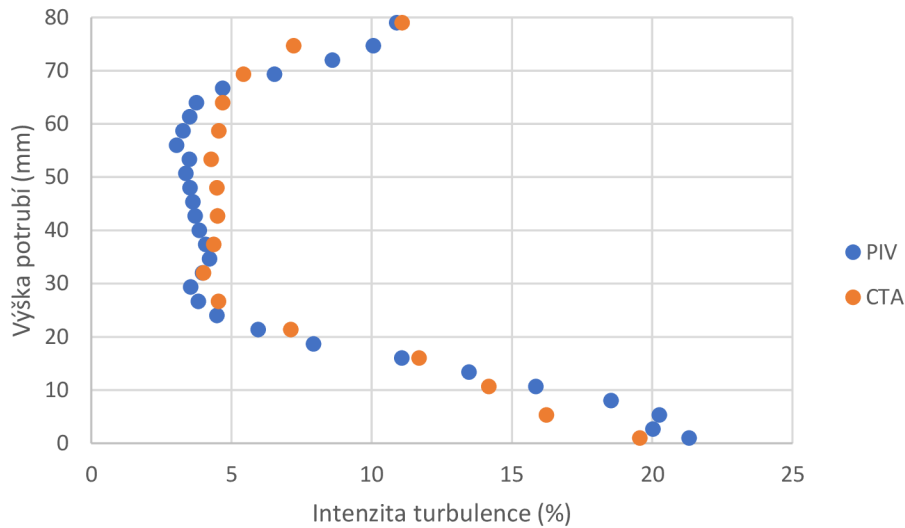
Obr 33 Průměrná rychlost – pozice 160 mm, styčnickový plech, rychlost I.



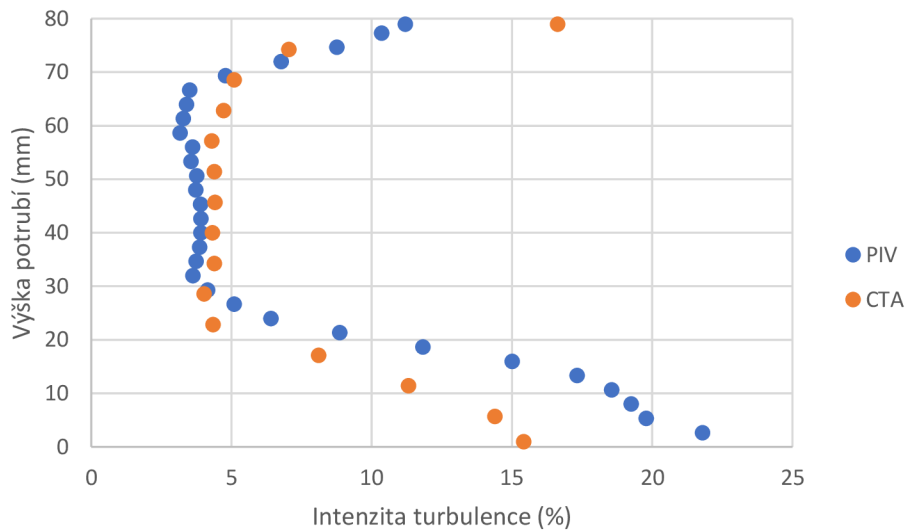
Obr 34 Průměrná rychlost – pozice 160 mm, styčnickový plech, rychlost II.

4.4 Pozice 160 mm – mřížka

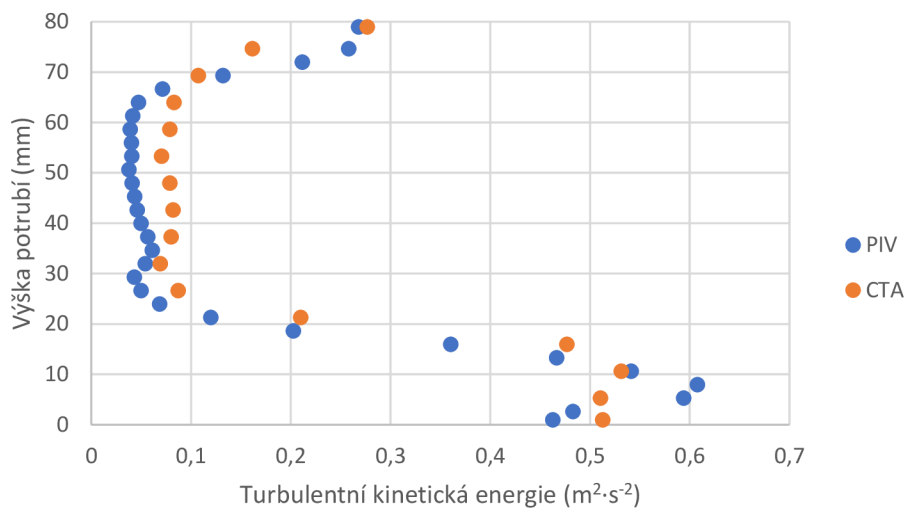
Výsledky z pozice 160 mm ve vzdálenosti od vstupní hrany do měřicího prostoru se téměř shodují. K větším rozdílům dochází u vyššího rychlostní stupně, kde je průběh výsledků CTA posunut směrem ke dnu potrubí. Největší intenzity je dosaženo v blízkosti horní a dolní stěny. V prostřední části potrubí dochází k téměř konstantním výsledkům, a to v rozmezí od 25 do 65 mm.



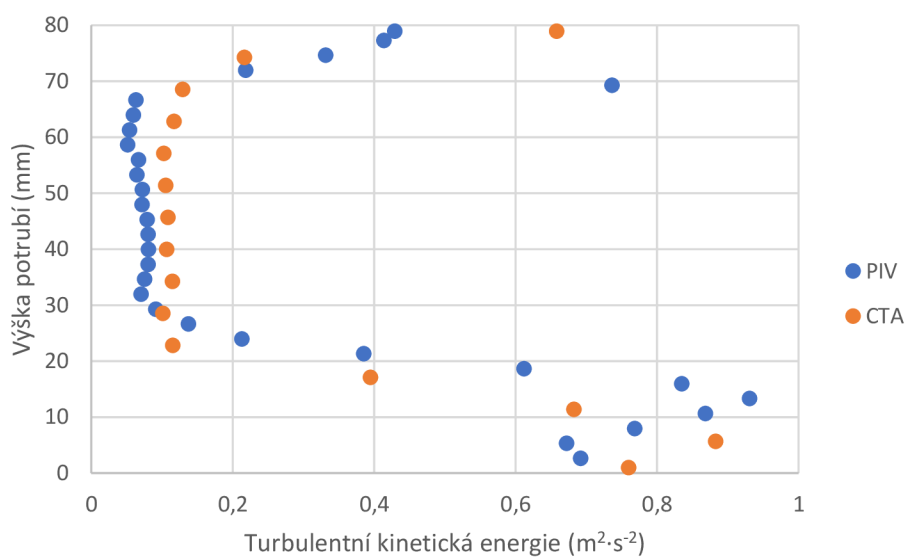
Obr 35 Intenzita turbulence – pozice 160 mm, mřížka, rychlost I.



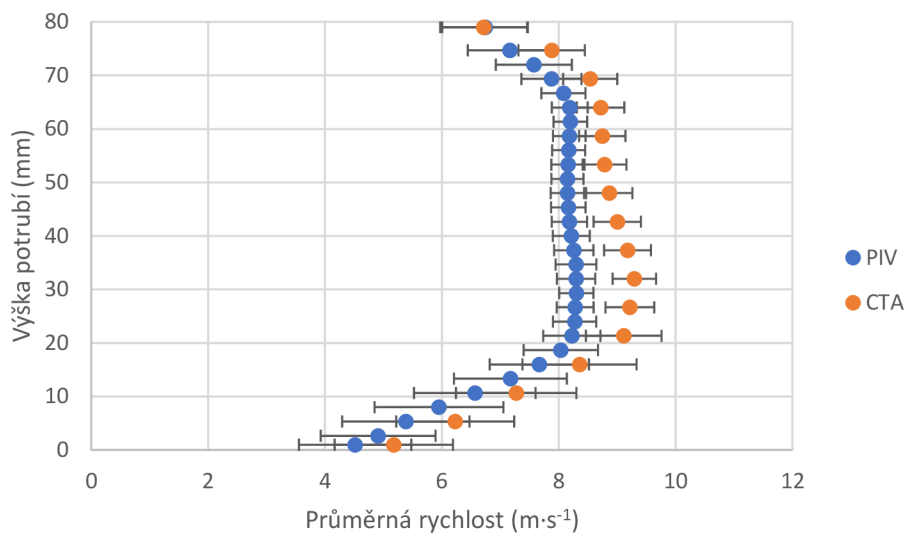
Obr 36 Intenzita turbulence – pozice 160 mm, mřížka, rychlost II.



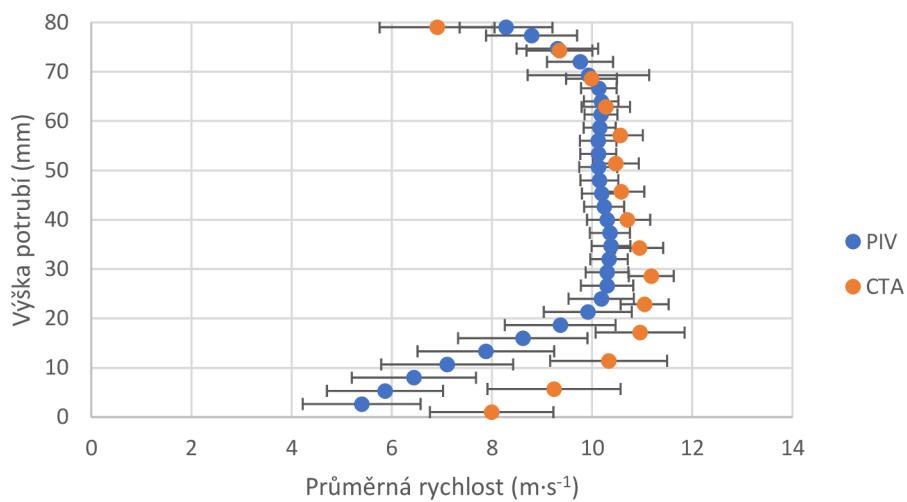
Obr 37 Turbulentní kinetická energie – pozice 160 mm, mřížka, rychlost I.



Obr 38 Turbulentní kinetická energie – pozice 160 mm, mřížka, rychlost II.



Obr 39 Průměrná rychlost – pozice 160 mm, mřížka, rychlost I.



Obr 40 Průměrná rychlost – pozice 160 mm, mřížka, rychlost II.

5 Diskuze

Diskuze výsledků měření pomocí metod PIV (Particle Image Velocimetry) a CTA (Constant Temperature Anemometry) při studiu turbulentního proudění v obdélníkovém potrubí přináší důležité poznatky o přesnosti a vhodnosti těchto metod pro analýzu turbulencí. Srovnání výsledků obou metod umožňuje posoudit jejich přínosy a omezení v daném experimentálním prostředí.

Při porovnání intenzity turbulence mezi metodami PIV a CTA byly pozorovány rozdíly. Metoda CTA vykazovala tendenci poskytovat vyšší hodnoty intenzity turbulence v případě použití styčnickových plechů ve srovnání s metodou PIV u stěn potrubí. Na druhou stranu metoda CTA zaznamenal nižší intenzitu turbulence ve střední části kanálu. Metoda PIV v tomto místě vykazuje téměř lineární průběh. Tento rozdíl může být způsoben rozdílnou citlivostí a schopností obou metod zachytit drobné změny rychlosti a rozložení turbulencí v potrubí.

Rozdíly byly také pozorovány v kinetické energii turbulence mezi oběma metodami. Metoda CTA ukazovala tendenci poskytovat vyšší hodnoty kinetické energie ve srovnání s metodou PIV. Toto naznačuje, že metoda CTA je schopná detailněji zachytit rozložení energie v turbulenci a poskytnout podrobnější informace o jejím prostorovém rozložení.

Co se týče rychlostního pole, byly také zjištěny rozdíly mezi metodami PIV a CTA. Metoda CTA s vyšší vzorkovací frekvencí poskytuje detailnější informace o rychlostním poli turbulencí v potrubí a je schopna zachytit rychlé změny v rychlosti. Metoda PIV s nižší vzorkovací frekvencí může být omezena v rychlostním rozlišení a může mít omezenou schopnost zachytit rychlé změny rychlosti v turbulenci.

Samotné chyby v záznamu rychlosti mohou být „vytvořeny“ způsobem záznamu metody CTA. Jednoduchá sonda je schopna zaznamenat změnu rychlosti na základě změny odporu pouze v jednom směru. Jak můžeme vidět na snímcích metody PIV, v případě použití styčnickových plechů dochází k velkým změnám rychlosti i ve svislém směru. Metoda PIV je na rozdíl od metody CTA tyto rychlosti schopna zaznamenat.

Diskuze výsledků ukazuje, že obě metody mají své výhody a omezení při měření turbulencí v potrubí. Metoda PIV poskytuje vyšší rozlišení a detailnost analýzy rychlostního pole, zatímco metoda CTA s vyšší vzorkovací frekvencí poskytuje přesnější informace o intenzitě turbulence a schopnost zachytit rychlé změny v rychlosti. Při výběru vhodné metody pro konkrétní aplikace je třeba zvážit tyto faktory a požadavky daného experimentálního prostředí.

Další výzkum by mohl směřovat k dalšímu srovnání těchto metod v různých experimentálních scénářích a s použitím různých turbulizujících prvků. To by přispělo k dalšímu zdokonalení měření a analýze turbulencí v potrubí a poskytlo užitečné informace pro inženýrské aplikace, výzkum v aerodynamice a dalších oblastech, kde je důležité porozumět turbulentnímu proudění a jeho vlivům.

6 Závěr

Předmětem této práce byl experimentální výzkum turbulentního proudění v potrubí obdélníkového průřezu při různých režimech. Cílem bylo ověření výsledku získaných nízkofrekvenční metodou PIV. Pro zhodnocení výsledků bylo proveden komparativní měření metodou CTA s mnohem vyšší vzorkovací frekvencí.

První kapitola byla věnována teoretickému rozboru problematiky, který poskytl porozumění vlastností turbulentního proudění. Součástí této kapitoly byly dále představeny důležité informace o způsobech záznamu turbulentního proudění. Těmito metodami jsou CTA a PIV.

V další kapitole se nachází obeznámení se samotným experimentem navrženým na základě teoretické studie, který umožnil provést měření pomocí obou metod – nízkofrekvenční PIV a vysokofrekvenční CTA. Nejprve zde bylo představeno schéma měřicí tratě. Poté byla popsána generace turbulentního proudění. Hlavní náplní této práce bylo provést experimentální výzkum turbulentního proudění. Tento výzkum probíhal na základě dat získaných metodami PIV a CTA. V této kapitole byla popsána jednotlivá měřicí zařízení a jejich uspořádání v systému. Následně zde byl popsán průběh měření v jednotlivých režimech a poté zpracování získaných dat.

V kapitole Výsledky byly představeny naměřené a vypočítané hodnoty. Byl získán průběh intenzity turbulence v závislosti na průřezu potrubí.

Porovnáním výsledků bylo zjištěno, že nízkofrekvenční PIV poskytuje po správné kalibraci a přípravě experimentu, relativně přesné výsledky o rychlostním poli proudění. Tyto informace jsou důležité pro studium turbulentního proudění. Metoda CTA s vyšší vzorkovací frekvencí poskytla přesnější informace o změnách rychlosti proudění.

K získání přesnějších informací by bylo vhodnější měření provádět ve 3D prostoru v měřicí oblasti, a ne pouze ve vertikální ose potrubí. Pro lepší porozumění zkoumaných jevů by bylo vhodné použít více způsobů generování turbulentního proudění.

Seznam obrázků

Obr 1 Princip metody PIV (upraveno) [8].....	15
Obr 2 Kamera.....	16
Obr 3 Výsledky analýzy PIV metodou vzájemné korelace [17].	20
Obr 4 Výsledky analýzy PIV metodou autokorelace [17].....	21
Obr 5 Wheatstonův můstek.....	24
Obr 6 Kalibrátor sondy CTA.....	27
Obr 7 Styčnickový plech.....	31
Obr 8 Mřížka pro generování turbulentního proudění.....	32
Obr 9 Detail mřížky.....	32
Obr 10 Experimentální zařízení PIV.....	33
Obr 11 Aerosolový generátor.....	34
Obr 12 Kalibrační terč.....	35
Obr 13 Styčnickový plech v potrubí.....	36
Obr 14 Mřížka před vstupem do měřicího prostoru.....	37
Obr 15 Měřicí oblast s traverzém.....	38
Obr 16 Sonda 55P11.....	39
Obr 17 Intenzita turbulence – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost I.....	41
Obr 18 Intenzita turbulence – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost II.....	42
Obr 19 Turbulentní kinetická energie – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost I.....	43
Obr 20 Turbulentní kinetická energie – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost II.....	43
Obr 21 Průměrná rychlost – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost I.....	44
Obr 22 Průměrná rychlost – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost II.....	44
Obr 23 Intenzita turbulence – pozice 100 mm, mřížka, rychlost I.....	45
Obr 24 Turbulentní kinetická energie – pozice 100 mm, mřížka, rychlost I.....	46
Obr 25 Průměrná rychlost – pozice 100 mm, mřížka, rychlost I.....	46
Obr 26 Intenzita turbulence – pozice 100 mm, mřížka, rychlost II.....	47
Obr 27 Turbulentní kinetická energie – pozice 100 mm, mřížka, rychlost II.....	47
Obr 28 Průměrná rychlost – pozice 100 mm, mřížka, rychlost II.....	48
Obr 29 Intenzita turbulence – pozice 160 mm, styčnickový plech, rychlost I.....	49

Obr 30	Intenzita turbulence – pozice 160 mm, styčnickový plech, rychlost II.....	49
Obr 31	Turbulentní kinetická energie – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost I.....	50
Obr 32	Turbulentní kinetická energie – pozice 100 mm, styčnickový plech, rychlost II.	50
Obr 33	Průměrná rychlost – pozice 160 mm, styčnickový plech, rychlost I.....	51
Obr 34	Průměrná rychlost – pozice 160 mm, styčnickový plech, rychlost II.	51
Obr 35	Intenzita turbulence – pozice 160 mm, mřížka, rychlost I.	52
Obr 36	Intenzita turbulence – pozice 160 mm, mřížka, rychlost II.....	52
Obr 37	Turbulentní kinetická energie – pozice 160 mm, mřížka, rychlost I.....	53
Obr 38	Turbulentní kinetická energie – pozice 160 mm, mřížka, rychlost II.	53
Obr 39	Průměrná rychlost – pozice 160 mm, mřížka, rychlost I.....	54
Obr 40	Průměrná rychlost – pozice 160 mm, mřížka, rychlost II.	54

Bibliografie

- [1] CRESPO, A. a J. HERNÁNDEZ. Turbulence characteristics in wind-turbine wakes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [online]. 1996, **61**(1), 71–85 [vid. 2023-02-12]. ISSN 0167-6105. Dostupné z: doi:10.1016/0167-6105(95)00033-X
- [2] PROF. ING. VÁCLAV URUBA, CSc. *Turbulence*. B.m.: České vysoké učení technické v Praze, 2014.
- [3] BLEJCHAŘ, Tomáš. Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava TURBULENCE MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ-CFX učební text Tomáš Blejchař. 2012.
- [4] SCHWANGMAIER, Jarmil. *Viřivost proudového pole (vorticity) | SVS FEM s.r.o.* [online]. [vid. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/blog/virivost-proudoveho-pole>
- [5] STROJNÍ, Fakulta a Jaroslav JANALÍK. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA HYDRODYNAMIKA A HYDRODYNAMICKÉ STROJE. nedatováno.
- [6] LANEVILLE, Andre. *Effects of turbulence on wind induced vibrations of bluff cylinders*. British Columbia, 1973. The university of British Columbia.
- [7] ZUBÍK, Pavel. *Thezis disertační práce* [online]. 2020 [vid. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/zkladn2.htm>
- [8] DYNAMICS, Dantec. *Measurement Principles of PIV – Dantec Dynamics: Precision Measurement Systems and Sensors* [online]. 2020 [vid. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/particle-image-velocimetry-piv/measurement-principles-of-piv/>
- [9] DANTEC MEASUREMENT TECHNOLOGY. *FlowMap – Particle image velocimetry instrumentation*. 1998.
- [10] NOŽIČKA, Jiří a Dan NOVOTNÝ. *ÚVOD DO PROBLEMATIKY PIV – PDF Free Download* [online]. 2016 [vid. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://adoc.pub/uvod-do-problematiky-piv.html>
- [11] PIV_MANUAL. *PIV_manual.pdf*.
- [12] LAVISION. *Cameras for PIV* [online]. 2021 [vid. 2021-06-19]. Dostupné z: <https://www.lavision.de/en/products/cameras/cameras-for-piv/index.php>
- [13] KOPECKÝ, Václav. *Metody laserové anemometrie v experimentální mechanice tekutin*. 2001.
- [14] LEONARDO TECHNOLOGY, AUTOMATIZACE PRŮMYSLOVÉHO ZANČENÍ. *Princip pevnolátkových Nd: YAG laserů se zeleným světlem 532 nm – Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení* [online]. [vid. 2021-06-15]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-se-zelenym-svetlem-532-nm>
- [15] MELLING, A. *Tracer particles and seeding for particle image velocimetry*. 1997.
- [16] TSAO, Chih-Hsiang a Ing Petra DANČOVÁ. *Assembling and testing of PIV system 2302T010-Machines and Equipment Design*. 2018.
- [17] LAVISION. *LaVision – Seeding particles* [online]. 2020 [vid. 2020-12-25]. Dostupné z: <https://www.lavision.de/en/applications/fluid-mechanics/piv-system-components/seeding-particles/index.php>

- [18] KEANE, R, D a R, J ADRIAN. *Theory of cross-correlation analysis of PIV images*, *Applied Scientific Research*. 1992.
- [19] WESTERWEEL, J, C POELMA, K KIGER a Ken KIGER. *Introduction of Particle Image Velocimetry Slides largely generated by*. nedatováno.
- [20] *Constant Temperature Anemometry (CTA) | Thermal Anemometer* [online]. [vid. 2022-10-31]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/constant-temperature-anemometry-cta/>
- [21] JORGENSEN, Finn E. *How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a practical guide*. 2002
- [22] DRASKOVIC, Neda. Measurement methods in turbulent flows. *Norwegian University of Science and Technology*. 2017, (October).
- [23] FERRO, Marco. *Experimental study on turbulent pipe flow*. B.m., 2012. Stockholm.
- [24] ADVANCED THERMAL SOLUTIONS. Qpedia. 2007, 13–17.