



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

MĚŘENÍ RYCHLOSTNÍCH PROFILŮ ZA VÍŘIČEM

VELOCITY PROFILE MEASUREMENT DOWNSTREAM OF SWIRLER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VOJTĚCH ZEJDA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ VONDÁL, Ph.D.

BRNO 2015

ABSTRAKT

Hořáky jsou klíčová zařízení procesních pecí, jež významně ovlivňují tvorbu emisí při spalovacím procesu. Pro vývoj moderních low – NO_x hořáků je nezbytné znát přesnou podobu proudění, které generuje axiální lopatkový vířič spalovacího vzduchu uvnitř tohoto hořáku. Ke zjištění proudového pole se využívá numerické modelování proudění (CFD). Jedná se o matematický nástroj, jehož predikce je vhodné validovat naměřenými daty. Proto bylo rozhodnuto o experimentálním změření rychlostních profilů vybraných vířičů, jež budou využity pro validaci CFD modelů. Tato práce popisuje všechny úkoly, které bylo třeba vykonat před samotným měřením, a také průběh samotného měření.

Pro toto měření rychlosti byla vybrána metoda žárové anemometrie. Vystala tak nutnost vytvořit výpočtový program, který dokázal naměřené data zpracovat. V návaznosti na zvolenou metodu byla sestavena měřicí trať, která využila ke svému účelu i části zařízení zkušebny hořáků. Pro přesné polohování sondy bylo navrženo a zkonstruováno polohovací zařízení, které umí nastavovat sondu do požadované polohy s dostatečnou přesností. Po testovacím měření byla sestavena síť měřicích bodů.

Vlastní měření probíhalo dvou - drátkovou sondou a celkem bylo proměřeno pět různých axiálních vířičů. Z důvodu velkého objemu dat, potřeby vlastního nastavení výpočtu a důkladné kontroly nad činností vyhodnocovacího softwaru byly dodány podklady pro tvorbu vlastního softwaru. Pro každý vířič byly vyhodnoceny rychlostní profily a vírová čísla. Na závěr byla získaná data graficky zpracována a vzorově vyhodnocena pro jeden vířič. Z naměřených dat se zjistilo, že v určitých oblastech za vířičem dochází k protisměrnému rotačnímu proudění vzduchu. Dále byly také popsány zjištěné nedostatky, které se v průběhu měření vyskytly, a byla zhodnocena celková nejistota měření. V případě potřeby dalšího měření tak čtenář může získat všechny potřebné znalosti a nástroje, které jsou pro měření rychlostních profilů za vířičem potřeba.

KLÍČOVÁ SLOVA

vířič, vířivé proudění, rychlostní profily, low – NO_x hořák, vírové číslo, žárová anemometrie

ABSTRACT

A burner is very important device in process furnaces that significantly affect the production of emissions during the combustion process. One of the key things in development of the modern low-NO_x burners is the evaluation of flow field downstream of an axial blade swirler inside the burner. The computational fluid dynamics (CFD) is often used to predict the attributes of the flow. Predicted values should be validated with measurement. It is the reason why the velocity fields for several chosen swirlers were measured. The hot wire anemometry was chosen and the dual-sensor probe was used during the measurement. The data can be then used for CFD validation.

This thesis describes procedure of measurement set-up. The experimental facility was designed according to the anemometry method. The new probe traversing system was designed, which provides desired accuracy.

Five different swirlers were measured. Large data set, need for customized post-processing and control over calculation procedures lead to new software design. For each swirler the velocity profiles were gathered and the swirl numbers calculated. That final data were transferred in to graphical format. Uncertainty of measured data was calculated. Results show counter-rotating flow in some areas closed to the swirler. Some drawbacks of current measurement set-up are discussed. Based on the thesis reader can obtain the information and knowledge for consequent measurements of swirl burners velocity profiles.

KEYWORDS

swirler, swirl flow, rychlostní profily, low – NO_x burner, swirl number, hot wire anemometry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZEJDA, V. *Měření rychlostních profilů za vířičem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 83s.
Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vondál, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jiřího Vondála, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23. května 2015

.....
Vojtěch Zejda

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jířímu Vondálovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při tvorbě této diplomové práce, jakož i za praktickou pomoc při vlastním měření. Dále děkuji panu Miroslavu Frňkovi z firmy KOVORYS s.r.o., který mi byl ochotně nápomocen při výrobě komponent pro měření. Velké poděkování patří mým rodičům, že mě po celou dobu studia všestranně podporovali.

OBSAH

Seznam použitých symbolů	11
1 Úvod	14
2 Problematika procesních hořáků	16
2.1 Vliv hořáků na složení spalin.....	16
2.2 Mechanismus vzniku NO _x	17
2.3 Způsoby zabránění vzniku NO _x	18
3 Vířiče v procesních hořácích	20
3.1 Funkce vířiče v hořáku	20
3.2 Popis řešeného hořáku a jeho vířičů	21
3.3 Matematické srovnání vířivého proudění	24
3.4 Výběr a odzkoušení vířiče	25
4 Metoda měření rychlostních profilů	26
4.1 Výběr vhodné metody.....	26
4.2 Fyzikální princip žárové anemometrie	26
4.3 Praktické možnosti žárové anemometrie	27
4.4 Komponenty pro měření	28
4.4.1 Sonda a držák sondy	29
4.4.2 Polohovací systém	30
4.4.3 CTA anemometr	30
4.4.4 A/D převodník	30
4.4.5 Kalibrační soustava.....	31
4.4.6 CTA Software.....	31
4.5 Popis práce a nastavení před měřením.....	31
4.5.1 Hardwarové nastavení	31
4.5.2 Softwarové nastavení.....	32
4.5.3 Nastavení teplotní korekce	32
4.5.4 Rychlostní kalibrace	33
4.5.5 Směrová kalibrace	35
5 Návrh doplňujícího vybavení pro měření	39
5.1 Základní požadavky na zařízení.....	39
5.2 Popis měřicí tratě	39

5.2.1	Popis zkušebny hořáků ÚPEI	39
5.2.2	Požadavky na konstrukci	40
5.2.3	Popis potrubní trasy	41
5.2.4	Popis nosné konstrukce	42
5.2.5	Popis uchycení víříče	42
5.2.6	Montáž a demontáž měřicí tratě	45
5.3	Návrh polohovacího zařízení	45
5.3.1	Požadavky na traverzovací zařízení	45
5.3.2	Popis konstrukce traverzéro	45
5.3.3	Popis elektrotechnického ovládání	47
5.3.4	Doplňující příslušenství	48
6	Příprava na měření	50
6.1	Vytvoření výpočtového programu	50
6.1.1	Výpočet vektorů rychlosti	50
6.1.2	Výpočet vírového čísla	51
6.1.3	Výpočet průtoku	52
6.2	Výběr víříčů k proměření	53
6.3	Výpočet geometrického vírového čísla	55
6.4	Přípravná měření	55
6.4.1	Určení vzorkovací frekvence	55
6.4.2	Určení počtu vzorků	56
6.4.3	Vytvoření měřicího plánu	56
6.5	Systém třídění dat	60
7	Měření	61
7.1	Sestavení měřicích komponent	61
7.2	Průběh měření	63
7.3	Zpracování naměřených dat	64
8	Výčet nejistot měření	66
8.1	Vyčíslitelné nejistoty měření	66
8.2	Ostatní nejistoty měření	69
9	Vyhodnocení získaných dat	71
9.1	Vyhodnocení rychlostních profilů	71
9.2	Srovnání průtoku z rychlostních profilů	77

9.3 Srovnání vırového čísla	77
10 Poznatky pro další měření	79
11 Závěr.....	80
Použitá literatura.....	81
Seznam příloh.....	83

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

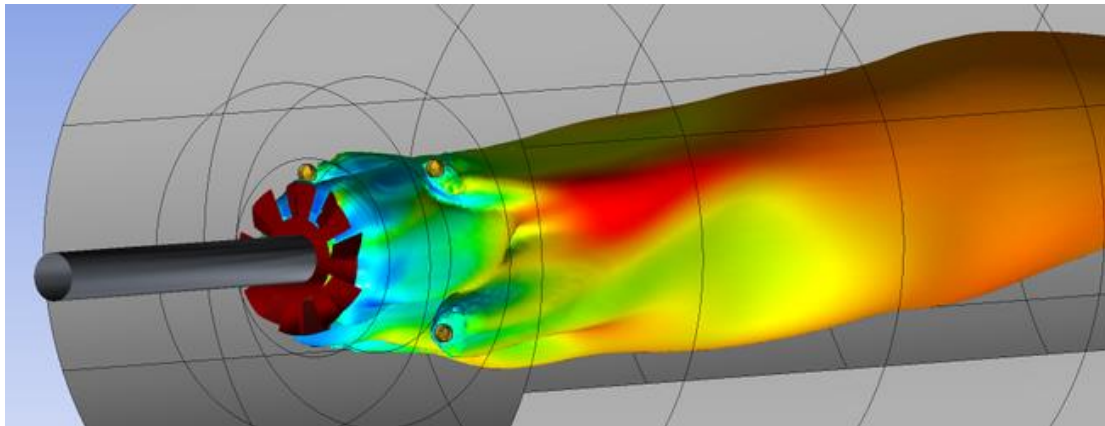
<i>symbol</i>	<i>význam</i>	<i>jednotka</i>
d	průměr kanálu	m
d_1	průměr středového otvoru víříče	m
d_2	průměr prstence víříče	m
f_1	maximální frekvence signálu	Hz
k_1	koeficient směrové citlivosti drátku 1	-
k_2	koeficient směrové citlivosti drátku 2	-
k_T	kinetická energie turbulence	$m^2 s^{-2}$
m	faktor teplotního zatížení	-
n	aktuální natočení víříče	-
n_1	normálová osa drátku 1	-
n_2	normálová osa drátku 2	-
t_w	teplota povrchu elementu	$^{\circ}C$
t_{∞}	teplota okolní proudící látky	$^{\circ}C$
r	poloměr	m
u	předpokládaná nejistota měření	%
u'	nejistotu vedlejších vlivů	%
u''	axiální rychlost v měřicím bodě	ms^{-1}
u_{CU}	celková nejistota měření vektoru U	%
u_{CV}	celková nejistota měření vektoru V	%
u_{vlh}	odchylka způsobená diferencí vlhkosti	-
$u_{\rho,P}$	odchylka způsobená tlakovou diferencí	-
$u_{\rho,T}$	odchylka způsobená teplotní diferencí	-
x	vodorovná osa souřadného systému	-
y	svislá osa souřadného systému	-
$z_a/2$	proměnná závislá na úrovni spolehlivosti	-
A	plocha průtočného průřezu	m^2
$C_{0...4}$	koeficienty rychlostní kalibrace	-
D	průměr kanálu	m
D_V	velký průměr víříče	m
E	vstupní napětí pro rychlostní kalibraci	V
E_{CORR}	napětí korigované podle teploty	V
E_1	napětí změřené při teplotě T_{∞}	V
G_{θ}	tangenciální moment hybnosti proudění	$kgm^2 s^{-1}$
G_X	axiální moment hybnosti proudění	$kgm^2 s^{-1}$
I	proud procházející elementem	A
N	počet vzorků	-
N_P	počet měřicích poloh sondy	-
N_V	poslední natočení víříče	-

P	příkon žhaveného elementu	W
P_0	tlak při kalibraci	kPa
Q	tepelný tok ze žhaveného elementu	W
Q_V	objemový průtok	$m^3 s^{-1}$
R	poloměr kanálu	m
R_H	odpor žhaveného elementu	Ω
S	vírové číslo	-
SR	vzorkovací frekvence	Hz
S_G	geometrické vírové číslo	-
S_H	plocha žhaveného elementu	m^2
T_u	předpokládaná intenzita turbulence	%
T_{1U}	Intenzitu turbulence U_1	%.
T_{2U}	Intenzitu turbulence U_2	%.
T_W	teplota senzoru	$^{\circ}K$
T_0	referenční teplota při kalibraci	$^{\circ}K$
T_{∞}	teplota při měření	K
U	axiální složka vektoru rychlosti	ms^{-1}
U_0	vektor skutečné rychlosti	ms^{-1}
U_1	vektor rychlosti ve směru osy n_1	ms^{-1}
U_{1Mean}	průměrná rychlost U_1	ms^{-1}
U_2	vektor rychlosti ve směru osy n_2	ms^{-1}
U_{2Mean}	průměrná rychlost U_2	ms^{-1}
U_{vlh}	rychlost proudícího vzduchu pro výčet nejistot	ms^{-1}
U_{AV}	vektor průměrných axiálních rychlostí z natočení	ms^{-1}
U_{C1}	efektivní ochlazovací rychlost pro drát 1	ms^{-1}
U_{C2}	efektivní ochlazovací rychlost pro drát 2	ms^{-1}
U_{1RMS}	fluktuace rychlosti U_1	ms^{-1}
U_{2RMS}	fluktuace rychlosti U_2	ms^{-1}
V	tangenciální složka vektoru rychlosti	ms^{-1}
V_{AV}	vektor průměrných tangenciálních rychlostí z natočení	ms^{-1}
α	součinitel přestupu tepla konvekcí	$Wm^{-2}K^{-1}$
α_1	úhel, který svírá U_0 s osou n_1	$^{\circ}$
$-\alpha_2$	úhel, který svírá U_0 s osou n_2	$^{\circ}$
$\bar{\alpha}_1$	úhel, který svírá osa drátku n_1 s osou x	$^{\circ}$
$-\bar{\alpha}_2$	úhel, který svírá osa drátku n_2 s osou x	$^{\circ}$
γ	úhel lopatek víříče	$^{\circ}$
ρ	hustota proudícího média	$kg.m^{-3}$
φ	úhel natočení víříče vůči sondě	$^{\circ}$
Δ_U	odchylka vektoru U	%
Δ_V	odchylka vektoru V	%
ΔP	tlaková diference	kPa

ΔP_{wv}	diference vlhkosti vzduchu	kPa
ΔT	teplotní diference během experimentu	°C
θ	úhel vektoru skutečné rychlosti s osou x	°
ϕ	úhel mezi lopatkami víříče a osou potrubní trasy	°

1 ÚVOD

V současné praxi se neustále zvyšují nároky na spalovací zařízení, jak z hlediska efektivity provozu, tak i vzhledem k produkovaným emisím. Výzkum Ústavu procesního a ekologického inženýrství Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně (dále jen ÚPEI) zaměřující se na vývoj low – NO_x hořáků ukazuje, že návrh optimální geometrie hořáku úzce souvisí s co největším poznáním skutečného charakteru proudění uvnitř spalovací komory. Pro správné stabilní hoření musí být toto proudění značně turbulentní. Z tohoto důvodu jsou do zkoumaných hořáků instalovány vířiče s vhodnou geometrií, které zajišťují stabilní tvar plamene, a tím napomáhají ke snižování emisí. Pro možnosti hlubšího zkoumání procesu hoření byl vytvořen model hořáku a spalovací komory, který predikoval proudění plynů uvnitř spalovací komory při procesu hoření pomocí výpočtové metody počítačové dynamiky tekutin CFD (viz. obr. 1). Existující literatura však poukazuje na zvýšení nejistoty CFD predikce pro modely vířičů [1].



Obr. 1. Vymodelované proudění za vířičem vzduchu [6].

V minulosti již bylo provedeno mnoho měření nejen za účelem hlubšího poznání vířivého proudění, ale i vlivu tvaru vířiče a kanálu na toto proudění, jakož i porovnání různých měřicích metod. Například v rámci výzkumu NASA bylo provedeno experimentální měření vířivého proudění za axiálními vířiči, kde bylo provedeno mnoho měření za užití různých metod – vizuální zkoušky kouřem, pěti otvorovou Pitotovou trubicí a žárovou anemometrií, při které využili jedno-, dvou- a tří - drátkové sondy [2]. Metoda žárové anemometrie například použili pro výzkum intenzity víření pánové Chang aDhir, kde bylo vířivé proudění vzduchu generováno tangenciálně umístěnými tryskami [3]. R. J. Edwards řešil vývoj vířivého čísla rychlostního profilu za radiálním vířičem. Využili k tomu metodu kapalných krystalů a přesnost této metody validovali s měřením Pitotovou trubicí [4]. D. G. Sloan řešil možnosti využití používaných matematických modelů pro popis vířivého proudění. Vypočtené modely porovnávali z experimentálních dat získaných z různých izotermických studií [5]. Dr. Sheen řešil vliv změny Reynoldsova čísla a úhlu lopatek radiálního vířiče na vířivé číslo. K tomuto zkoumání využil metodu Laser Doppler anemometry (LDA) a jeho závěry lze využít pro navrhování optimálního tvaru vířičů [6].

Z uvedených příkladů vědeckých výzkumů je patrné, že problematika vířivého proudění je značně složitá a není snadné toto proudění modelovat. Proto bylo rozhodnuto, aby se predikované proudění za vířiči vzduchu porovnávalo se skutečnými rychlostními profily. Cílem této práce je připravit vše nezbytné pro celý experiment, provést proměření vybraných vířičů a výsledná data vyhodnotit.

2 PROBLEMATIKA PROCESNÍCH HOŘÁKŮ

V současnosti se procesní spalování paliva používá pro dva účely. Prvním a rozšířenějším účelem je výroba tepelné energie, která se uvolňuje při hoření. Druhým účelem je spálení odpadních látek, které není možné dál nijak využít a mnohdy jsou pro životní prostředí závadné až nebezpečné. V dřívější době se pro výrobu tepla spalovala především fosilní paliva. Z odpadu se pak spalovaly jen ty látky, které se daly spálit snadno, anebo byly opravdu nebezpečné.

V posledních letech ohledně spalování vystalo mnoho aspektů, které je potřeba řešit. Především se jedná o problém vyčerpatelné zásoby fosilních paliv, který nutí průmyslový svět hledat nová paliva. Nabízí se ke spalování využívat více odpadních produktů, čímž by se nejen snížila spotřeba fosilních paliv, ale zároveň by se tak řešil problém s likvidací odpadů. Spalování nekvalitního paliva s sebou ale přináší vyšší produkci škodlivin ve spalínách, což je v dnešní době, kdy veřejný zájem o ekologii stále roste a emisní limity se stále snižují, obtížně proveditelné. A tak rostoucí spotřeba tepelné energie spolu s ekologickými nároky ženou výzkum procesního spalování stále kupředu.

Výsledkem jsou dokonalejší spalovací zařízení, která dokáží ekologicky spalovat i obtížně hořlavé látky a která snižují spotřebu fosilních paliv. Správně navržená spalovna umožní vytěžit z paliva maximum tepelné energie a přitom vyprodukovat co nejmenší množství emisí.

2.1 VLIV HOŘÁKŮ NA SLOŽENÍ SPALIN

Jak již bylo naznačeno, současným trendem ve vývoji nových strojů a zařízení není hledání maximálního výkonu, ale kompromisu mezi požadovaným výkonem a nízkou produkcí emisí. Snižující se emisní limity vedly ke zkoumání škodlivin vznikajících při hoření a hlavně k hledání způsobu, jak tyto škodliviny omezovat a odstraňovat. Na základě tohoto výzkumu lze škodliviny vznikající při spalování dělit na:

- Škodliviny, jejichž vznik se téměř nedá ovlivnit vedením spalovacího procesu. Jejich množství je vázáno na složení spalovaného paliva. Patří sem např. SO_2 , Cl, F, tuhé částice atd.
- Škodliviny, jejichž vznik lze zcela nebo výrazně ovlivnit vedením spalovacího procesu. Jedná se o CO a obecně nazývaných NO_x (což jsou NO, NO_2 , N_2O_3 , N_2O_4 ,...)
- Produkty hoření, které provázejí každé spalování fosilních paliv, ale legislativně se nepovažují za škodlivé. Jedná se o CO_2 a H_2O .

Jak z druhého bodu vyplývá, některým škodlivinám lze zabránit vhodným způsobem spalování. Největší důraz je zde kladen především na vznik oxidů dusíku (dále NO_x), které se z hlediska dopadů na životní prostředí a zdraví člověka považují za nebezpečnější než oxid uhelnatý [8]. Nebezpečí NO_x spočívá především v tom, že velmi rychle reagují s ozónem a přecházejí tak na kyselinu dusičnou, která reaguje s prachovými částicemi. Tím vznikají tuhé částice, které jsou z atmosféry odstraňovány jednak sedimentací a jednak vymýváním

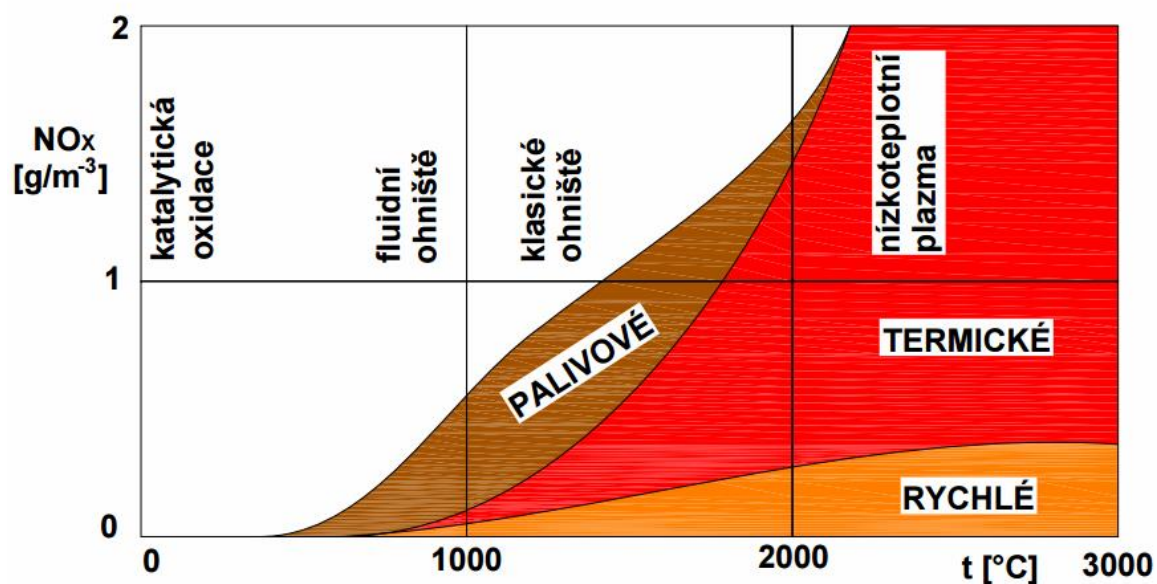
srážkovou činností (tzv. kyselá dešť) [9]. Tato kyselina se v životním prostředí projevuje náchylností rostlin na mráz a plísň, ve vodách pak zvýšenou tvorbu vodních rostlin a řas. Z hlediska lidského zdraví způsobují zvýšené koncentrace NO_x dýchací potíže a náchylnost k nádorovým onemocněním [10]. Správně navržený hořák spolu se spalovací komorou by měl produkovat minimum NO_x . V případě, že je produkce NO_x vysoká, je nutné přidávat další zařízení na čištění spalin.

2.2 MECHANIZMUS VZNIKU NO_x

Dříve než bude možno popsat způsoby zabránění vzniku NO_x , je potřeba přiblížit mechanismus, kterým tyto škodliviny vznikají. Z možných forem oxidů dusíku jsou termodynamicky schopné existence pouze NO – oxid dusnatý a NO_2 – oxid dusičitý. Tyto plyny vznikají při teplotách nad $1100\text{ }^\circ\text{C}$. Tvorba NO se řídí těmito mechanismy:

- oxidací vzdušného dusíku v plamenu (termický NO)
- v oblasti nejvyšší teploty plamene při spalování uhlovodíkových paliv (promptní NO)
- oxidací dusíku obsaženého v palivu (palivový NO)

Oxid dusičitý NO_2 vzniká sekundárně dodatečnou oxidací NO a to i za mnohem nižších teplot - pod $700\text{ }^\circ\text{C}$. Z celkového objemu oxidu dusnatého ve spalinách se průměrně 90 % přemění na oxid dusičitý. Intenzita tvorby NO při spalování je tedy závislá na množství kyslíku ve spalované směsi plynu a vzduchu a na teplotě plamene (viz. obr. 2). Závislost produkce NO na koncentracích N_2 a O_2 je exponenciální. V souvislosti s touto závislostí je zde také ovlivnění tvorby NO dobou setrvání N_2 a O_2 v pásmu nejvyšších teplot. Tato závislost je lineární [11].



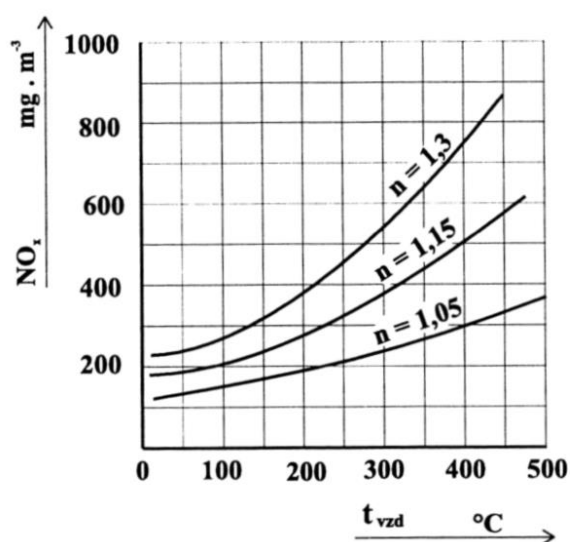
Obr. 2. Tvorba NO_x v závislosti na teplotě [8].

Celkově ovlivňují tvorbu NO_x následující faktory:

- teplota plamene
- koncentrace kyslíku v plynovzdušné směsi
- doba setrvání v pásmu vysokých teplot

K množství NO_x produkovanému během vlastního procesu hoření je třeba ještě připočítat objem NO_x vznikajících v závislosti na použitém palivu. Obecně platí, že spaliny tuhých a kapalných paliv obsahují více NO_x než spaliny plyných paliv [11]. Je to dáno jednak množstvím dusíku obsaženého v samotném palivu a jednak vyšším přebytkem spalovacího vzduchu, který je u tuhých a kapalných paliv nezbytný k jejich dokonalému hoření. Objem palivových NO_x nelze tedy nijak ovlivnit vedením spalovacího procesu.

Výzkumným měřením je však dokázáno, že špatně navržený hořák, nebo nesprávný spalovací režim výrazně zvyšuje koncentraci NO_x ve spalinách. V rámci využití zbytkového tepla spalin (snížení komínové ztráty) se často v průmyslu používá předehřev spalovacího vzduchu. Předehřev spalovacího vzduchu výrazným způsobem snižuje energetickou náročnost spalování. Negativním jevem je však zvýšení teploty plamene, se kterou prudce roste i koncentrace NO_x ve spalinách, což je znázorněno na obrázku 3.



Obr. 3. Obsah NO_x ve spalinách vírového hořáku v závislosti na teplotě spalovacího vzduchu [11].

2.3 ZPŮSOBY ZABRÁNĚNÍ VZNIKU NO_x

Pokud jsou známy faktory, které ovlivňují tvorbu NO_x , lze se při návrhu spalovacích zařízení zaměřit na eliminaci těchto faktorů a vytvořit tak nepříznivé prostředí pro tvorbu NO_x . První faktor - teplotu plamene - lze snížit recirkulací spalin, tedy přiváděním části spalin, které už teplo odevzdaly, zpět k ústí hořáku. Tím se sníží rychlost hoření, což vede k potlačení výskytu teplotních špiček plamene, které tvoří hlavní zdroj produkce termických NO_x [1]. Stejněmu účelu slouží i vstřikování vody nebo vodní páry do plamene. U atmosférických hořáků lze

odvádět teplo z plamene pomocí kovových nebo keramických tyčí do chladnějších oblastí pece [11].

Aby byl potlačen druhý faktor - snížení koncentrace kyslíku - je nutné optimalizovat přebytek vzduchu, kterého musí být přivedeno jen takové množství, kdy se ještě zajistí dokonalé spalování paliva (což znamená dodržení emisních limitů pro tvorbu CO), ale přitom se neumožní vytváření NO_x. Toho lze dosáhnout odstupňovaným přívodem buď paliva (fuel stage), nebo vzduchu (air stage). V prvním případě se v prvním stupni přivádí veškerý vzduch, ale jen část paliva. Hoření tak probíhá s vysokým přebytkem vzduchu (je nadstechiometrické), což vede k tzv. podchlazenému plamenu. Ve druhém stupni se přivede zbytek paliva, které reaguje se zbylým kyslíkem. V tomto stupni už tvorbu NO_x ovlivňují spaliny z předchozího stupně. V druhém případě se do prvního stupně přivádí veškeré palivo a část spalovacího vzduchu, takže následné hoření je podstechiometrické, kdy nemůže dusík reagovat s kyslíkem, kterého je nedostatek. Přebytečné palivo z prvního stupně shoří ve druhém stupni se sekundárně přiváděným vzduchem [12].

Potlačení posledního faktoru spočívá ve zkrácení doby setrvání reagujících složek (O₂ a N₂) v pásmu vysokých teplot. Toho se docílí snížením objemu plamenů a jejich délek. A to buď rozdělení velkého hořáku o vysokém výkonu na několik menších s nižšími výkony, anebo úpravou hořáku, kdy se rozdělí spalované směsi paliva a vzduchu do většího počtu výtokových otvorů o menších průměrech a zintenzivnění turbulence jejich toku. Za tímto účelem se do hořáků instalují tzv. vířiče. Jejich přesná funkce bude popsána v následující kapitole.

Kombinací výše uvedených metod pro potlačení tvorby NO_x lze i u velmi výkonných hořáků dosáhnout nízkých emisí. Takové hořáky jsou obecně nazývány low – NO_x hořáky.

Pokud nelze ovlivněním spalovacího procesu dosáhnout dostatečně nízkých emisí (např. kvůli typu spalovaného paliva), je nutno vzniklé NO_x dodatečně odstraňovat. Tento proces se nazývá denitrifikace. Pro denitrifikaci se používají dva principy. První odstraňuje NO_x pomocí sloučenin na bázi amoniaku, které se přidávají do spalin za působení katalyzátoru TiO₂ (oxid titaničitý) při teplotách kolem 400°C. Druhý princip spočívá v přidávání amoniaku při teplotách spalin 900 až 1000°C. Jakékoliv metody sekundární denitrifikace jsou však řádově dražší, než výše popsané primární metody, které dokáží potlačit vznik NO_x [11].

3 VÍŘIČE V PROCESNÍCH HOŘÁCÍCH

Vířiče jsou speciální komponenty hořáků, které mají za cíl primárně stabilizovat plamen a dodatečně napomáhat snížit produkci NO_x vznikajících při hoření. Protože cílem této práce je právě proměření vířičů k získání dat, ze kterých pak bude dále posuzován jejich skutečný vliv na proudění spalovacího vzduchu, budou jejich specifika přiblíženy v samostatné kapitole. Na ukázkou je přiložen obrázku 4, na kterém je znázorněn axiální vířič spalovacího vzduchu.



Obr. 4. Ukázka axiálního vířiče ze zkušebny hořáků ÚPEI.

3.1 FUNKCE VÍŘIČE V HOŘÁKU

Většina průmyslových hořáků využívá při spalování plyných a kapalných paliv odděleného přívodu spalovacího vzduchu a paliva do tělesa hořáku. Vlastní smíšení pak probíhá buď ve směšovací komoře anebo až v samotném spalovacím prostoru. Intenzita promíchávání pak závisí především na intenzitě turbulence. Tu lze ovlivnit konstrukčním uspořádáním hořáku. Při turbulentním spalování palivové směsi dochází k tzv. smíšenému způsobu spalování, tedy ke kombinaci difuzního a kinetického způsobu spalování. Poměr těchto způsobů spalování, tedy intenzitu směšování paliva se vzduchem, závisí na těchto parametrech hořáku [11]:

- intenzita směšování roste s rostoucí rychlostí obou proudů
- intenzita směšování roste s rozdílem rychlostí obou proudů
- intenzita směšování roste se zvětšováním úhlu styku obou proudů
- intenzita směšování roste se zmenšováním vzdálenosti obou proudů

Pro snížení tvorby NO_x se využívají takové parametry, které docílí co nejkratší délky plamene a co nejnižší teploty plamene. Proto při konstrukci hořáků je kladen důraz na poslední tři uvedené parametry. Takové hořáky se nazývají vířivé, neboť proudy spalovacího

vzduchu a paliva tvoří různé turbulentní víry, při kterých dochází k intenzivnímu promíšení a tak zkrácení doby potřebné ke shoření paliva [11].

Konstrukční prvek, který dokáže zvýšit rozdíl rychlostí obou proudů a zároveň zvětšit úhel styku obou proudů se nazývá víříč. Většinou se jedná o lopatky, které jsou na pevno umístěny do proudu média. Na těchto lopatkách se pak změní směr proudění, čímž se dosáhne zvětšení úhlu styku proudů, a zároveň se na nich rozbije rychlostní pole proudu, takže dojde ke zvětšení rozdílu rychlosti mezi oběma proudy. Nejčastěji se víříč instaluje do proudu spalovacího vzduchu, ale bývá umístěn i v proudu paliva, popř. v obou prouděch [1].

Dosud byl popisován vliv víříče na generované turbulentní proudění a z toho plynoucí vliv na tvorbu NO_x . Hlavní funkcí víříče v procesním hořáku je stabilizovat plamen. Stabilita plamene je u procesních hořáků jedním z nejdůležitějších kritérií. Stabilní plamen se vyznačuje rovnoměrným tvarem plamene, o stálé poloze a délce, bez různého kmitání nebo prošlehávání. Při nestabilním procesu hoření dochází ke zvýšenému výskytu teplotních špiček, které způsobují zvýšení produkce emisí. Ale hlavně u nestabilního plamene hrozí tzv. odtržení plamene, což je nežádoucí jev, při kterém nejenže dojde k přerušení spalovacího procesu, ale může při něm také dojít i k vážné havárii na zařízení spalovací komory a jejího příslušenství. Instalací víříčů, které generují vhodné proudění uvnitř spalovací komory a utváří tak rovnoměrné pole pro plamen. Riziko odtrhnutí plamene se značně snižuje, neboť při vířivém proudění spalovací směsi dochází k udržení plamene uvnitř jednotlivých vírů, takže i v případě náhlého uhasnutí plamene dojde opět k zapálení palivové směsi od těchto malých ohnisek [1].

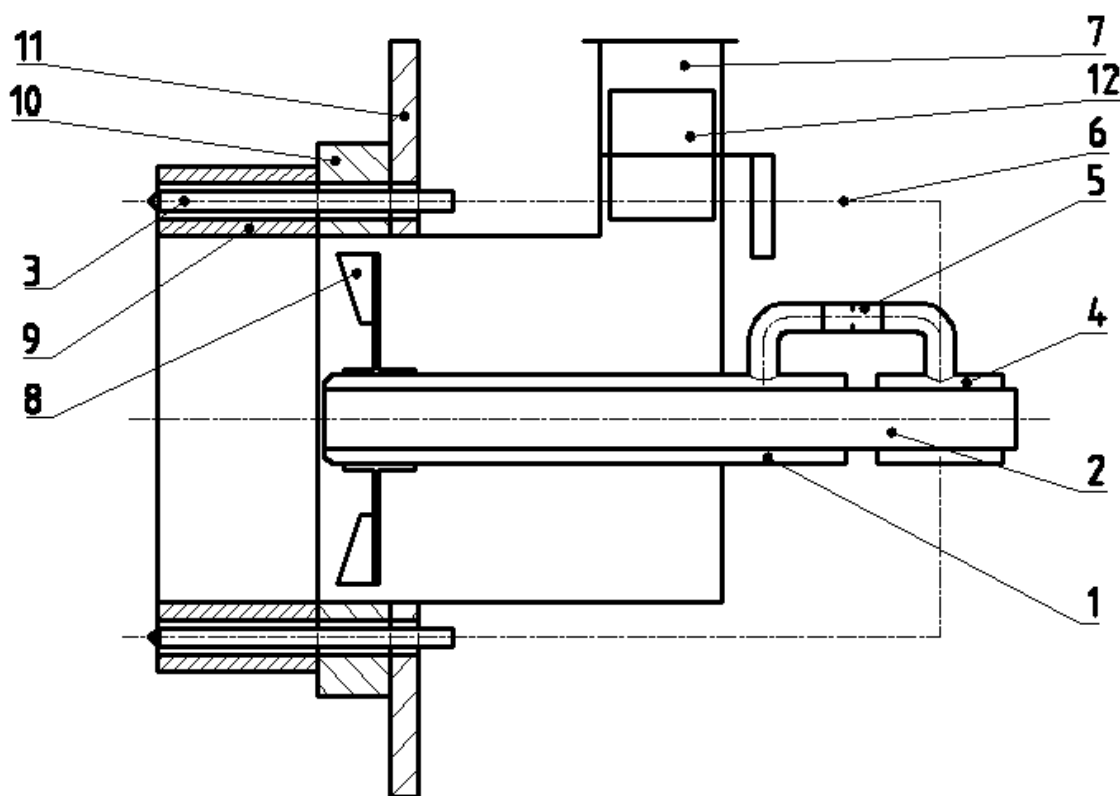
3.2 POPIS ŘEŠENÉHO HOŘÁKU A JEHO VÍŘIČŮ

Měřené víříče patří k low – NO_x hořáku, na kterém se provádí měření ve zkušebně hořáků ÚPEI. Jedná se o kombinovaný hořák, ve kterém je možné spalovat zemní plyn nebo zemní plyn společně s různými kapalnými palivy. Hořák má oddělené přívody spalovacího vzduchu a paliva. Vlastní promíšení paliva se děje až ve spalovací komoře. Konstrukce hořáku je znázorněna na obrázku 5. V ose hořáku se nachází dvouplášťová trubka o vnějším průměru 70 mm, v jejímž čele jsou umístěny primární trysky zemního plynu. Do této trubky je možno vložit trysku pro kapalná paliva. Tělo hořáku je vyrobeno z trubky o vnitřním průměru 300 mm. V prostoru mezi primární tryskou a tělem hořáku je přiváděn spalovací vzduch. Na primární trysce je pevně instalován axiální lopatkový víříč spalovacího vzduchu (viz obr. 6). Tělo hořáku je upevněno k nosné desce, kterou se uchycuje hořák ke spalovací komoře. Aby se zmenšil přenos tepla od plamene na nosnou desku, a tím i na celý hořák, je ze strany spalovací komory k nosné desce upevněno šamotové mezikruží – tzv. hořákový kámen. Do tohoto mezikruží jsou symetricky umístěny sekundární trysky zemního plynu.

Zemní plyn je přiváděn z boku hořáku do rozdělovací komory, ze které dále pokračuje do primárních a sekundárních trysek. Poměr proudícího plynu mezi primárními a sekundárními tryskami lze regulovat. K tomu slouží clonka, která se instaluje mezi rozdělovací komoru a

primární trysku. Spalovaný vzduch je do hořáku přiváděn shora a lze jeho množství regulovat škrticí klapkou. Celkový pohled na hořák je na obrázku 7.

V příslušenství tohoto hořáku je sada víříčů, které lze po demontování hořáku vyměnit. Tyto víříče mají stejný počet lopatek, liší se ale průměrem a úhlem sklonu lopatek. Víříče jsou vyrobeny z ocelového plechu o tloušťkách 3 nebo 4 mm. Na zadní straně víříčů (při pohledu ze spalovací komory) jsou symetricky přivařeny tři packy, ve kterých je vyřezán závit M5. Do těchto pack se zašroubovávají šrouby, kterými se víříč uchycuje (a také vystředuje) na středovou trubku.



Obr. 5. Nákres hořáku. 1) středová dvouplášťová trubka; 2) prostor pro přívod a trysku kapalného paliva; 3) sekundární trysky; 4) rozdělovací komora; 5) regulační clonka; 6) přívod paliva do sekundárních trysek; 7) přívod spalovacího vzduchu; 8) víříč; 9) hořákový kámen; 10) náboj; 11) nosná deska; 12) škrticí klapka spalovacího vzduchu.



Obr. 6. Pohled do těla hořáku na primární trysku zemního plynu s nasazeným vířičem spalovacího vzduchu. Spodní otvor slouží ke vložení pilota.



Obr. 7. Celkový pohled na demontovaný low – NO_x hořák laboratoře ÚPEI.

3.3 MATEMATICKÉ SROVNÁNÍ VÍŘIVÉHO PROUDĚNÍ

Z předchozího textu je zřejmé, že možnosti řešení tvaru víříče jsou v takřka neomezené. Přitom lze dosáhnout stejného vířivého proudění různou geometrií víříčů. Z hlediska hořáků pak i odlišné vířivé proudění může mít na proces hoření stejný efekt. V případné nutnosti výměny víříče v hořáku tak není nezbytně nutné, aby vyměněný víříč měl stejnou geometrii, ale aby charakter proudění za víříčem dosáhl stejného účinku. Z tohoto důvodu bylo zavedeno tzv. vírové číslo S , které charakterizuje vířivé proudění. Literatura [13] uvádí jeho základní definici:

$$S = \frac{G_{\theta}}{G_X \cdot D/2} \quad (3-1)$$

kde: S vírové číslo (-)
 G_{θ} tangenciální moment hybnosti proudění ($\text{kgm}^2\text{s}^{-1}$)
 G_X axiální moment hybnosti proudění ($\text{kgm}^2\text{s}^{-1}$)
 D průměr kanálu (m)

Průměr D představuje průměr kanálu, uvnitř kterého je víříč umístěn. Výpočet momentu hybnosti proudu v jednotlivých směrech uvádí literatura [14], která zanedbává vliv tlakové ztráty. Výpočet vírového čísla tak ve finále vypadá takto:

$$S = \frac{\int_0^R U \cdot V \cdot \rho \cdot r^2 \cdot dr}{R \cdot \int_0^R U^2 \cdot \rho \cdot r \cdot dr} \quad (3-2)$$

kde U axiální složka vektoru rychlosti (ms^{-1})
 V tangenciální složka vektoru rychlosti (ms^{-1})
 r poloměr (m)
 R maximální poloměr = poloměr kanálu (m)
 ρ hustota proudícího média (kgm^{-3})

Jak je ze vzorce patrné, pro výpočet vírového čísla tímto způsobem je nutné znát axiální a tangenciální složku rychlosti proudu, což znamená mít naměřené rychlostní profily za daným víříčem. Už bylo zmíněno, podoba rychlostních profilů však značně závisí na tvaru víříče. Literatura [13] uvádí vztah pro výpočet vírového čísla, který je založen pouze na geometrických údajích.

$$S_G = \frac{2}{3} \cdot \left[\frac{1 - (d_2/D)^3}{1 - (d_2/D)^2} \right] \cdot \tan\phi \quad (3-3)$$

kde S_G geometrické vírové číslo (-)
 d_2 průměr prstence víříče (m)
 ϕ úhel mezi lopatkami víříče a osou potrubní trasy ($^{\circ}$)

Průměrem prstence je myšlena centrální oblast víříče, přes kterou nemůže procházet médium, takže prstenec ohraničený průměry D a d_2 představuje plochu, skrz kterou může proudit médium, které obtéká víříč. Výpočet založen na geometrii víříče nemůže být přirozeně tak přesný, jako výpočet vycházející z rychlostních profilů, přesto je však užitečný. Znalostí vírového čísla tak lze posuzovat případnou zaměnitelnost dvou různých víříčů do stejného hořáku.

3.4 VÝBĚR A ODZKOUŠENÍ VÍŘIČE

V technické praxi se přesné navrhování tvaru víříče příliš nepoužívá. Problém výše uvedeného výpočtu vírového čísla spočívá v tom, že nelze dopředu s dostatečnou přesností odhadnout, jaké vírové číslo bude pro daný hořák skutečně potřeba. Jeho velikost závisí na mnoha faktorech, jako je skutečná geometrie hořáku a spalovací komory, skutečné fyzikální vlastnosti proudících látek aj. Proto se výpočet vírového čísla používá pro porovnání víříčů mezi sebou, což umožňuje v případě potřeby nahradit jeden víříč jiným tvarově odlišným. Toto však lze až po ověření, že původní víříč v daném hořáku pracoval správně.

Při návrhu nového hořáku se obvykle vyrobí široká škála různě tvarovaných víříčů, které se poté postupně odzkouší, až se nakonec vybere takový víříč, se kterým hořák nejlépe splňuje požadované parametry [12]. Další metoda, která se využívá při vývoji vhodného tvaru víříče, spočívá v použití průhledné makety hořáku, do které se instalují zkoušené víříče a pomocí kouře se tak vizuálně hodnotí proudění vytvořené za víříčem. U této metody je však nutné zohlednit skutečnost, že proudící média při zkoušce víříče mají jinou teplotu a tím i jiné fyzikální vlastnosti, než jaké pak budou mít v provozu [15].

V případě zkušebny hořáků ÚPEI se využívá první metoda, tedy do zkoumaného hořáku se postupně instalují víříče, až se vybere ten nejvhodnější. Při výrobě samotných víříčů nebyl jejich tvar nijak zvlášť navrhován, jejich podoba byla zvolena na základě zkušeností s víříči z jiných hořáků. Při jejich návrhu byla pouze vypočtena tlaková ztráta pro každý víříč.

4 METODA MĚŘENÍ RYCHLOSTNÍCH PROFILŮ

Před navržením měřicí tratě a dalších příslušenství bylo nutno napřed určit metodu, kterou se budou rychlostní profily měřit. Na základě vybrané metody pak vyplynou konkrétní požadavky na měřicí trať.

4.1 VÝBĚR VHODNÉ METODY

Pro vytvoření odpovídajících rychlostních profilů vířivého proudění bylo zapotřebí změřit velikost rychlostí ve dvou na sebe kolmých směrech a jejich flukтуаční složky. Pro takové měření existuje mnoho metod, ovšem každá metoda má své omezení, a tak je její výběr závislý na typu experimentu. V úvahu připadala metoda měření pomocí Pitotovy trubice, která umožňuje proměření i 2D proudění, ale pro vyšší turbulence nemá tato metoda dostatečně velkou vzorkovací frekvenci. Existují způsoby jak tento nedostatek odstranit, ovšem takto vylepšené sondy jsou již velmi nákladné [16]. Další možnou metodou je tzv. LDA (Laser Doppler Anemometry), kde se na základě Dopplerova efektu měří laserový paprsek, který je rozptylován částicemi unášenými v měřeném proudu tekutiny. Měření touto metodou je velmi přesné, neboť není nutné jej kalibrovat a měření není závislé na okolním tlaku a teplotě. Nevýhodou je nutnost dodávat do zkoumaného proudu média částice pro rozptyl paprsku [17]. Metoda PIV je novější než LDA a liší se od ní tím, že měří rychlostní pole v rovině, nebo dokonce i v prostoru, kdežto LDA jen v bodě. Do měřeného proudění se opět přimíchávají částice, které se osvětlí pomocí tzv. světelného nože, což je úzký světelný svazek vedený z laseru upravený tak, aby osvětloval jen vybranou rovinu měření. Osvětlené částice se pak snímají pomocí digitální kamery nebo fotoaparátu a výsledný obraz představuje skutečnou podobu proudění. Z těchto obrazů se dále získají jednotlivé složky rychlosti a jejich fluktuace. Nevýhodou této metody je opět nutnost přidávání částic do proudu [16]. Poslední metodou, kterou lze získat požadované měření, je žárová anemometrie, která umožňuje bodově měřit jak rychlost proudění, tak i flukтуаční složky proudění. Přestože není natolik přesná jako metody LDA nebo PIV, tak se tato metoda používá právě pro měření vysoce turbulentního proudění, neboť dokáže snímat vyšší vzorkovací frekvenci než všechny výše uvedené metody [2]. Tato výhoda společně s nejpříznivější pořizovací cenou rozhodla o použití této metody.

4.2 FYZIKÁLNÍ PRINCIP ŽÁROVÉ ANEMOMETRIE

Metoda je založena na ochlazování sondy tokem proudícího média. Sondu tvoří různé elementy (drátek, vlákno, film,...), které mají různé tvary. Ochlazování probíhá konvencí, kdy je teplo z elementu sondy předáváno do okolního média. Platí zákon pro přenos tepla:

$$Q = S_H \cdot \alpha \cdot (t_w - t_\infty) \quad (4-1)$$

kde	Q	tepelný tok ze žhaveného elementu (W)
	S_H	plocha žhaveného elementu (m^2)
	α	součinitel přestupu tepla konvekcí ($Wm^{-2}K^{-1}$)
	t_w	teplota povrchu elementu ($^{\circ}C$)
	t_{∞}	teplota okolní proudící látky ($^{\circ}C$)

Elementy sondy jsou žhaveny elektrickým proudem. Příkon pro ohřev elementu je dán vztahem:

$$P = R_H \cdot I^2 \quad (4-2)$$

kde	P	příkon žhaveného elementu (W)
	R_H	odpor žhaveného elementu (Ω)
	I	proud procházející elementem (A)

Velikost tepelného toku ze sondy do proudícího média je přímo závislý na součiniteli přestupu tepla, který je závislý na rychlosti proudícího média. Když se položí rovnice (4-1) rovni rovnici (4-2), bude rychlost média obtékajícího sondu přímo úměrná příkonu elementu sondy [17]. Na základě tohoto poznatku lze použít dva způsoby měření rychlosti:

- žhavení konstantním proudem (CCA – constant current anemometry)
- žhavení na konstantní odpor, respektive teplotu (CTA – constant temperature anemometry)

Při měření byl použit druhý způsob, tedy žhavení na konstantní teplotu (CTA). Míra ochlazování je tak charakterizována výstupním elektrickým napětím na anemometru [18].

4.3 PRAKTICKÉ MOŽNOSTI ŽÁROVÉ ANEMOMETRIE

Po zjištění výše uvedených poznatků se podstatně rozšířily možnosti měření rychlosti tekutin. Dosud se uvažovalo, že v sondě je pouze jeden žhavený element. Tím lze změřit pouze rychlost proudění. Pokud se do senzoru umístí dva, popř. tři elementy, které mají rozdílnou směrovou citlivost a které jsou vůči sobě natočené, tak každý z nich bude měřit jiné hodnoty rychlosti. Z těch lze vypočítat dvě, popř. tři složky vektoru rychlosti proudícího média. Takže metodou žárové anemometrie lze snadno měřit 2D nebo i 3D proudění. V této jednoduchosti spočívá velká výhoda této metody. Dalšími výhodami jsou:

- malý měřicí bod (až $0,005 \text{ mm}^2$)
- vysoká přesnost (podle kalibrace a podmínkami měření)
- vysoká frekvence (až 400 kHz – dobré pro měření turbulentního proudění)
- velký rozsah měřících rychlostí (pro vzduch od 0,03 až 5 Ma)
- ve srovnání s jinými metodami příznivá cena

Sonda je také citlivá na další fyzikální veličiny jako je teplota, tlak a koncentrace, což může být někdy výhodné, někdy naopak nevýhodné. Jako hlavní nevýhody této metody se považuje:

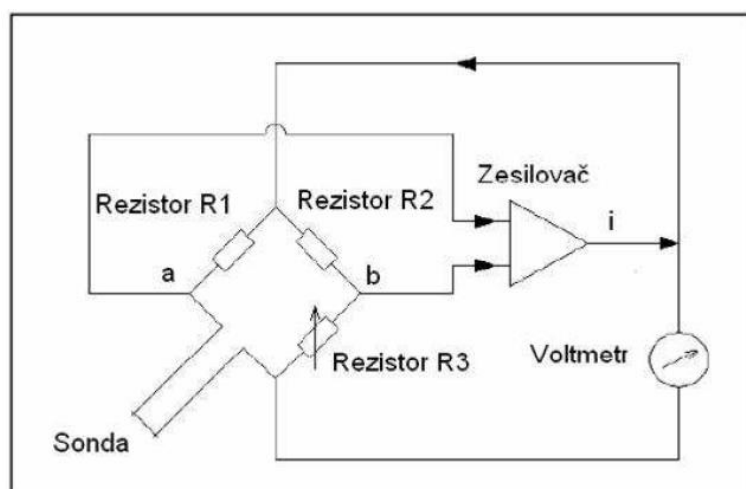
- intrusivní metoda
- křehkost sondy
- citlivost na znečištění
- neschopnost rozpoznat zpětné proudění

Toto jsou tedy možnosti a omezení žárové anemometrie [18]. Při návrhu měřicí tratě bylo nutné skloubit všechny požadavky, aby bylo dosaženo co nejpřesnější měření.

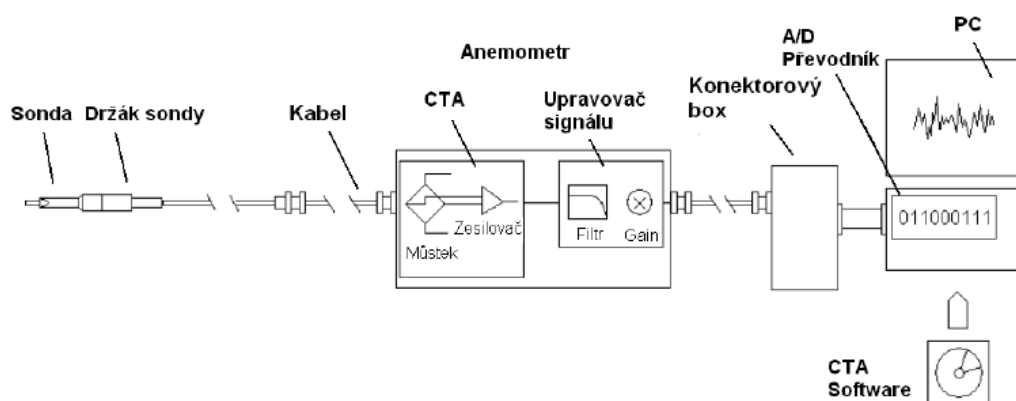
4.4 KOMPONENTY PRO MĚŘENÍ

Již bylo zmíněno, že velikost rychlosti je charakterizována výstupním napětím z anemometru. Schéma vlastního CTA anemometru je znázorněno na obrázku 8. Skládá se z Wheatstoneova můstku, operačního zesilovače a voltmetru. Při ochlazení sondy se zmenší její odpor, což je okamžitě indikováno snížením napětí mezi body a – b, na což reaguje operační zesilovač, který zvýší dodávané napětí do sondy a tak vrátí hodnotu jejího odporu na původní hodnotu. Tato změna je měřena voltmetrem [17].

K provedení měření však samotný CTA anemometr nestačí. Na obrázku 9 je zobrazeno zapojení se všemi nezbytnými komponenty. Nejvíce důležitý je kromě samotného anemometru A/D převodník, který převádí analogový signál na digitální, jehož parametry limitují maximální možnou vzorkovací frekvenci. K těmto komponentům patří navíc polohovací zařízení pro pohyb se sondou a také kalibrační přístroj. Dále jsou popsány komponenty, které byly pro měření rychlostních profilů použity. Všechny použité komponenty už byly zakoupeny od firmy Dantec Dynamics, bylo však nutno se s nimi důkladně seznámit.



Obr. 8. Schéma CTA obvodu [17].



Obr. 9. Schéma zapojení komponentů pro měření [17].

4.4.1 SONDA A DRŽÁK SONDY

Pro měření rychlostních profilů za vířičem byla vybrána dvou - drátková povlakovaná sonda typ 55R54. Její žhavené elementy tvoří dva křemíkové drátky o průměru 70 μm , které jsou povlakovány tenkou vrstvou niklu o tloušťce cca 1 μm . Oba drátky jsou uchyceny pozlacenými konektory k tělu sondy, kterou tvoří keramická trubička o průměru 2 mm. Tato sonda umožňuje měřit 2 D rychlostní profil, a to normálovou a tangenciální složku vektoru rychlosti o vstupním úhlu v rozsahu 90°. Předpokládá se, že pro naměření potřebných rychlostních profilů je takovýto měřicí rozsah dostatečný. Jak je z obrázku 10 patrné, sonda má žhavené drátky ve tvaru X a oba drátky má vůči tělu sondy otočené o 90° dopředu. Tímto předsazením drátků bude eliminováno možné ovlivnění měření vlastním tělem a držákem sondy. Tento typ sondy je díky svému povlaku nejméně náchylný na stárnutí drátků, což se projevuje jeho stálým měřicím odporem. K tomuto typu sondy byl pak vybrán držák 55H21.



Obr. 10. Sonda 55R54 s držákem.

4.4.2 POLOHOVACÍ SYSTÉM

Polohovací systém slouží k posunování sondy do předem vybraných měřicích bodů. Pro CTA měření lze zakoupit profesionální polohovací systémy (tzv. traverzéry), které mohou pohybovat se sondou ve všech osách a dokonce se sondou kolem jedné osy otáčet. Cena těchto traverzérů je však velmi vysoká, a proto bylo rozhodnuto vyřešit posunování sondy vlastním zařízením. Použité řešení bude popsáno v následující kapitole 5.3.

4.4.3 CTA ANEMOMETR

Byl zakoupen jeden CTA anemometr, který se prodává pod značkou MiniCTA typ 54T42. Toto zařízení obsahuje kromě vlastního CTA obvodu i tzv. low - pass filtr, který umožní filtrovat parazitní signály o frekvenci vyšší než 1, 3 a 10 kHz. Pro dvou - drátkovou sondu jsou však zapotřebí tato MiniCTA dvě. Druhé CTA tak bylo vždy na měření zapůjčeno z Leteckého ústavu Fakulty strojního inženýrství VUT. S ostatními komponenty se CTA anemometry propojí speciálními kabely, které mají přesně definovanou délku, a tím i jejich elektrický odpor. V tomto případě byly použity kabely délky 4 m s BNC konektory.

Pro potřeby měření by byl vhodnější tzv. StreamLine anemometr, který dovoluje zapojení až šesti měřicích drátků a umožňuje vždy před měřením provést nastavení pracovní teploty senzoru. To se provádí na základě změření odporu senzoru při teplotě okolí, aniž by senzorem procházel proud. Tímto se eliminuje vliv stárnutí sondy (a tím změna jejího odporu). Po tomto nastavení je tak určena teplota pro rychlost okolního proudění 0 ms^{-1} , což je výchozí bod pro kalibraci sondy. Pro filtrování výstupního signálu obsahuje filtry jak pro vysoké, tak i nízké frekvence (tzv. low-pass a high-pass filtr). Navíc hodnoty propustnosti těchto filtrů lze softwarově měnit [17]. Zařízení StreamLine je ovšem finančně velmi nákladné a proto nemohlo být pro požadované měření pořízeno. Z tohoto důvodu se zakoupilo podstatně levnější MiniCTA, které ale neumožňuje libovolné nastavení low-pass filtru a ani neumí měřit aktuální odpor senzoru. Při jeho použití se tak vychází z předpokladu, že chyba v měření způsobena změnou odporu senzoru, bude přijatelná. Skutečné odchylky se projeví při rychlostní i směrové kalibraci, která bude popsána dále.

4.4.4 A/D PŘEVODNÍK

Toto zařízení slouží k převodu analogového signálu, který vystupuje z CTA anemometru, do digitální podoby. Tím je umožněno tato data počítačově dále zpracovávat. Pro tento experiment byl použit převodník cDAQ-9171 od společnosti National Instruments osazený nástavbou NI9215 s BNC konektory, která umožňuje transformovat čtyři vstupní analogové signály, každý o maximální frekvenci 100 kHz a vstupním napětím od -10 do 10 V .

4.4.5 KALIBRAČNÍ SOUSTAVA

Sondu je nutné před měřením kalibrovat. Každá sonda vyžaduje rychlostní kalibraci. Pro ni je potřebná tryska, regulátor tlakového vzduchu a přesný tlakoměr, který vyhodnocuje skutečnou rychlost na ústí trysky. Nezbytný je teploměr pro snímání teploty prouděného vzduchu. Dále, protože se bude měřit rychlost ve dvou směrech, je nutná směrová kalibrace, ke které je kromě výše zmíněného vybavení potřeba natáčecí držák sondy s přesnou úhlovou stupnicí. Jak pro rychlostní, tak i směrovou kalibraci byl použit profesionální přístroj od Dantec Dynamics, který byl zapůjčen z oboru Techniky prostředí Energetického ústavu Fakulty strojního inženýrství VUT.

4.4.6 CTA SOFTWARE

Pro práci s naměřenými a následně digitalizovanými daty je nezbytný program, který dokáže komunikovat s A/D převodníkem. Pro měření byl zakoupen program StreamWare Pro v. 5.14, pomocí něhož byla realizována všechna měření. Pokud je zajištěna kompatibilita A/D převodníku, polohovacího systému a kalibrátoru, lze všechny úkony spojené s měřením provádět jen pomocí tohoto programu, včetně finálního vyhodnocení získaných dat.

4.5 POPIS PRÁCE A NASTAVENÍ PŘED MĚŘENÍM

Aby bylo možné měřit data, je nutné provést řadu nastavení a kalibrací. Všechny dále popisované činnosti jsou důležité a je třeba je vykonat s největší pečlivostí, neboť každá nepřesnost se může zásadně projevit jak při samotném měření dat, tak i při jejich následném vyhodnocení.

4.5.1 HARDWAROVÉ NASTAVENÍ

Jedná se především o nastavení obou miniCTA anemometrů, u kterých je nutno odšroubovat zadní kryt a podle použité sondy nastavit do správné polohy dvanáct přepínačů (viz obr. 11). Pro toto nastavení se spolu se zařízením dodává výpočtový soubor zpracovaný v programu excel, ve kterém se po vložení parametrů drátka a požadované žhavící teploty zobrazí obrázek se správnou polohou všech přepínačů. Toto nastavení se provádí vždycky pro každou sondu, neboť i sondy stejného typu mají drátky o jiných parametrech. Dále se seřídí low-pass filtr, který se buď nastaví na jednu ze tří možných frekvencí, anebo se vypne. Pro požadované měření byly filtry vždy zapnuty a filtrovaly frekvence vyšší než 10 kHz. Po tomto nastavení lze všechny komponenty propojit. Zvýšenou pozornost je třeba věnovat elektrické izolaci BNC konektorů.



Obr. 11. MiniCTA anemometr po odšroubování zadního krytu.

4.5.2 SOFTWAREVÉ NASTAVENÍ

Ve StreamWare softwaru se nastavuje celá konfigurace experimentu. To obnáší vybrat z knihovny všechny komponenty, tedy typ anemometru, A/D převodníku, sondy a kabelů. Všechny tyto komponenty se zobrazují schematicky v okně tak, jak by měly být ve skutečnosti propojené. Při nastavování je třeba dát pozor na správné přiřazení analogových napěťových signálů do nastavených vstupních portů A/D převodníku.

4.5.3 NASTAVENÍ TEPLOTNÍ KOREKCE

Intenzita přenosu tepla z drátku do proudícího média sice závisí hlavně na rychlosti a intenzitě turbulence proudění, avšak nezanedbatelný vliv má i teplota zkoumaného média. Výstupní napětí z CTA se tak musí korigovat, a to s ohledem na teplotu, které byla při kalibraci a i na skutečnou teplotu měřeného média [19]. To si vyžaduje snímání teploty během měření rychlosti. Z tohoto důvodu byl zkusmo připojený teploměr na jeden vstup A/D převodníku. Bohužel se ale tento vstupní signál nepodařilo v CTA softwaru nastavit jako vstupní hodnotu do teplotní korekce. Dalším problémem byl omezený rozsah použitého teploměru, který začínal měřit od 0 °C, což v zimních měsících (byť v laboratoři) nestačilo. Z tohoto důvodu se rozhodlo celé zpracování naměřených dat provést v samostatném programu, který se musel k tomuto účelu vytvořit. Do něj se pak bude teplota při měření vkládat z nezávislého teploměru. Popis výpočtového programu je uveden v kapitole 6.1.

4.5.4 RYCHLOSTNÍ KALIBRACE

Rychlostní kalibrace je nezbytná u každé sondy. Cílem rychlostní kalibrace je přiřadit pro každou hodnotu měřeného napětí ekvivalentní hodnotu rychlosti média obtékajícího sondu. Samotná kalibrace se provádí tak, že se sonda vystaví ustálenému proudu tekutiny o známé rychlosti a změří se aktuální napětí. Tím je získán jeden kalibrační bod. Po získání minimálně deset bodů lze těmito body proložit kalibrační křivku. Tou je nejčastěji polynom 4. řádu, při nižším rozsahu měřených rychlostí lze použít i exponenciální funkci. Přesnost rychlostní kalibrace je tím větší, čím větší je počet kalibračních bodů a čím více tyto kalibrační body pokrývají rozsah rychlostí měřených při následném experimentu. Vytvořením kalibrační křivky se získají koeficienty, kterými se poté přepočítává naměřené napětí na tzv. efektivní ochlazovací rychlost U_C podle vztahu [19]:

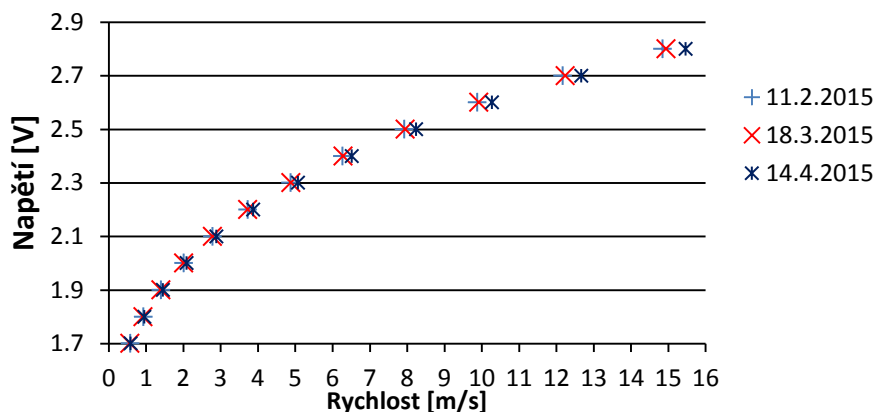
$$U_C = C_0 + C_1 \cdot E + C_2 \cdot E^2 + C_3 \cdot E^3 + C_4 \cdot E^4 \quad (4-3)$$

kde U_C efektivní ochlazovací rychlost (ms^{-1})
 E vstupní napětí pro rychlostní kalibraci (V)
 $C_{0..4}$ koeficienty rychlostní kalibrace (-)

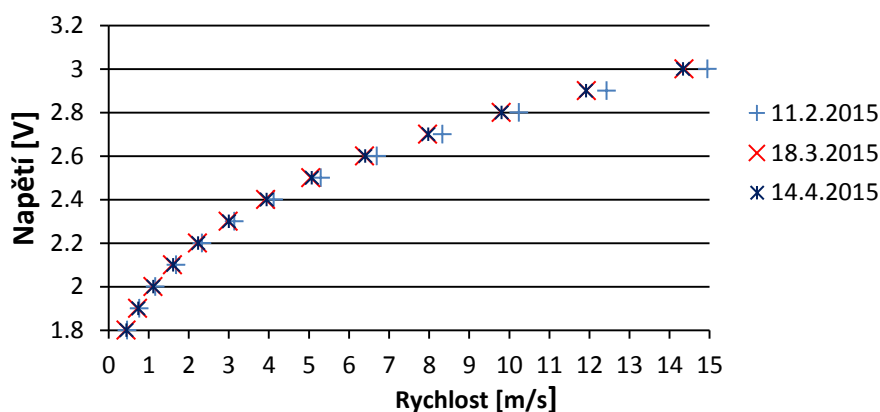
Protože měření se bude provádět dvou - drátkovou sondou, budou tyto rovnice dvě a tedy i vypočtené rychlosti budou dvě. Současně s napětím se odečítá i tlak a teplota proudícího vzduchu pro kalibraci. Pro požadované měření byly prováděny kalibrace o 25 bodech v rozsahu rychlostí od 0,5 do 15 ms^{-1} .

Správně by se tato kalibrace měla provádět vždy před každým měřením po změření odporu senzorů. Po kalibraci by se pak sonda měla přemístit do polohovacího systému bez jakéhokoliv rozpojení jednotlivých komponentů. V našem případě to nebylo možné, neboť jak už bylo zmíněno, jsme nemohli provést změření odporu senzoru. A jak už bylo také zmíněno, kalibrace probíhala na vypůjčeném kalibračním přístroji z Energetického ústavu, který se nacházel v jiné místnosti. Proto nebylo možné nejen přemístit zkalibrovanou sondu do polohovacího zařízení bez rozpojení, ale ani kalibrovat vždy před vlastním měřením. Aby se zjistilo, jak se tyto nedostatky projeví do nepřesnosti měření, byly provedené kalibrace mezi sebou porovnávány. Tímto porovnáním se zjistila skutečná velikost odchylky, kterou způsobuje stárnutí sondy a také celkově odlišný způsob provádění kalibrací a vlastního měření. Získané kalibrační body pro každý drátek jsou znázorněny v grafech 1 a 2, odchylky mezi vypočtenými rychlostmi z jednotlivých kalibrací jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2.

Rozdíl teplot vzduchu jednotlivých kalibrací je v rozmezí 1 °C. Z tabulek je patrné, že nepřesnost mezi jednotlivými kalibracemi, a tedy i nepřesnost při měření, nepřesahuje 5 %. Tato nepřesnost se pak promítne do nepřesnosti směrové kalibrace. Ve srovnání jsou uvedeny jen tři kalibrace, ale ve skutečnosti bylo kalibrací provedeno mnohem víc. Jiné kalibrace byly však provedeny buď na jiných sondách anebo v jiném rozsahu rychlostí. Jejich celkové porovnání by tak bylo obtížné. Ale i při srovnání jiných mezi sebou srovnatelných kalibrací, byly vypočteny stejné odchylky.



Graf 1. Kalibrační body pro 1. drátek.



Graf 2. Kalibrační body pro 2. drátek.

Tab. 1. Vypočtené odchylky od kalibrace
11. 2. pro první drátek.

Rychlost [m/s]	Absolutní odchylka od 11. 2.		Odchylka v %	
	18. 3.	14. 4.	18. 3.	14. 4.
0,579	0,010	0,014	1,77	2,39
0,934	0,006	0,029	0,65	3,09
1,407	0,004	0,049	0,27	3,49
2,016	0,002	0,075	0,11	3,72
2,782	0,000	0,107	0,00	3,84
3,729	0,003	0,146	0,09	3,90
4,882	0,009	0,192	0,19	3,94
6,270	0,018	0,249	0,29	3,97
7,925	0,031	0,317	0,39	4,00
9,882	0,048	0,399	0,48	4,04
12,176	0,069	0,498	0,57	4,09
14,850	0,096	0,617	0,65	4,16

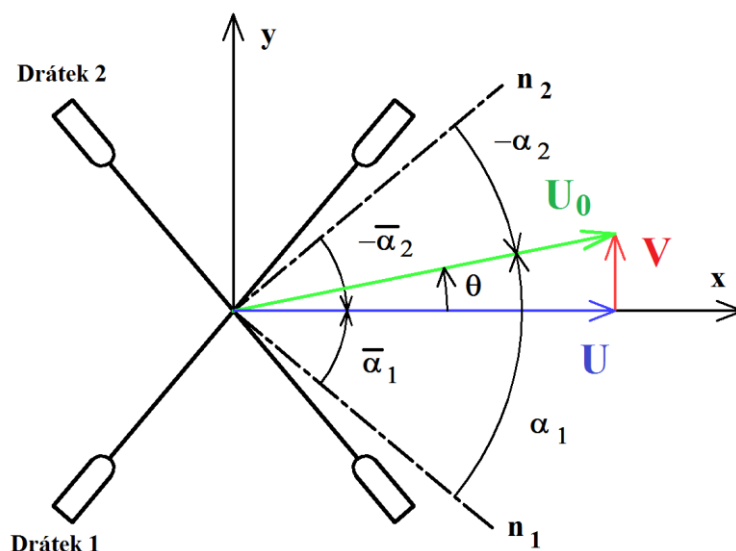
Tab. 2. Vypočtené odchylky od kalibrace
11. 2. pro druhý drátek.

Rychlost [m/s]	Absolutní odchylka od 11. 2.		Odchylka v %	
	11. 2.	18. 3.	14. 4.	18. 3.
0,461	0,023	0,011	4,97	2,45
0,764	0,035	0,025	4,58	3,32
1,165	0,055	0,044	4,69	3,80
1,681	0,081	0,068	4,83	4,07
2,332	0,114	0,098	4,91	4,21
3,137	0,154	0,134	4,90	4,27
4,118	0,199	0,177	4,84	4,29
5,295	0,250	0,226	4,72	4,27
6,692	0,307	0,284	4,58	4,24
8,331	0,368	0,350	4,42	4,20
10,236	0,436	0,426	4,26	4,16
12,432	0,508	0,512	4,09	4,12
14,945	0,587	0,610	3,93	4,08

4.5.5 SMĚROVÁ KALIBRACE

Po rychlostní kalibraci sice lze získat hodnoty efektivních ochlazovacích rychlostí U_{C1} a U_{C2} , avšak tyto rychlosti nic nevyovídají o skutečném směru proudění. Pro zjištění skutečného směru proudění je nezbytný rozklad efektivních ochlazovacích rychlostí do souřadného systému sondy, ze kterého lze už vypočítat skutečný vektor rychlosti. Pro tento rozklad jsou nezbytné tzv. směrové koeficienty, které vyjadřují směrovou citlivost každého drátku sondy a značí se k_1 a k_2 . Tyto koeficienty udává výrobce a pro námi použitý typ sondy je v základním nastavení hodnota $k_1 = k_2 = 0,04$ [19]. Sám výrobce ale doporučuje při předpokládaném zvýšeném turbulentním proudění provést směrovou kalibraci, kterou naměříme konkrétní koeficienty pro danou sondu. Tato kalibrace tak zvýší přesnost následného vyhodnocení získaných dat.

Před vlastní směrovou kalibrací je nutné zavést souřadný systém, do kterého se budou vektory rychlosti rozkládat. Používaný souřadný systém je znázorněn na obrázku 12.



Obr. 12. Souřadný systém dvou-drátkové sondy [20].

kde	x, y	osy souřadného systému
	n_1, n_2	normálové osy drátků 1 a 2
	U_0	vektor skutečné rychlosti (ms^{-1})
	θ	úhel vektoru skutečné rychlosti s osou x
	$\alpha_1, -\alpha_2$	úhly, které svírají normálové osy drátků s vektorem skutečné rychlosti
	$\bar{\alpha}_1, -\bar{\alpha}_2$	úhly, které svírají s osou x drátek 1 a 2

Dle výše uvedeného obrázku platí následující vztahy:

$$\alpha_1 = \bar{\alpha}_1 + \theta \quad (4-4)$$

$$-\alpha_2 = -\bar{\alpha}_2 - \theta \quad (4-5)$$

$$U = U_0 \cdot \cos\theta \quad (4-6)$$

$$V = U_0 \cdot \sin\theta \quad (4-7)$$

Směrová kalibrace se provádí na stejném přístroji jako rychlostní kalibrace, pouze se na něm vymění držák sondy, který umožní se sondou natáčet. Při vlastní kalibraci se nastaví konstantní rychlost proudu z trysky kalibrátoru, ve kterém se pak postupně sonda natáčí a odečítají se hodnoty napětí. Rozsah natočení lze nastavit libovolně v rozsahu od -45° do 45° , což je měřicí rozsah X sond [20]. Tento rozsah by se měl volit podle předpokládané intenzity turbulence. Dále se nastaví počet kalibračních bodů, které se určují podle požadované přesnosti. V našem případě bylo nastaveno 15 kalibračních bodů v rozsahu -45° až 45° . Při směrové kalibraci je důležité správně umístit sondu do kalibrátoru a provádět natáčení ve stejném směru, jak je v nastavení sondy. Na prohození kladných úhlů natočení se zápornými program nijak neupozorní a s vypočtenými koeficienty směrové citlivosti, které tvoří převrácenou hodnotu správných koeficientů, dál počítá. Velikosti rychlostí jsou přitom správné, ale u tangenciální složky rychlosti V jsou opačně orientované.

Při směrové kalibraci se už počítá s dříve provedenou rychlostní kalibrací, takže pro výpočet směrových koeficientů jsou k dispozici hodnoty efektivních ochlazovacích rychlostí U_{C1} a U_{C2} , dále velikost skutečného vektoru rychlost proudění U_0 a skutečný úhel jeho natočení θ . V prvním kroku se provádí rozložení skutečného vektoru rychlosti do souřadného systému podle vztahů (4-6) a (4-7). Z těchto vektorů rychlostí se vypočtou vektory rychlostí ve směrech jednotlivých drátků U_1 a U_2 . Jejich závislost popisují vztahy [19]:

$$U = U_1 \cdot \cos(\overline{\alpha_1}) + U_2 \cdot \cos(-\overline{\alpha_2}) \quad (4-8)$$

$$V = U_1 \cdot \sin(\overline{\alpha_1}) + U_2 \cdot \sin(-\overline{\alpha_2}) \quad (4-9)$$

kde U_1 a U_2 jsou vektory rychlostí ve směrech drátků 1 a 2 v ms^{-1} .

Po matematické úpravě:

$$U_1 = \frac{U \cdot \cos(\alpha_1) + V \cdot \cos(\alpha_2)}{2 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2)} \quad (4-10)$$

$$U_2 = \frac{U \cdot \cos(\alpha_1) - V \cdot \cos(\alpha_2)}{2 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2)} \quad (4-11)$$

Vztah mezi efektivní ochlazovací rychlostí, vektorech rychlostí ve směrech drátků a směrovými koeficienty popisují následující rovnice [19]:

$$U_{C1}^2 \cdot 0,5 \cdot (1 + k_1^2) = k_1^2 \cdot U_1^2 + U_2^2 \quad (4-12)$$

$$U_{C2}^2 \cdot 0,5 \cdot (1 + k_2^2) = U_1^2 + k_2^2 \cdot U_2^2 \quad (4-13)$$

kde k_1 a k_2 jsou koeficienty směrové citlivosti drátků 1 a 2.

Z těchto rovnic se vypočtou směrové koeficienty pro každý kalibrační bod:

$$k_1^2 = \frac{U_2^2 - 0,5 \cdot U_{C1}^2}{0,5 \cdot U_{C1}^2 - U_1^2} \quad (4-14)$$

$$k_2^2 = \frac{U_1^2 - 0,5 \cdot U_{C2}^2}{0,5 \cdot U_{C2}^2 - U_2^2} \quad (4-15)$$

Takto jsou vypočteny koeficienty směrové citlivosti pro každý kalibrační bod. Tyto koeficienty se pak zprůměrují, aby výsledný koeficienty dokázaly co nejpřesněji rozkládat hodnoty efektivních ochlazovacích rychlostí do souřadného systému. Tento výpočet provádí CTA software samostatně. Uvedený výpočet je zde uveden jen pro představu, jakou metodou se koeficienty směrové citlivosti získávají.

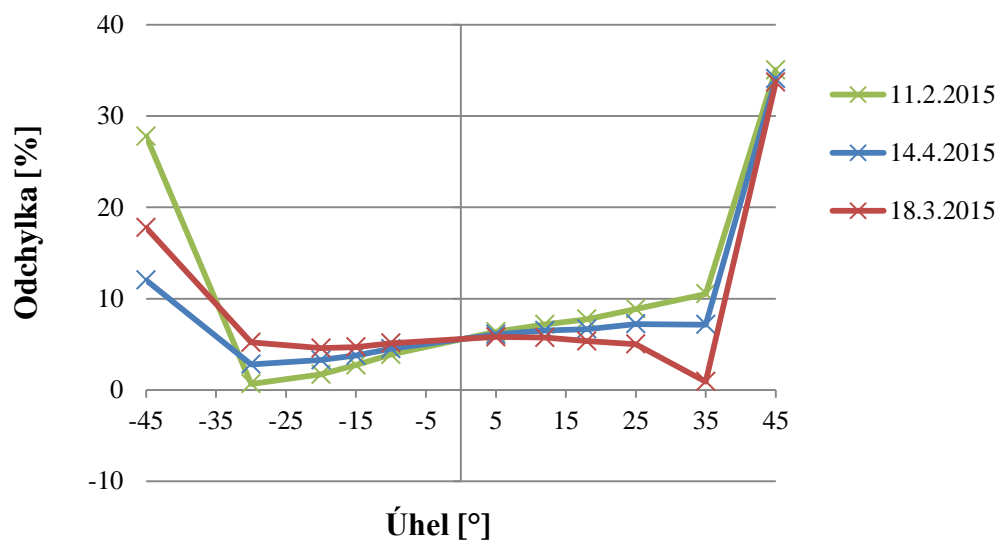
Rozklad rychlosti do souřadného systému sondy vychází z rovnic (4-12) a (4-13), kde už jsou známy směrové koeficienty, ale nejsou známy vektory rychlostí v osách drátků U_1 a U_2 . Po matematické úpravě tak dostáváme vztahy:

$$U_1^2 = \frac{0,5 \cdot U_{C2}^2 \cdot (1 + k_2^2) - 0,5 \cdot U_{C1}^2 \cdot k_2^2 \cdot (1 + k_1^2)}{1 - k_1^2 \cdot k_2^2} \quad (4-16)$$

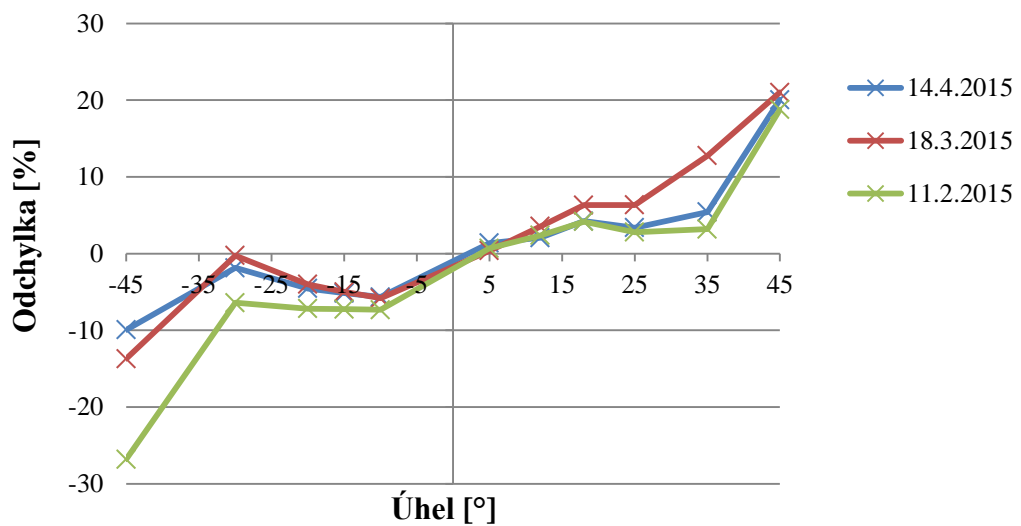
$$U_2^2 = \frac{0,5 \cdot U_{C1}^2 \cdot (1 + k_1^2) - 0,5 \cdot U_{C2}^2 \cdot k_1^2 \cdot (1 + k_2^2)}{1 - k_1^2 \cdot k_2^2} \quad (4-17)$$

Po odmocnění vypočtených vektorů rychlostí se tyto vektory mohou převést do os souřadného systému sondy podle rovnic (4-8) a (4-9).

Pro zjištění nejistoty měření způsobené sondou a následným výpočtovým zpracováním bylo na kalibrátoru provedeno pokusné měření. Tím byly získány hodnoty pro proudění o známých parametrech, které se mohly srovnat s vypočtenými hodnotami. V grafech 3 a 4 jsou uvedeny procentuální odchylky tří provedených směrových kalibrací od skutečných hodnot. Z nich je patrné, že velikost odchylky je závislá na úhlu proudícího vzduchu. Na základě těchto grafů bude dále vypočtena celková nejistota měření.



Graf 3. Odchylky rychlostní složky U od skutečných hodnot.



Graf 4. Odchylky rychlostní složky V od skutečných hodnot.

5 NÁVRH DOPLŇUJÍCÍHO VYBAVENÍ PRO MĚŘENÍ

Po seznámení se s uchycením vířiče v hořáku a vybranou metodou měření, bylo možné přikročit k návržení měřicí tratě a polohovacího systému sondy – tzv. traverzéro. Vzhledem ke specifickým podmínkám měření bylo rozhodnuto, že tato zařízení budou navržena a vytvořena vlastními silami. Úvodem této kapitoly je třeba poznamenat, že jak konstrukce měřicí tratě, tak i konstrukce traverzéro se postupem času různě upravovala podle prakticky zjištěných poznatků. V této kapitole je popsána konečná podoba zařízení, při které se provedlo proměření vířičů.

5.1 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA ZAŘÍZENÍ

Pro naměření rychlostních profilů je nutné pohybovat se sondou vůči vířiči hned ve třech směrech, a to podél osy měřicí tratě, kolmo na osu měřicí tratě a kolem osy měřicí tratě. Prvním úkolem při navrhování bylo rozhodnout, které pohyby bude vykonávat sonda, a které vířič. Při rozboru tohoto problému bylo rozhodnuto, že sonda se bude pohybovat pouze v kolmém směru na osu měřicí tratě a zbylé dva pohyby bude vykonávat vířič. Z tohoto rozhodnutí vyplynulo, že traverzér bude vykonávat pohyb jen v jednom směru, a proto bude vhodné, aby jeho konstrukce byla na konstrukci měřicí tratě zcela nezávislá. Tím se zajistilo, že konstrukce traverzéro bude univerzálnější a v budoucnu se tak může využít i u jiných aplikací. Po vyřešení těchto základních požadavků se mohlo přikročit ke konkrétním návrhům jednotlivých zařízení.

5.2 POPIS MĚŘICÍ TRATĚ

Měřicí tratí se rozumí potrubní trasa s instalovaným vířičem a nosnou konstrukcí této potrubní trasy. Základní koncept už vytvořen a byl nakoupen základní materiál [1]. Mým úkolem byla realizace a následné vyladění návrhu měřicí tratě. Model finální podoby měřicí tratě včetně nákresu ustavení vůči spalovací komoře je uveden v příloze tohoto dokumentu. Celé zařízení je umístěné v laboratoři zkušebny hořáků ÚPEI, proto je vhodné prvně přiblížit vybavení této laboratoře, neboť konstrukce měřicí tratě je s ní značně provázaná.

5.2.1 POPIS ZKUŠEBNY HOŘÁKŮ ÚPEI

Zkušebna hořáků se nachází v areálu Fakulty strojního inženýrství a je koncipována tak, aby umožňovala zkoušky hořáků na plynná i kapalná paliva. Limitující charakteristikou pro zkoušky je výstupní teplota plamene, která je 1050 °C. Maximální výkon hořáků je v závislosti na délce plamene 1,5 až 1,8 MW. Laboratoř umožňuje i zkoušení kombinovaných hořáků.

Pro návrh měřicí tratě bylo výhodné využít co nejvíce vybavení laboratoře. Na obrázku 13 je vidět zkušební zařízení laboratoře. Základním prvkem je spalovací komora. Ta má tvar ležatého válce o průměru 1 m a délce 2 až 4 m. V jednom čele je instalován hořák, v protějším

čele je pak odtah spalin. Do této komory je spalovací vzduch přiváděn pomocí vysokotlakého ventilátoru, který je řízen frekvenčním měničem v rozsahu od 10 do 100 %. Přívodní potrubí je osazeno snímači teploty, tlaku a průtoku vzduchu. Samotné potrubí spalovacího vzduchu má čtvercový průřez a je vedeno ve výšce cca 2,5 m. Ve specifických případech se zkoušejí hořáky spalující jen čistý kyslík nebo spalovací vzduch obohacený kyslíkem. Pro tyto případy je do potrubí spalovacího vzduchu zepředu umístěna obdélníková příruba, ke které lze nainstalovat přívod kyslíku [21].



Obr. 13. Zkušebna hořáků ÚPEI. V pravém horním rohu je patrný přívod spalovacího vzduchu [1].

5.2.2 POŽADAVKY NA KONSTRUKCI

Požadavky kladené na konstrukci měřicí tratě jsou dvojího druhu. První požadavky klade zvolená metoda měření:

- uchycení vířiče v měřicí trati musí být stejné jako v hořáku
- s vířičem se musí dát posunovat a natáčet v dostatečném rozsahu pro měření
- geometrie měřicí tratě v okolí vířiče musí být rovněž shodná s geometrií hořáku
- v hořáku se předpokládá ustálený přívod spalovacího vzduchu a ten musí být i v měřicí trati
- upevnění měřicí sondy a jiných zařízení nesmí nijak ovlivňovat proudění vzduchu
- vzduch musí být filtrován (aby nedošlo k poškození sondy)
- z důvodu bezpečnosti sondy a kontroly nastavení vířiče je vhodné, aby na něj bylo vidět
- je nutné znát parametry proudícího vzduchu (teplotu, průtok, tlak)

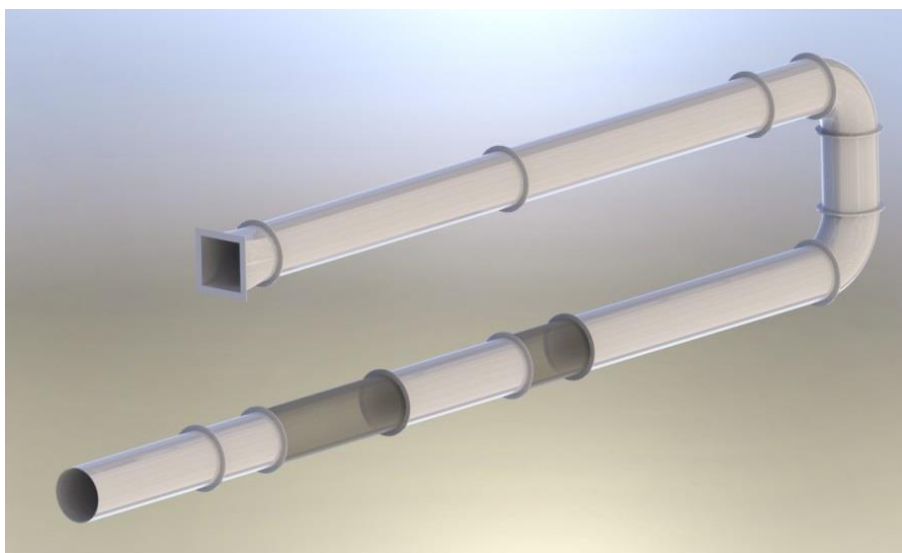
Druhá část požadavků se týká technické proveditelnosti celkové konstrukce měřicí tratě:

- snadná montáž a demontáž celé konstrukce
- prostorové omezení vzhledem k ostatnímu zařízení v laboratoři
- maximální využití stávajícího příslušenství spalovací komory
- bezpečnost celé konstrukce

Konstrukce měřicí tratě musela všechny tyto požadavky splňovat.

5.2.3 POPIS POTRUBNÍ TRASY

Dimenze potrubní trasy byla dána vnitřním průměrem těla hořáku, tedy vnitřní průměr potrubí se rovná 300 mm. Potrubí bylo vybráno ze sortimentu firmy FORT – PLASTY s.r.o. Všechny díly jsou vyrobeny z bílého PVC, kromě některých dílů, které jsou z požadavku vizuální kontroly vířiče vyrobeny z transparentního plastu. Návrh konstrukce potrubní trasy vychází z umístění spalovací komory a jejího příslušenství. Jako zdroj tlakového vzduchu se výhodně využil přívod spalovacího vzduchu do hořáku, který je přiváděn potrubní trasou obdélníkového průřezu ve výšce cca 2,5 m. Z přední strany tohoto potrubí je obdélníková příruba pro nástřik kyslíku. Bylo rozhodnuto demontovat hořák a nástřik kyslíku, přívod spalovacího vzduchu do hořáku zaslepit a na přírubu pro nástřik kyslíku připojit vlastní potrubí měřicí tratě. Z toho rozhodnutí pak vychází výsledná podoba potrubní trasy, která je na obrázku 14.



Obr. 14. Potrubní trasa měřicí tratě.

Kruhové potrubí je na obdélníkovou přírubu napojeno přechodovým kusem (viz. obr. 15). V dolní větvi je nainstalován tkaninový filtr, ke kterému je připevněna tzv. voština, sloužící k ustálení proudění v celém profilu potrubí. Pro případnou kontrolu funkce voštiny kouřem následuje za filtrem krátký průhledný díl. Na něj je nainstalováno potrubí s manipulačním otvorem, který umožňuje nastavení polohy vířiče bez nutnosti demontáže části potrubní trasy. Dále je namontován průhledný díl, v němž se nachází samotný vířič. Za ním je další krátký díl, ke kterému se připevňuje polohovací zařízení. Potrubní trasa končí výfukovým dílem, ten je zasunut 600 mm do prostoru spalovací komory. Délka celé potrubní trasy zajišťuje dostatečný prostor pro co největší ustálení proudícího vzduchu.



Obr. 15. Napojení potrubní trasy na přívod spalovacího vzduchu.

Tímto řešením byla maximálně využita spalovací komora, která pro měření zajišťovala jak přívod tlakového vzduchu, tak odtah výfukového vzduchu z laboratoře spalovny. Zároveň s tímto řešením odpadl problém instalace měřidel požadovaných parametrů proudícího vzduchu, neboť se využili již instalovaná měřidla z příslušenství zkušební hořáků.

5.2.4 POPIS NOSNÉ KONSTRUKCE

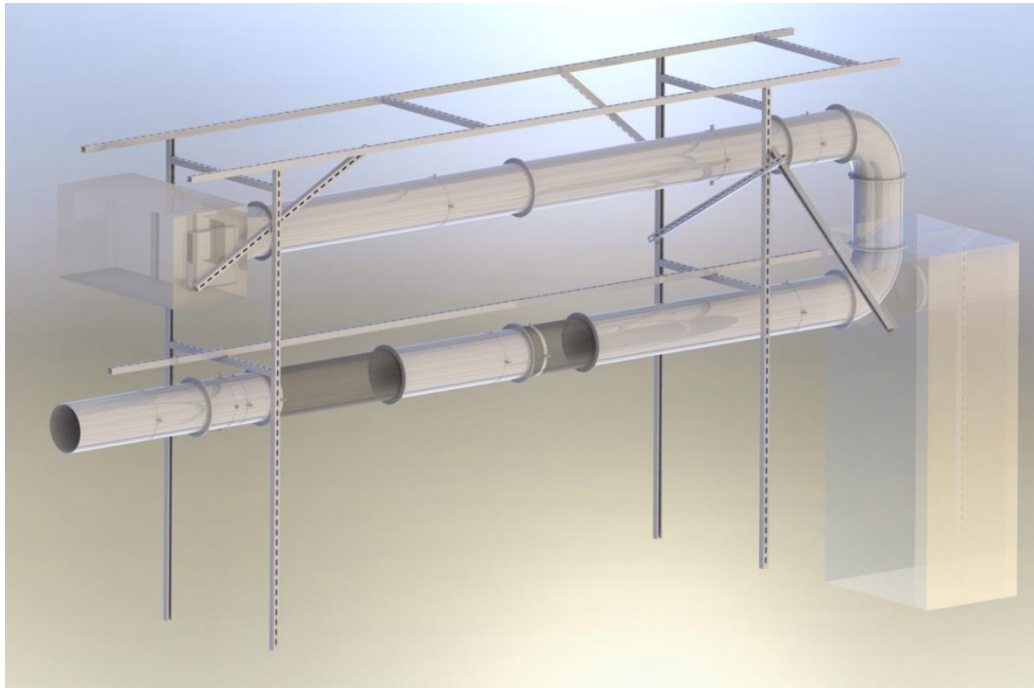
Ze zkušeností z jiných projektů realizovaných na ÚPEI vzešlo rozhodnutí, že nosná konstrukce bude vytvořena z montážních nosníků, které dodává např. firma Koňářik závěsová technika a.s. Od ní byly nakoupeny i všechny další potřebné komponenty. Tyto nosníky mají tu výhodu, že se dají spolu libovolně spojovat a jednotlivé spoje lze snadno rozměrově nastavovat. Model celé nosné konstrukce je znázorněn na obrázku 16. Základní částí jsou dva vertikální rámy, které jsou spojeny třemi nosníky. Na nich je zavěšena potrubní trasa. Nosná konstrukce je z bezpečnostních důvodů přichycena k přívodnímu vzduchovému potrubí a k rámu sousedního zařízení. Potrubí je k nosné konstrukci přichyceno pomocí objímek, na kterých je nejen zavěšeno, ale i přichyceno k vertikálním rámcům pro eliminaci bočních výkyvů. Nosné objímky byly rozmístěny tak, jak si to vyžadovala potřebná manipulace s jednotlivými úseky potrubní trasy. Model sestavené měřicí tratě je na obrázku 17, ve kterém jsou i naznačena sousední zařízení.

5.2.5 POPIS UCHYCENÍ VÍŘIČE

Řešení tohoto problému je patrné na obrázku 18. Vířič je nasazen na nosnou trubku HT o vnějším průměru 75 mm stejným způsobem jako v hořáku na primární trysku. Nosná trubka je dlouhá 2 m a je uložena na dvou místech v pouzdech, které tvoří ocelové trubky dlouhé 100 mm. Pouzdra jsou v ose potrubí vycentrována středními deskami. Tyto desky byly přilepeny tupým spojem k pouzdrům pomocí tavného lepidla. Nosná trubka včetně pouzder se může uvnitř potrubí libovolně posunovat a předpokládalo se, že bude možné s vířičem a jeho uchytením otáčet kolem své osy.



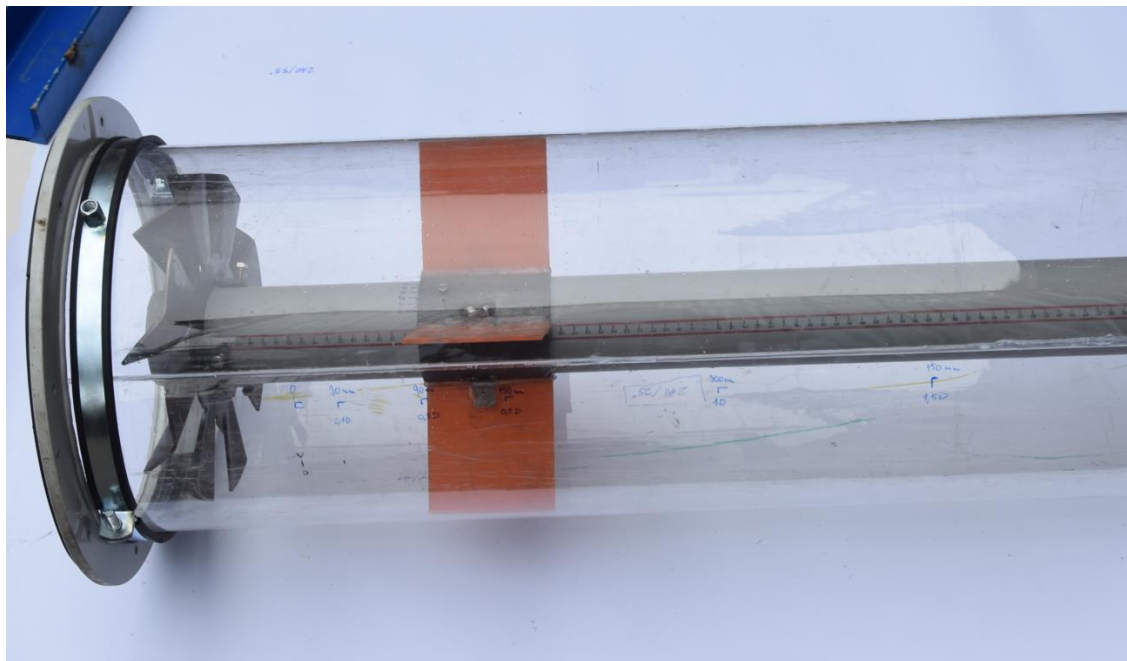
Obr. 16. Nosná konstrukce měřicí tratě.



Obr. 17. Model sestavené měřicí tratě.

Při montáži se ale ukázalo, že vnitřní válcovitost potrubí měřicí tratě vykazuje značné odchylky. Při manipulaci s vířičem se tak často odlamovaly středící desky a to i po zvětšení pevnosti lepených spojů přivařením pomocných plíšků. Zabroušením středících desek se sice umožnil volný pohyb vířiče v potrubí, ale vířič tak nebyl umístěn na středu potrubní trasy, což bylo pro měření nepřijatelné. Proto se musely jednotlivé středící desky vyrobit přesně na míru a natáčení vířiče kolem své osy řešit jiným způsobem. Nakonec se do nosné trubky vyřezala drážka, která umožnila natáčení vířiče pouze s nosnou trubkou v rozsahu 45° , který pro měření rychlostních profilů postačoval. Do této drážky byl zašroubován šroub M 5, který tak zajistil stálou vzdálenost prvního pouzdra od vířiče. Pro přesnější natáčení vířiče byla na nosnou trubku narýsována stupnice, která je vidět na obrázku 19. Na tomtéž obrázku je

i patrna stupnice narýsovaná na průhledném potrubí, která slouží pro přesné nastavení vzdálenosti víříče od měřicí sondy. Vyřešením uchycení víříče tak měřicí trať splňovala všechny požadavky, které na ni byly kladeny.



Obr. 18. Uchycení víříče uvnitř měřicí tratě.



Obr. 19. Stupnice pro nastavování polohy víříče.

5.2.6 MONTÁŽ A DEMONTÁŽ MĚŘICÍ TRATĚ

Z důvodu velké vytíženosti laboratoře zkušebny hořáků bylo nutno celé zařízení navrhnout tak, aby bylo v případě potřeby rozložitelné. Z toho důvodu jsou všechny díly spojeny pomocí šroubů. Pro montáž a demontáž celé měřicí tratě jsou zapotřebí dva pracovníci. K jejich činnosti není zapotřebí žádného speciálního nářadí. Jsou potřeba nástrčné klíče velikosti 10 a 17 (po dvou kusech), šroubovák a žebřík. Úplná montáž (popř. demontáž) zabere cca 4 hodiny.

Většinou však ostatní experimenty v laboratoři nevyžadovaly úplnou demontáž měřicí tratě. Ostatní experimenty vyžadovaly demontovat ty části, které znemožňovaly instalaci hořáku na spalovací komoru. Obvykle bylo třeba demontovat spodní větev potrubní trasy spolu s příslušným horizontálním nosíkem a část prvního vertikálního rámu. Dále bylo třeba zaslepit zbývající část potrubní trasy, aby nedocházelo k úniku spalovacího vzduchu. Tuto částečnou demontáž mohl provést jen jeden pracovník, kterému pak trvala cca 1,5 hodiny.

5.3 NÁVRH POLOHOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Souběžně s návrhem potrubní trasy se vyvíjel i návrh na uchycení vlastní sondy. S vytvářením konečné podoby potrubní trasy se formovaly také finální požadavky nejen na samotnou konstrukci traverzovacího zařízení, ale i na jeho elektrotechnickou část.

5.3.1 POŽADAVKY NA TRAVERZOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Jak již bylo uvedeno, traverzér měl vykonávat pouze přímočarý pohyb se sondou kolmo na osu potrubní trasy, což je poslední pohyb potřebný k vykrytí celého prostoru rychlostních profilů za vířičem. Z toho se vyvinuly následující požadavky na samotnou konstrukci:

- umožnit přesný posuv sondy od osy potrubní trasy ke stěně potrubí
- snadná montáž a demontáž k potrubí
- snadné a bezpečné nasazení sondy do polohovacího zařízení
- pohon posuvu musí být motorizován
- ovládání činnosti traverzéro musí být pro obsluhu pohodlné

To jsou vlastnosti, které se od konstrukce traverzéro očekávaly.

5.3.2 POPIS KONSTRUKCE TRAVERZÉRU

Traverzovací zařízení bylo navrženo v rámci této práce, od návrhu jeho podoby přes tvorbu výkresové dokumentace až po zajištění výroby a následné montáže. Pouze výběr základního konceptu traverzéro byl konzultován [1].

Při návrhu samotné konstrukce se čerpal z konstrukcí přesných polohovacích systémů, které jsou využívány v CNC strojích a 3D tiskárnách. Návrh vycházel z konstrukční praxe CNC strojů, kde se rotační pohyb z motoru přenáší prostřednictvím závitové tyče a matice na pohyb

přímočarý. Toto řešení je konstrukčně jednoduché a dostatečně přesné. Mnoho potřebných dílů by se dalo použít z nabídky několika specializovaných firem. Nevýhodou byla větší výška zařízení a uložení motoru do vrchní části konstrukce, což by mohlo vyžadovat větší nároky na upevnění konstrukce k potrubí.

Model traverzéro je znázorněn na obrázku 20. Základem je horní a dolní deska, které jsou spolu spojeny vodicími tyčemi. K dolní desce jsou přišroubovány opory, které svým tvarem přesně doléhají na stěnu potrubí měřicí tratě. Na horní desku jsou přišroubovány nosníky motoru a deska motoru. Dále jsou k těmto deskám přišroubovány ložiskové domky, ve kterých je usazen pohybový šroub. Rotační pohyb šroubu se přenáší na matici, která je pevně spojena s jezdcem a vytváří tak přímočarý pohyb jezce. Ten je uložen na vodicích tyčích pomocí kuličkových vodicích pouzder. Do jezce je zašroubován úchytný šroub, do kterého se vkládá držák sondy. Ten je uvnitř šroubu zajištěn pojistným šroubem. Celá konstrukce se k potrubí připevňuje potrubní objímkou, což se ukázalo jako dostatečně pevné řešení. V příloze dokumentu je uvedena veškerá výkresová dokumentace k traverzéro.



Obr. 20. Model traverzovacího systému.

V tabulce 3 je uveden seznam vyráběných dílů s připojením výrobce, v tabulce 4 je seznam nakupovaných dílů, u kterých je uvedena i cena.

Tab. 3. Seznam vyráběných dílů k traverzéro.

Název	Počet kusů	Výrobce
Dolní deska	1	ÚPEI
Horní deska	1	ÚPEI
Jezdec	1	ÚPEI
Vodící tyč	2	ÚPEI
Nosník motoru	2	ÚPEI
Deska motoru	1	ÚPEI
Distanční kroužek	2	ÚPEI
Úchytný šroub	2	ÚPEI
Roztečná packa	2	ÚPEI
Pohybový šroub	1	KOVORYS s.r.o
Opěrná deska	1	KOVORYS s.r.o
Přední opěrná deska	1	KOVORYS s.r.o
Pomocná opěra	1	KOVORYS s.r.o

Tab. 4 Seznam nakupovaných dílů k traverzéro.

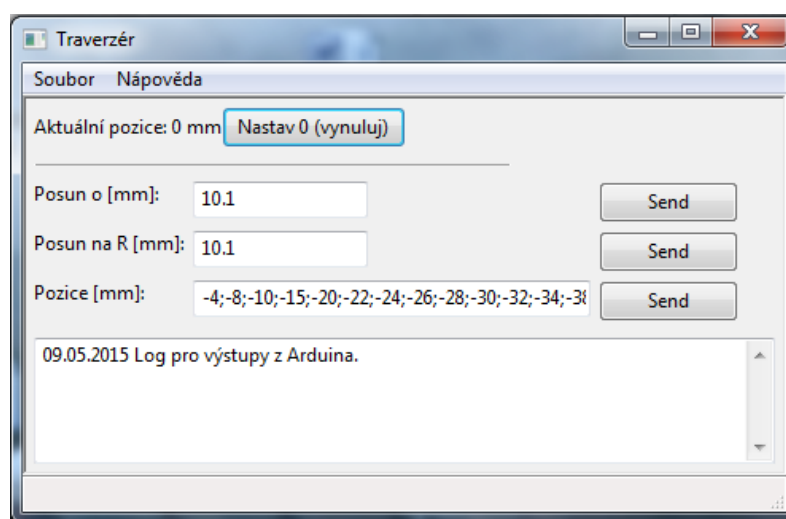
Název	Počet kusů	Cena
Krokový motor NEMO SX17-0905	1	297
Matice Tr12x3	1	60
Ložiskový domek pro šroub FF10	1	440
Ložiskový domek pevný FK08	1	1090
Kuličková vodící matice LM10	2	60
Spojka pružná XT 20	1	100
Spojovací materiál	-	120
Cena celkem:		2227

5.3.3 POPIS ELEKTROTECHNICKÉHO OVLÁDÁNÍ

Návrh způsobu ovládání traverzéro byl vytvořen [1]. Pro ovládání krokového motoru bylo použito vývojové desky Arduino UNO, kterou lze pomocí USB konektoru propojit s počítačem [22]. Pro její vlastní programování se využívá volně šiřitelný software. V něm byl napsán program pro ovládání krokového motoru. Aby bylo ovládání uživatelsky příjemnější, byl vytvořen doplňující program, který zprostředkoval komunikaci mezi uživatelem a ovládacím programem Arduina. Tento pomocný program byl zpracován v programovém

prostředí Python, které je volně šiřitelné [23]. Osobně jsem měl na starosti osazení desky Arduino na univerzální tištěný spoj, jeho propojení s ostatními komponenty a naučit se s ovládacími programy pracovat.

Při použití traverzéro se používal program v Pythonu, který po spuštění otevřel okno s nabídkou příkazů. Toto okno je na obrázku 21. Aktuální poloha sondy v momentě spuštění programu je brána jako pozice 0. Nabídka příkazů umožňuje jet se sondou o zadanou vzdálenost, nebo na zadanou pozici, nebo na předdefinované pozice. V případě nutnosti lze opakovaně nastavovat aktuální pozici sondy jako 0 tlačítkem „Nastav 0“.



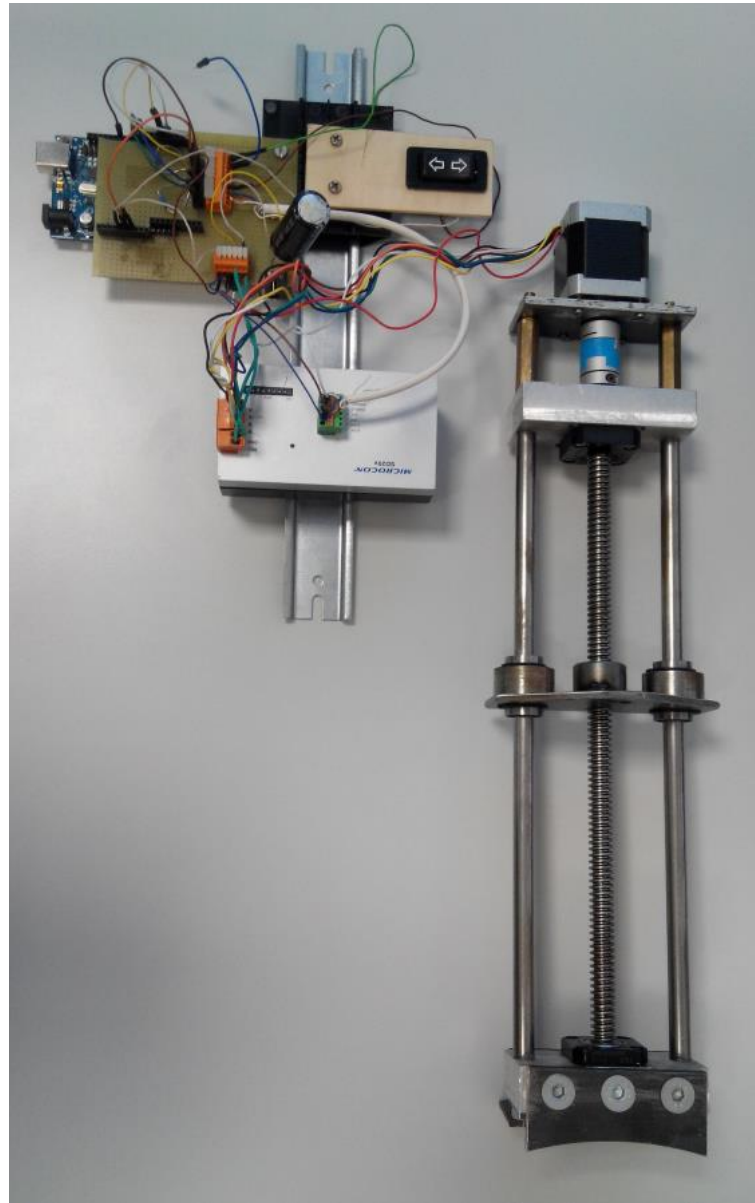
Obr. 21. Okno s nabídkou příkazů pro traverzér.

Fyzicky je Arduino UNO s univerzálním tištěným spojem umístěno na DIN liště spolu s driverem krokového motoru Microcon. K této liště je ještě přidáno třípolohové tlačítko, které umožňuje pohybovat s traverzérem podle aktuální potřeby. Pokud je deska Arduino UNO samostatně napájena, lze tak traverzér ovládat bez nutnosti připojení k počítači. Přidáním tohoto tlačítka se usnadnila práce s traverzérem. Důležité je při opětovném ovládní traverzéro z počítače pohlídat nulovou polohu, neboť zásahy do polohy sondy přes tlačítko program nezaznamenává. Celý traverzér i s ovládací elektronikou je na obrázku 22.

5.3.4 DOPLŇJÍCÍ PŘÍSLUŠENSTVÍ

Mezi doplňující příslušenství k traverzéro se řadí ucpávka pro průchod sondy a kontrolní zaměřovač správné polohy sondy. Jako ucpávka průchodu sondy se nakonec použila hliníková samolepicí páska, do které se vyřezal otvor o průměru držáku sondy. Vzhledem k tvaru použité sondy se však musela ucpávka při každém vytahování sondy odstranit a pro další měření použít novou. Jelikož průměr držáku sondy je násobně větší, než tělo sondy, nebylo možné při měření v blízkosti stěny potrubí toto mezikruží zcela ucpat. Proto při vyhodnocení naměřených dat v blízkosti potrubní stěny je třeba mít tuto netěsnost na zřeteli.

Pro kontrolu správně ustaveného traverzéro na stěnu potrubí a pro vystředění sondy v ose měřicí trasy se provádělo pomocí dvou laserových ukazovátek. Do potrubí se vyvrtaly dva, na sebe kolmé otvory, proti nimž se přesně narýsoval zaměřovací kříž. Při nastavování správné polohy sondy se k otvorům přiložila laserová ukazovátka tak, aby jejich paprsek mířil do středů zaměřovacích křížů. Poté se nastavovala poloha sondy do doby, než její senzory protnuly oba laserové paprsky. Tím byla nastavena středová poloha, od které se odjelo na počáteční pozici měření. Toto zaměření se provádělo jen při montáži traverzéro k potrubí.



Obr. 22. Traverzovací zařízení.

6 PŘÍPRAVA NA MĚŘENÍ

Nyní byly k dispozici všechny komponenty nezbytné k provedení vlastního měření. Aby naměřené hodnoty byly správné a měly požadovanou vypovídající hodnotu, musely se provést následující úkony, podle kterých se jednak ještě nastavily různé komponenty a také se určil rozsah a plán měření.

6.1 VYTVOŘENÍ VÝPOČTOVÉHO PROGRAMU

Jak již bylo zmíněno, z důvodu nemožnosti propojení externího teploměru s programem StreamWare Pro bylo rozhodnuto, že celý výpočet na zpracování dat bude prováděn pomocí vlastního výpočtového programu, nazvaného HotWire_calc.py, který je v příloze tohoto dokumentu. Dalším důvodem k vytvoření vlastního výpočtu je hlubší porozumění problematice zpracování naměřených dat. Pro výpočet bylo opět zvoleno volně dostupné programovací prostředí Python, do kterého byly vloženy základní výpočty [26]. CTA software tak bude využit jen k vlastnímu měření a poté k vyexportování surových dat. Ty se exportují ve formátech textových dokumentů. U každého měření jsou v těchto datech uvedeny průvodní informace, jako název měření a datum, ale také aktuální koeficienty rychlostní a směrové kalibrace. Pro úplnost byly do těchto textových souborů dopsány teploty při měření a teplota při použité kalibraci. Všechny naměřené surové data jsou rovněž v příloze tohoto dokumentu. Mým úkolem bylo dodat pro tento program potřebné podklady pro výpočty a následné testování.

6.1.1 VÝPOČET VEKTORŮ RYCHLOSTI

Struktura výpočtu byla vytvořena stejně jako u CTA softwaru - tedy dle literatury [19]. Program nejdříve provede načtení všech vyexportovaných dat, která se dále zpracovávají. Vlastní výpočet začíná teplotní korekcí, kde opravný koeficient je počítán podle vzorce:

$$E_{\text{CORR}} = \left(\frac{T_W - T_0}{T_W - T_\infty} \right)^{0,5(1 \pm m)} \cdot E_1 \quad (6-1)$$

kde E_{CORR} napětí korigované podle teploty (V)
 E_1 napětí změřené při teplotě T_∞ (V)
 T_W teplota senzoru (°K)
 T_0 referenční teplota při kalibraci (°K)
 T_∞ teplota při měření (°K)
 m faktor teplotního zatížení (-)

Faktor teplotního zatížení se přičítá nebo odečítá podle toho, zda je referenční teplota menší nebo větší než teplota při měření a jeho hodnota je uvedena v knihovně fyzikálních vlastností v programu StreamWare Pro [24].

Z teplotně korigovaného napětí jsou vypočteny efektivní ochlazovací rychlosti U_{C1} a U_{C2} podle rovnice (4-3). Koeficienty rychlostní kalibrace se berou vždy z poslední provedené kalibrace před vlastním měřením. Tyto rychlosti jsou zprůměrovány a je také vypočtena intenzita turbulence podle následujících rovnic [19]. Tyto rovnice jsou uvedeny jen pro první drátek, výpočet pro druhý drátek je analogický.

$$U_{1Mean} = \frac{1}{N} \cdot \sum_1^N U_{1i} \quad (6-2)$$

kde U_{1Mean} průměrná rychlost U_1 (ms^{-1})
 N počet vzorků (-)

$$U_{1RMS} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_1^N (U_{1i} - U_{1Mean})^2} \quad (6-3)$$

kde U_{1RMS} představuje hodnotu fluktuace rychlosti v ms^{-1} .

$$T_{1U} = \frac{U_{1RMS}}{U_{1Mean}} \cdot 100 \quad (6-4)$$

kde T_{1U} představuje intenzitu turbulence v %.

Tímto výpočtem jsou vyhodnoceny rychlosti z jednotlivých drátků. Dále pokračuje výpočet rozkladu rychlosti do souřadného systému, do kterého ale vstupují ještě nezprůměrované rychlosti. Rozklad vektorů rychlosti probíhá podle rovnic (4-16), (4-17), (4-8) a (4-9). Do výpočtu jsou opět brány koeficienty směrové citlivosti z aktuální kalibrace. Výsledky jsou zprůměrovány a je z nich znovu vypočtena intenzita turbulence. Tím se získají vektory rychlostí v osách souřadného systému i s jejich fluktuačními složkami. Dále se z už zprůměrovaných hodnot počítá celkový vektor rychlosti a jeho úhel:

$$U_0 = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (6-5)$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{V}{U}\right) \quad (6-6)$$

Tím končí základní vyhodnocení dat. V závěru programu je nachystán výpočet rychlé fourierovy transformace (FFT), kterou lze v případě potřeby zjistit dominantní frekvence v signálu.

6.1.2 VÝPOČET VÍROVÉHO ČÍSLA

Vírové číslo se počítá pro každou vzdálenost víříče. Vychází se ze vztahu (3-2) uvedeného v kapitole 3.3. Tento vztah bylo nutno poněkud modifikovat, neboť výpočet integrálu bylo třeba provést numericky. Zvolilo se, že integrál se bude řešit lichoběžníkovou metodou. Vlastní výpočet začíná vypočtením diference Δr , který se odvíjí od poloměrů změřených

sondou. Proto se nejprve načte vektor s pozicemi sondy, od kterých se difference vypočte dle vztahu:

$$\Delta r_i = r_{i+1} - r_i \quad (6-7)$$

kde Δr je difference poloměru pro daný měřicí bod (mm).

V krajním bodě, který je nejbližší stěny potrubí, se difference bere až ke stěně potrubí, takže hodnoty naměřené v tomto krajním bodě se považují za konstantní až ke stěně. Bylo řečeno, že vírové číslo se počítá pro každou vzdálenost vířiče od sondy, a proto se v dalším kroku zprůměrují vektory rychlosti U a V z jednotlivých natočení pro každý měřicí bod. Numerické integrály jsou počítány následujícími vztahy:

$$G_\theta = \sum_{i=1}^{N_P} \frac{\Delta r_i}{2} \cdot \left((U_{AV} \cdot V_{AV} \cdot r^2)_i + (U_{AV} \cdot V_{AV} \cdot r^2)_{i+1} \right) \quad (6-8)$$

$$G_\theta = \sum_{i=1}^{N_P} \frac{\Delta r_i}{2} \cdot \left((U_{AV}^2 \cdot r)_i + (U_{AV}^2 \cdot r)_{i+1} \right) \quad (6-9)$$

kde U_{AV} vektor průměrných axiálních rychlostí z natočení (ms^{-1})
 V_{AV} vektor průměrných tangenciálních rychlostí z natočení (ms^{-1})
 N_P počet měřicích poloh sondy (-)

Tyto veličiny jsou poté dosazeny do vztahu (3-1), ze kterého je vypočteno vírové číslo.

6.1.3 VÝPOČET PRŮTOKU

Aby bylo možné ověřit věrohodnost naměřených rychlostí, bylo rozhodnuto, že pro každou vzdálenost vířiče od sondy bude počítán celkový průtok vzduchu, který se může porovnat s hodnotami měřenými průtokoměrem zkušebny hořáků. Výpočet vychází ze všeobecně známého vzorce:

$$Q_V = U \cdot A \quad (6-10)$$

kde Q_V průtok (m^3s^{-1})
 A plocha průtočného průřezu (m^2)

Jako rychlost zde vstupuje pouze axiální složka rychlosti, které tak představuje pohyb objemového toku. Nutné je správně vypočítat průtočnou plochu, kterou pokrývají měřené body. Její velikost je závislá na poloměru a úhlu mezi trajektorií měřených bodů. Výpočet plochy tak představuje dvojný integrál, který postupně počítá jednotlivé dílky plochy rozdělené měřicími body. Díl plochy je ohraničen čtyřmi měřicími body, které se spolu zprůměrují a vytvoří se tak vektor skutečné rychlosti připadající na danou velikost plochy. Následující vztah pro výpočet průtoku představuje numericky zpracovaný dvojný integrál:

$$Q_v = \sum_{n=0}^{n=N_V} \left[\sum_{r=R}^{r=0} \frac{\varphi_n}{2} \cdot (r_i^2 - r_{i+1}^2) \cdot \frac{u''_{n,i} + u''_{n+1,i} + u''_{n,i+1} + u''_{n+1,i+1}}{4} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\varphi_{N_V}} \right] \quad (6-11)$$

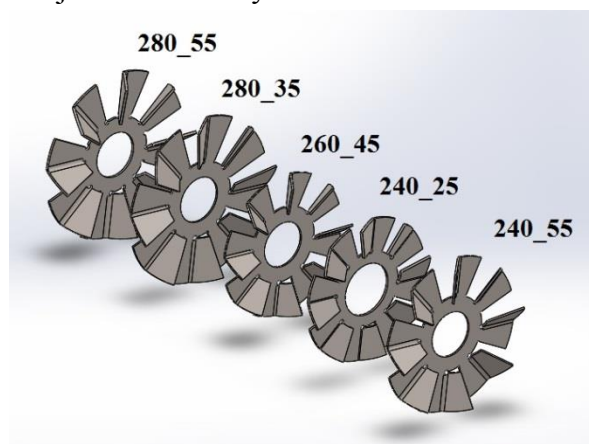
kde φ úhel natočení vířiče vůči sondě ($^\circ$)
 n aktuální natočení vířiče (-)
 N_V poslední natočení vířiče (-)
 u'' axiální rychlost v měřicím bodě (ms^{-1})

Tímto vztahem je vypočten průtok pouze přes plochu pokrytou měřicími body, takže je z něj nutné ještě dopočítat průtok přes celý průřez potrubí. Tento výpočet je závislý na zvolené ploše pokrytou měřicími body.

Aby vypočtený průtok bylo možno srovnat s průtokem, který je měřen ovládacím systémem zkušebny hořáků v Nm^3/h , musí se měřený průtok přepočítat na skutečný podle aktuálních okolních podmínek. Z tohoto důvodu byl v programu Microsoft Excel vytvořen výpočet na přepočet skutečného průtoku nazvaný *Air_flow_calc.xlsx*. Ten je založen na výpočtu ze stavové rovnice a dosazují se do něj aktuální teplota, atmosférický tlak, tlak proudícího vzduchu a měřený průtok v $\text{Nm}^3/\text{h}^{-1}$. Všechny tyto veličiny byly odečítány z ovládacího systému zkušebny hořáků. Program zároveň ze skutečného průtoku vypočítává i skutečnou rychlost proudění pro zadaný průměr potrubní trasy. Po provedení tohoto přepočtu lze vypočtený průtok se skutečným průtokem porovnat.

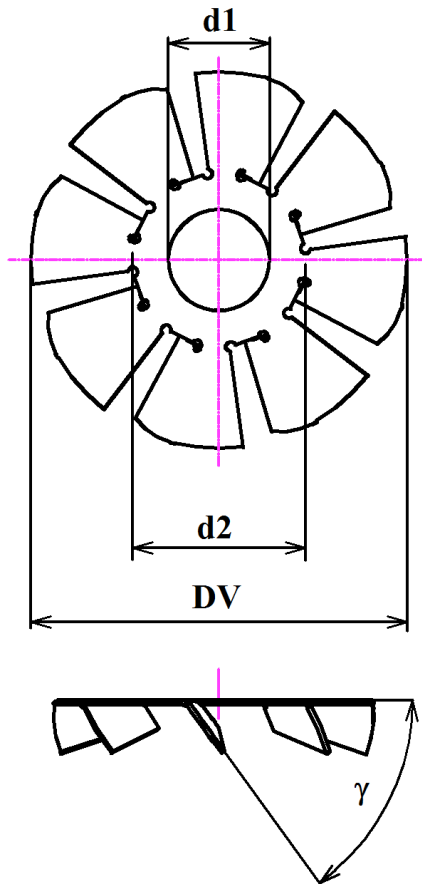
6.2 VÝBĚR VÍŘIČŮ K PROMĚŘENÍ

Pro zkoumaný hořák je k dispozici celá řada vířičů, které se mezi sebou liší průměrem a sklonem lopatek. Z těchto vířičů bylo zapotřebí vybrat takové vířiče, jejichž proměřením se získají nejvíce vypovídající data. Na základě metody plánovaných experimentů (DOE) [25] se rozhodlo vybrat vířiče s nejextrémnějšími parametry, tedy vířiče s největším a nejmenším průměrem a největším a nejmenším sklonem lopatek a vířič o středních parametrech. Tím se získají data pro krajní stavy, což umožní výsledky mezi sebou aproximovat a získat tak přibližné hodnoty i pro ostatní vířiče. Podle tohoto klíče byly vybrány vířiče, jejichž modely i s dále použitým označením jsou znázorněny na obrázku 23.



Obr. 23. Vířiče vybrané pro měření.

Charakteristické rozměry vířičů, které byly předmětem zkoumání, jsou zakótovány na obrázku 24. Hodnoty charakteristických rozměrů vířičů vybraných k měření jsou uvedeny v tabulce 5.



Obr. 24. Zkoumané charakteristické rozměry vířiče.

Tab. 5. Charakteristické rozměry vybraných vířičů.

Vířič	ØD_V (mm)	γ (°)	Ød_1 (mm)	Ød_2 (mm)
280_55	280	55	76	130
280_35	280	35	76	130
260_45	260	45	76	130
240_55	240	55	76	130
240_25	240	25	88	130

Z tabulky je patrné, že vířič 260_45 svými parametry představuje pomyslnou střední hodnotu ostatních vířičů, což umožní přesněji zkoumat vlivy geometrie vířičů na proudění. Proměřením vybrané pětice vířičů tak bude možno aproximovat vliv i ostatních vířičů na proudové pole v low – NO_x hořáku.

Vířič 240_25 se od ostatních vířičů odlišuje větším průměrem d_1 . Aby bylo možno tento vířič usadit do měřicí trati na nosnou trubku, která má průměr 75 mm, musel být vyroben mezikus, který byl na vířič přilepen tavným lepidlem (viz. obr. 25). Díky vyrobenému mezikusu nebylo nutno složitě upravovat konstrukci uložení vířiče uvnitř potrubní trasy.



Obr. 25. Upravený vířič 240_25.

6.3 VÝPOČET GEOMETRICKÉHO VÍROVÉHO ČÍSLA

Pro vybrané víříče se vypočítalo geometrické vírové číslo, které se později porovná s vírovým číslem vypočteným na základě měření. Pro výpočet geometrického vírového čísla bylo použito vztahu (3-3) uvedeného v kapitole 3.3. Jeho tvar byl však poněkud modifikován, neboť literatura [13] předpokládá, že lopatky víříče sahají až ke stěně potrubí, a proto je do vztahu dosazován průměr potrubního kanálu d . U měřených víříčů lopatky ke stěně nedosahují, takže místo průměru potrubního kanálu se dosadil průměr víříče D . Do vztahu se dále dosazuje úhel, jež svírají lopatky s osou potrubní trasy, který se napřed musel vypočítat. Upravený vztah pro výpočet geometrického vírového čísla vypadal následovně:

$$S_G = \frac{2}{3} \cdot \left[\frac{1 - (d_2/D_v)^3}{1 - (d_2/D_v)^2} \right] \cdot \tan(90 - \gamma)$$

V tabulce 6 jsou uvedeny vstupní hodnoty do výpočtu a vypočtená geometrická vírová čísla.

Tab. 6. Vypočtené geometrické vírové čísla.

Víříč	$\varnothing D_v$ (mm)	γ (°)	$\varnothing d_2$ (mm)	S_G
280_55	280	55	130	0.536
280_35	280	35	130	1.092
260_45	260	45	130	0.778
240_25	240	25	130	1.702
240_55	240	55	130	0.556

Z vypočtených hodnot je patrné, že geometrické vírové číslo nejvíce ovlivňuje úhel lopatek.

6.4 PŘÍPRAVNÁ MĚŘENÍ

Před vlastním proměřením víříčů bylo nutné vytvořený výpočtový program a celé navržené zařízení prověřit. Tato fáze práce zabrala hodně času, neboť bylo provedeno mnoho pokusných měření a i kalibrací, podle kterých se stále upravovaly různé komponenty měření a i výpočtový program samotný. Teprve po odladění všech nesrovnalostí a ověření správnosti měřených a vypočtených hodnot bylo možno přikročit k požadovanému měření.

6.4.1 URČENÍ VZORKOVACÍ FREKVENCE

Tento krok je důležitý, neboť při nesprávně nastavené vzorkovací frekvenci by se mohlo stát, že naměřené proudění nebude správně interpretováno. Literatura pro výpočet vzorkovací frekvence SR uvádí následující vztah [19]:

$$SR \geq 2 \cdot f_1 \quad (6-7)$$

kde SR vzorkovací frekvence (Hz)
 f_1 maximální frekvence signálu (Hz)

U některých A/D převodníků se tato vzorkovací frekvence musí násobit počtem vstupních signálů, což ale u použitého převodníku potřeba nebylo. Aby byl tento vztah použitelný, je potřeba napřed zjistit maximální frekvenci, jaká se při měření vířičů vyskytuje. Z tohoto důvodu bylo provedeno několik pokusných měření s nasazeným vířičem, při kterých byla vzorkovací frekvence nastavena na vysokou hodnotu $SR = 15$ kHz a počet vzorků $N = 30\,000$. Výpočet maximální frekvence signálu byl proveden na základě literatury [19]. Z provedených měření se vybrala nejvyšší zjištěná hodnota maximální frekvence a ta se dosadí do výše uvedeného vztahu.

$$SR \geq 2 \cdot f_1 = 2 \cdot 1183 = 2366 \text{ Hz}$$

Na základě tohoto výpočtu byla pro měření vířičů použita vzorkovací frekvence $SR = 3$ kHz.

6.4.2 URČENÍ POČTU VZORKŮ

Spolu se vzorkovací frekvencí se nastavuje počet vzorků. Pro něj platí vztah [19]:

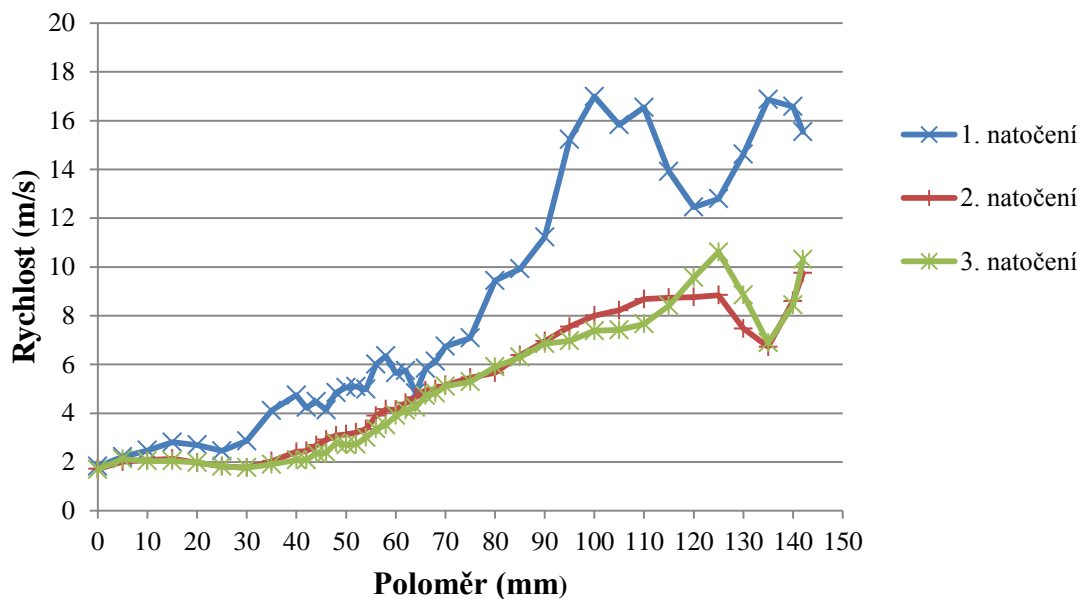
$$N = \left(\frac{1}{u} \cdot \left(\frac{z_a}{2} \right) \cdot T_u \right)^2 = \left(\frac{1}{2} \cdot 2,33 \cdot 45 \right)^2 = 2748 \quad (6-9)$$

kde u předpokládaná nejistota měření (%)
 $z_a/2$ proměnná závislá na úrovni spolehlivosti (-)
 T_u předpokládaná intenzita turbulence (%)

Předpokládaná nejistota měření byla po úvaze zvolena 2 % a hodnota proměnné závislé na nejistotě měření pak byla zvolena dle literatury [18]. Z výpočtu provedeného pokusného měření se odečetla intenzita turbulence, která nepřesáhla hodnotu 45 %. Vypočtený počet vzorků byl zaokrouhlen, takže všechna další měření odečítaly 3 000 vzorků.

6.4.3 VYTVOŘENÍ MĚŘICÍHO PLÁNU

Dalším cílem pokusného měření bylo vytipování oblastí, ve kterých by se mohla náhle měnit průběhy rychlostních profilů. Při návrhu polohy měřicích bodů se musí dbát na dostatečné pokrytí těchto oblastí. Za tímto účelem byla provedena série měření jednoho vířiče v několika polohách. Krok posuvu sondy na traverzěru byl nastaven na 5 mm. Z grafu 5 je vidět změna rychlostních profilů v závislosti na natočení vířiče. Pro lepší názornost byly v grafu uvedeny křivky jen pro tři natočení, změřeno však bylo šest natočení. Jak je vidět, natočení vířiče vůči sondě značně ovlivňuje rychlostní profil, což se i obecně předpokládalo. Krok natočení vířiče musí být tedy relativně malý, aby se dosáhlo co nejlepšího pokrytí pro zjištění všech trendů.

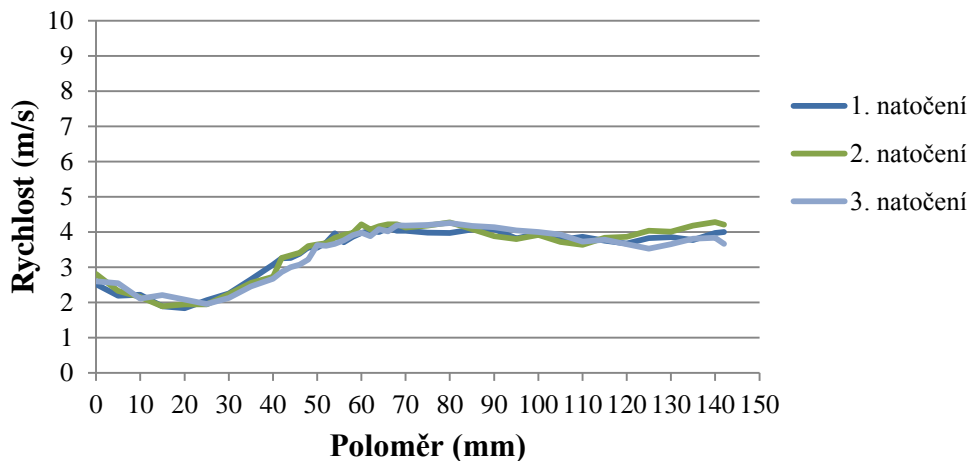


Graf 5. Závislost rychlostního profilu na natočení víříče při ověřovacím měření. Vzdálenost sondy od víříče je 60 mm.

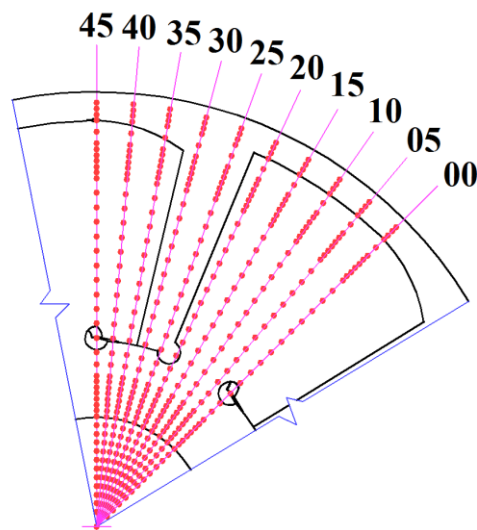
S rostoucí vzdáleností od víříče se však vliv natočení víříče zmenšuje a rychlostní profily se postupně ustalují, jak potvrzuje graf 6. Proto ve vzdálenějších polohách může být krok natočení víříče větší. Po vyhodnocení měření tak bylo rozhodnuto, že krok natočení víříče bude 5° a bude proměřena vždy celá oblast připadající na jednu lopatkovou mezeru víříče, tedy výsledný úhlový rozsah měření bude 45° . Při vzdálenějších polohách bude krok natočení roven 10° .

Z uvedených grafů je také patrný trend vývoje rychlostního profilu v průřezu potrubní trasy. Tyto trendy byly ještě porovnány s vypočtenou intenzitou turbulence, pomocí kterých se tak zjistilo, že první oblast změn se nachází v místech upevnění víříče na nosnou trubku a druhá v oblasti kolem konce víříče. Tyto dvě oblasti bylo zapotřebí pokrýt více měřicími body. Hustěji se také pokryla oblast kolem středu měřicí tratě, neboť zde bylo nutno potvrdit, anebo vyvrátit existenci zpětného toku, ke kterému při vířivém proudění ve spalovacích komorách dochází. Každé natočení víříče bude proměřeno 45 měřicími body, jejichž rozložení je patrné z obrázku 26, kde je zobrazeno rozložení pro víříč o průměru 280 mm. Pro lepší pokrytí víříčů o průměru 240 mm byla poloha některých bodů změněna, ale celkový počet bodů zůstal stále zachován.

Určení vzdálenosti měřicích rovin bylo rozvrženo tak, aby vzdálenost byla vždy násobkem průměru potrubní trasy. Minimální vzdálenost byla určena s ohledem na bezpečnou vzdálenost sondy od lopatek víříče. Nultá rovina tak byla určena na čelo nosné trubky, jejíž pozice v měřicí trati šla snadno určit pomocí laserových ukazovátek používaných pro nastavení správné polohy sondy.



Graf 6. Závislost rychlostního profilu na natočení vířiče při ověřovacím měření. Vzdálenost sondy od vířiče je 300 mm.

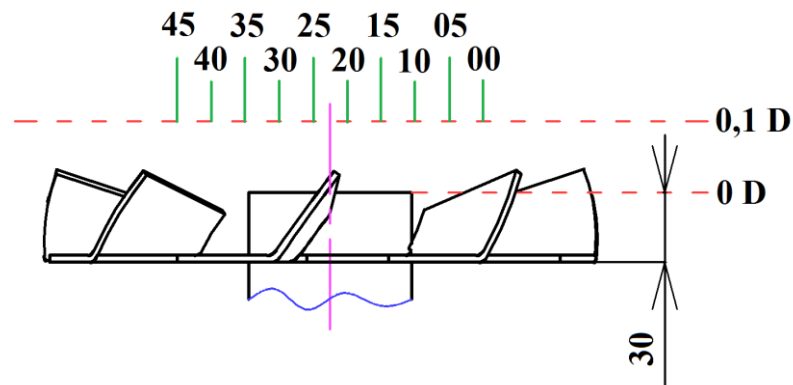


Obr. 26. Síť měřicích bodů.

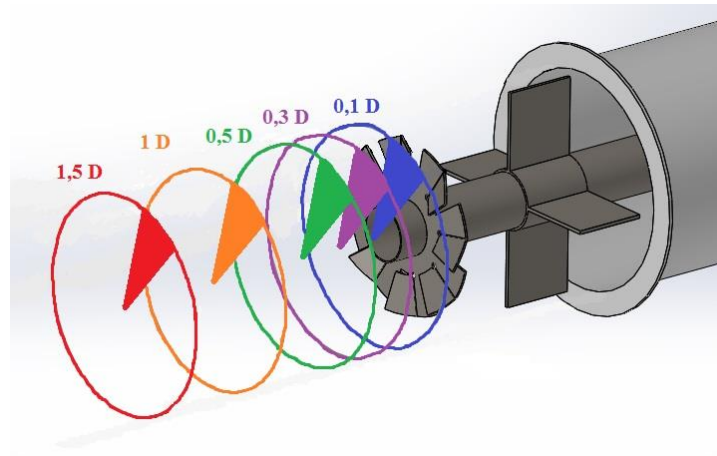
První měřicí rovina je nastavena ve vzdálenosti 30 mm od nulté roviny, což odpovídá 0,1 průměru potrubní trasy D (viz. obr. 27). Od nulté roviny jsou další měřicí roviny ve vzdálenostech 90 mm (0,3 D), 150 mm (0,5 D), 300 mm (1 D) a 450 mm (1,5 D) – viz. obr. 28. Vířič byl na nosné trubce vzdálen vždy 30 mm od čela nosné trubky.

Na obrázcích 29 a 30 je vidět vliv úhlu lopatek na zakrytí měřicích poloh. Představa o vzájemné pozici lopatek a měřicích bodů je důležitá pro správné vyhodnocení naměřených rychlostních profilů.

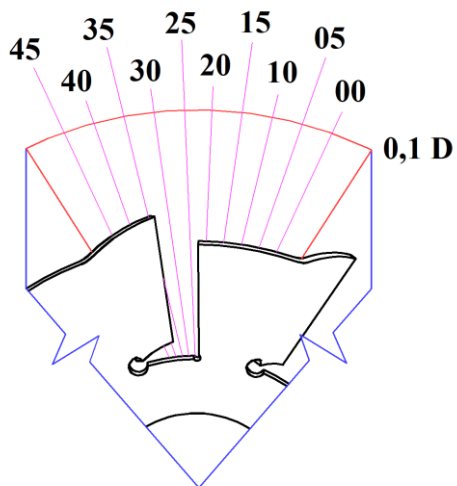
Pro snížení objemu měření bylo rozhodnuto, že všech deset natočení bude proměřeno pouze v prvních dvou měřicích rovinách, v rovinách vzdálených 0,5 D a 1 D bude proměřeno jen pět natočení s úhlovým krokem 10° a v poslední měřicí rovině bude změřeno jen jedno natočení, které by mělo potvrdit, anebo vyvrátit trend rychlostních profilů. Z vytvořeného měřicího plánu vyplývá, že bude proměřeno pět vířičů v celkem 31 polohách, které budou proměřeny na 45 poloměrech, což je při zvoleném počtu vzorků 41 850 000 hodnot.



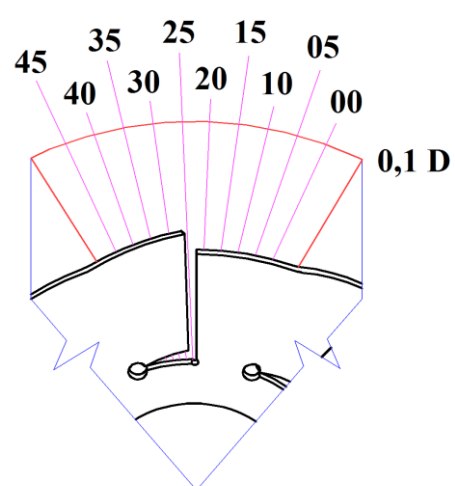
Obr. 27. Rozsah natočení vířiče a určení nejmenší vzdálenosti sondy od vířiče.



Obr. 28. Vzdálenost měřicích rovin od vířiče.



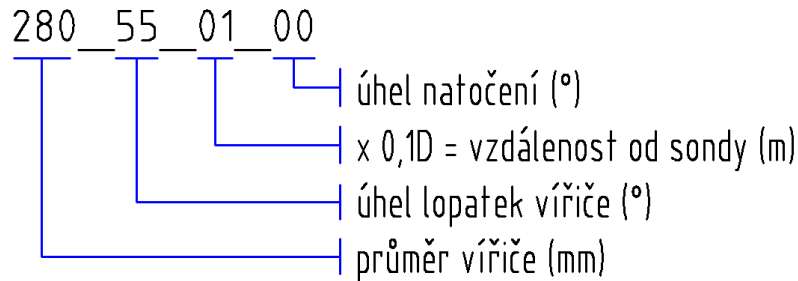
Obr. 29. Zakrytí měřicích poloh při úhlu lopatek 25°.



Obr. 30. Zakrytí měřicích poloh při úhlu lopatek 55°.

6.5 SYSTÉM TŘÍDĚNÍ DAT

Pro velký objem naměřených dat bylo nezbytné zavést jednotný systém třídění a pojmenování dat. Aby se už z názvu poznalo, o jaké měření se jedná, byl vytvořen klíč pro pojmenování, který je uveden na obrázku 31.



Obr. 31. Klíč pro pojmenování měření.

Vyexportovaná data se ukládala do připravených složek, kde hlavní rozdělení bylo podle typu vířiče a poté podle vzdálenosti vířiče od sondy. Tím byla zajištěna přehlednost všech datových souborů. Přesné dodržení tohoto klíče bylo nezbytné pro správnou funkci výpočtového programu.

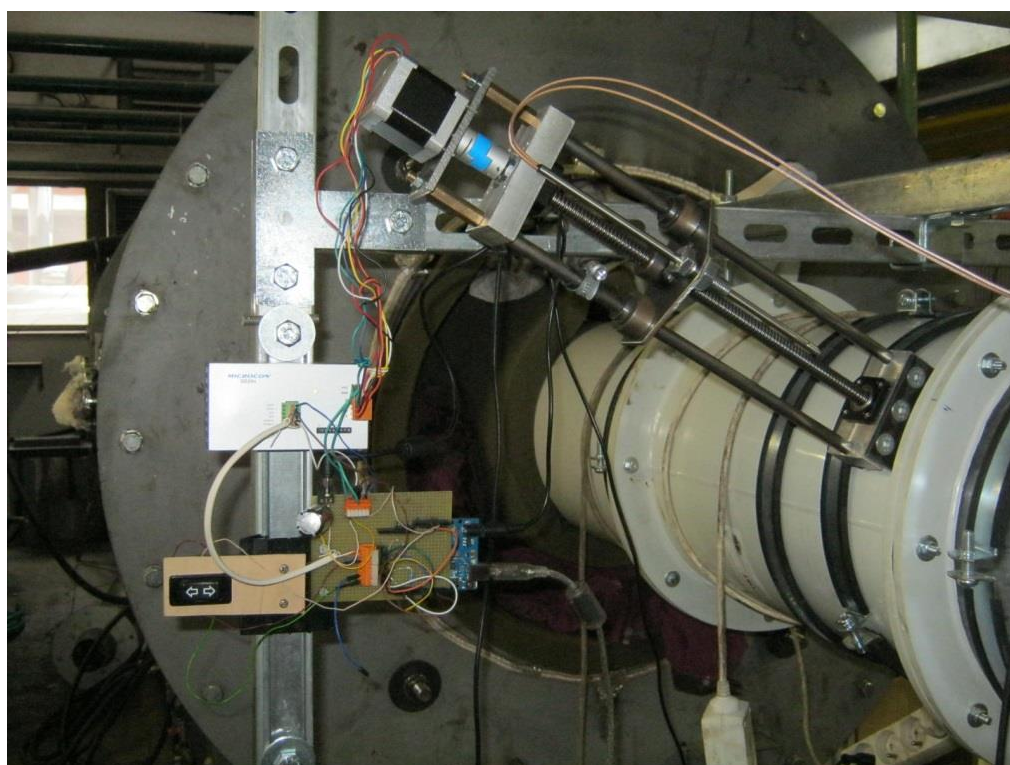
7 MĚŘENÍ

Vlastní měření rychlostních profilů bylo provedeno ve dnech od 18. 3. do 20. 3. a od 14. 4. do 15. 4. 2015. Z důvodu vytíženosti laboratoře nebylo možné provést měření najednou. V této kapitole budou popsány práce, které se při měření prováděly.

7.1 SESTAVENÍ MĚŘICÍCH KOMPONENT

Montáž měřicí tratě již byla popsána a není nutné ji zde popisovat znovu. Přiložené obrázky slouží pro doplnění představy, jak ve skutečnosti měření vypadalo. Na obrázku 32 je vidět traverzér včetně elektroniky připevněný k měřicí trati.

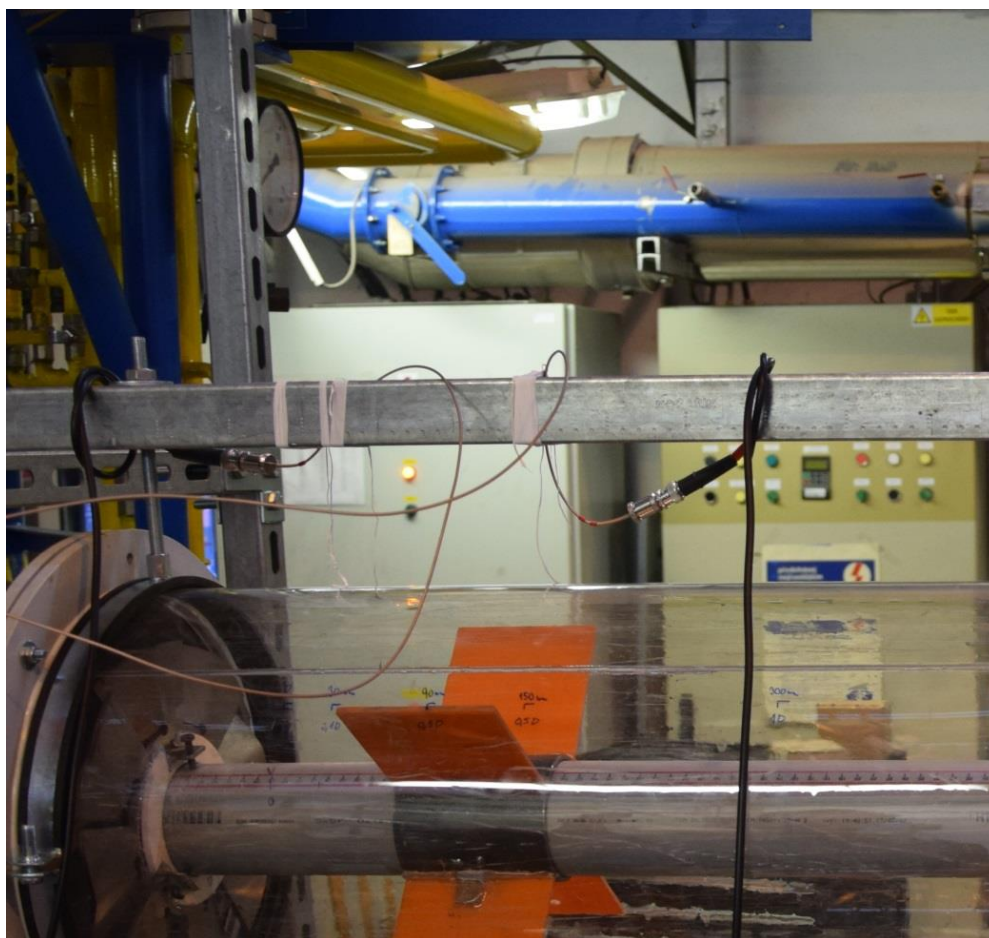
Na obrázku 33 jsou vidět propojeny CTA anemometry s A/D převodníkem. Už dříve bylo zdůrazněno, že při zapojování je třeba dát pozor na izolaci kabelového propojení. Na obrázku 34 je vidět řešení tohoto problému. Na obrázku 35 je pak vidět celé připravené měřicí pracoviště. Na závěr se ještě spustil ovládací systém zkušebny hořáků, ve kterém se zapnul ventilátor spalovacího vzduchu a frekvenčním měničem se nastavil požadovaný průtok vzduchu. Ten se pohyboval vždy kolem 900 Nm³/h. Při takovém průtoku byly vytvořeny modely proudění metodou CFD, se kterými se měly naměřené rychlostní profily porovnat.



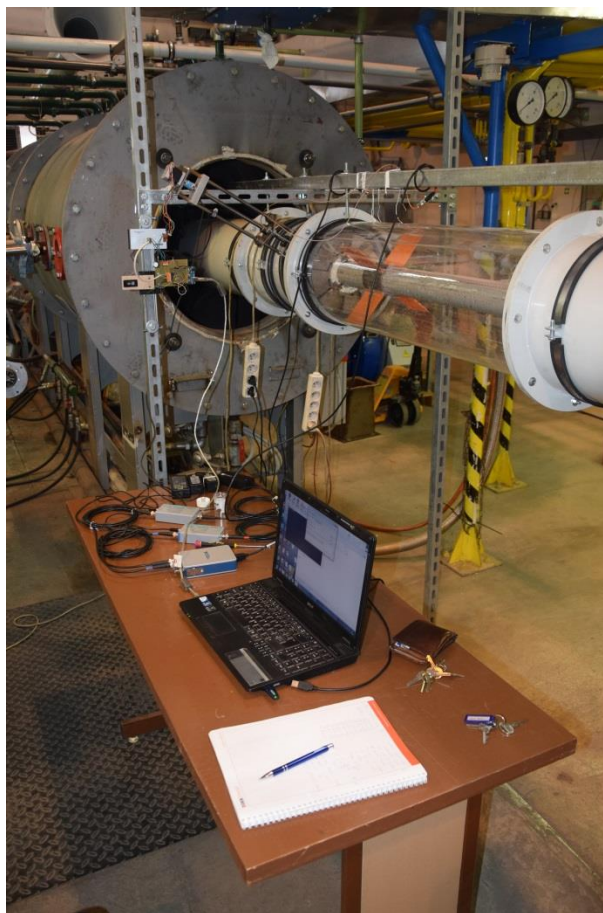
Obr. 32. Traverzér i s elektronikou upevněný na měřicí trati.



Obr. 33. Propojené komponenty na pracovním stole.



Obr. 34. Umístění konektorů držáku sondy.



Obr. 35. Celkový pohled na připravené měřicí pracoviště.

7.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ

Při každém měření se pomocí kontrolního otvoru nastavoval víříč do požadované polohy. Následně se musela sonda ustavit do počátečního bodu měření. To se z důvodu bezpečnosti sondy provádělo pomocí tlačítka, se kterým bylo najíždění ke stěně potrubí bezpečnější. Po najetí se vynuloval program pro traverzér. V programu StreamWare Pro se nastavila konfigurace pro měření, vzorkovací frekvence a počet vzorků. Dále se do programu nahrála tabulka s měřicími body. Protože programy pro měření a polohování sondy mezi sebou nijak nekomunikovaly, musela se tato tabulka načíst do každého programu zvlášť. Na závěr se do sešitu zapsala aktuální teplota proudícího vzduchu, která se odečetla z kontrolní obrazovky ovládacího systému zkušebny. Vlastní měření představovalo přepínání mezi programem StreamWare Pro, kde se spustilo měření aktuálního měřicího bodu, a programem traverzéra, ve kterém se po odměření potvrdilo posunutí do dalšího bodu. Za hodinu se dalo změřit až pět poloh víříče. Po změření všech poloh víříče se nejprve vyjmula sonda z držáku, aby se při další manipulaci nepoškodila. Z potrubní trasy se demontovalo potrubí s kontrolním otvorem a na něj navazující průhledné potrubí, ve kterých bylo celé uložení víříče. Do zbytku měřicí tratě se nezasahovalo. Demontáž probíhala tak, že se tyto dva díly zavěsily na stahovací popruhy a poté se uvolnily všechny spoje. Na popruzích se pak demontovaná část spustila pod potrubní trasu, kde se pak pohodlně vyjmul proměřený víříč a usadil se nový. Přitahováním

popruhů se potrubí už s novým vířičem vrátilo do původní polohy, kde se opět přimontovalo. Po tomto úkonu se mohla opět nasadit sonda s novou ucpávkou a zahájit další měření. Celkově výměna vířičů trvala cca 1,5 hodiny. Proměření jednoho vířiče i s jeho výměnou trval přibližně jeden den.

7.3 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Všechna změřená data byla vyexportována do textových souborů, kterých je z provedených měření celkem 155 a jejich velikost je 573 MB. Aby tato data mohla být rychleji a komplexněji zpracována, bylo použito programu `HW_data_processing.py` [26], což je uživatelská nástavba výpočtového programu `HotWire_calc.py`, která rovněž pracuje v programovacím prostředí Python. Aby program `HW_data_processing.py` pracoval správně, je důležité všechny vyexportované soubory se surovými daty pojmenovávat a ukládat podle klíče, který je uveden v kapitole 6.5. Program tak může načítat zadaný vektor souborů a ukládat do operační paměti všechna vyhodnocená data. Ve výsledku je tak možné vytvářet souhrnné grafy ze všech zpracovaných souborů, které jsem si upravil pro potřeby této práce.

Před samotným vyhodnocením dat bylo nutno do souborů se surovými daty přidat aktuální teplotu proudícího vzduchu, která byla během experimentu zjišťována nezávisle. Do programu `HotWire_calc.py` se doplní teplota žhaveného elementu, která byla během všech měření konstantní. Do nastavbového programu se zapisuje rychlost proudění před vířičem, která se dopočítává podle skutečných podmínek v programu `Air_flow_calc.xlsx`. Dále se nastavují hodnoty pro vykreslení samotných grafů. Jedná se o zadání požadovaného natočení a polohy sondy, pro které se v příslušných grafech vykreslí křivky. Na závěr se do programu zadává vektor souborů se surovými daty, která má program zpracovat. Soubory v tomto vektoru jsou řazeny stejně, jak jsou soubory řazeny ve složkách v počítači. Lze tak zpracovávat vybrané skupiny souborů anebo najednou všechna data.

Výsledkem jsou vypočítané potřebné veličiny, které jsou souhrnně ukládány do textového souboru. Grafy jsou ve formě obrázku s příponou `.png` ukládány do příslušných složek se surovými daty. Důležité bylo určit, které grafy a v jaké podobě je z vypočtených dat generovat. Po zkouškách bylo rozhodnuto, že program bude graficky zpracovávat následující veličiny:

- celkovou vypočtenou rychlost U_0
- vypočtený úhel rychlosti φ
- vektor axiální složky rychlosti U
- vektor axiální složky rychlosti V
- kinetickou energii turbulence k_T

Aby bylo dosaženo bezrozměrných grafů, které se snáze porovnávají, jsou rychlosti U_0 , U a V před zapsáním do grafu děleny zadávanou rychlostí před vířičem $U_{\text{poč}}$ a hodnota polohy sondy před zapsáním do grafu dělena průměrem potrubního kanálu D . Úhel se vykresluje ve stupních, kinetická energie turbulence v m^2s^{-2} . Do jednoho obrázku se pod sebe vykreslují grafy jednotlivých vzdáleností, ve kterých jsou křivky dané hodnoty z požadovaného

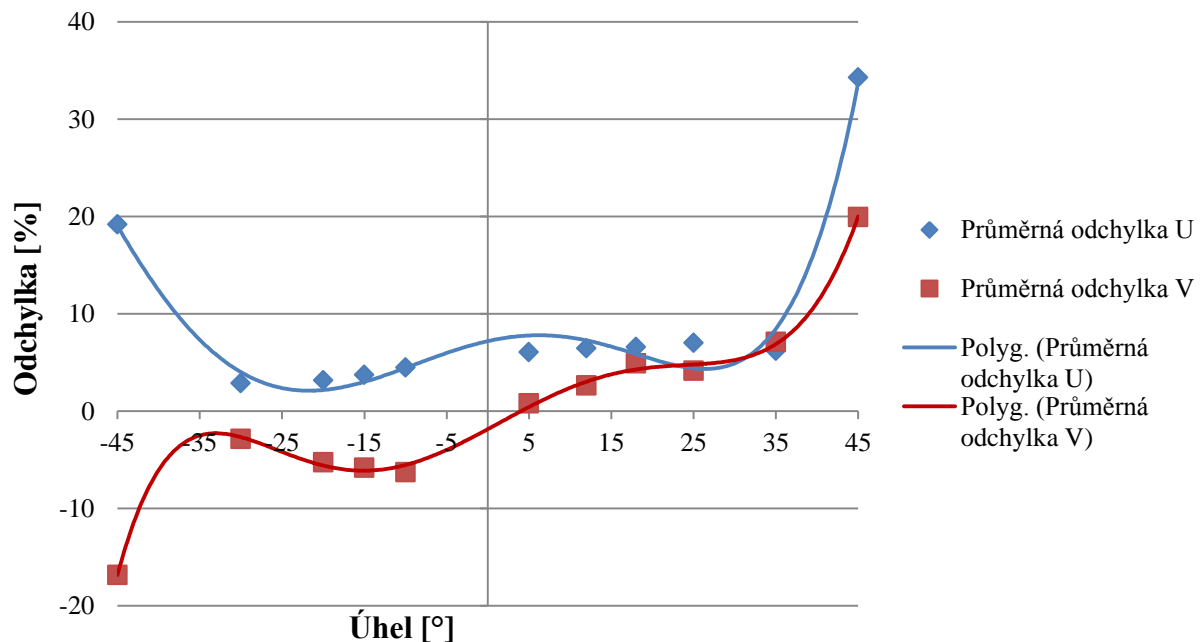
natočení. Z jednoho obrázku tak lze sledovat vývoj veličiny nejen podle natočení, ale i podle vzdálenosti víříče od sondy. Dále jsou tvořeny polární grafy, ze kterých je patrný vývoj rychlosti přes všechna natočení víříče při dané vzdálenosti víříče od sondy. Všechny vytvořené grafy, stejně jako textový soubor s výsledky, jsou přiloženy v příloze tohoto dokumentu, včetně obou výpočtových programů.

8 VÝČET NEJISTOT MĚŘENÍ

Každé měření probíhá s určitou chybou, která je pro správné vyhodnocení naměřených dat důležitá. V této kapitole bude uveden výčet všech vlivů které mohou ovlivňovat přesnost naměřených dat. Odchytky měření lze rozdělit na dva druhy. Odchytky, které se dají konkrétně vypočítat a odchytky, které dosud vyčíslit nelze.

8.1 VYČÍSLITELNÉ NEJISTOTY MĚŘENÍ

Jedná se především o nepřesnosti, které sebou nese použitá metoda měření. Výčet jednotlivých odchylek a jejich standardních velikostí udává literatura [19]. Ta ale uvádí pouze závislost velikosti odchylky na změřené rychlosti, zatímco literatura [20] uvádí, že velikost odchylky u dvou - drátkových sond je značně závislá na úhlu proudění θ , což potvrdilo i pokusné měření na kalibrátoru (viz. podkapitola 4.5.5, graf 3 a graf 4). Při rozkladu vektorů rychlosti se v prvním kroku provede výpočet efektivní ochlazovací rychlosti U_{C1} a U_{C2} na základě rychlostní kalibrace, což znamená, že odchylka vzniklá rychlostní kalibrací se tak zcela přenesla do nejistoty směrové kalibrace. Tak lze pojmout výslednou velikost odchylky měření pouze jako závislost na úhlu proudění θ . Z grafů je navíc patrné, že pro dvou - drátkovou sondu nelze určit jednotnou velikost odchylky pro oba rozkládané vektory, neboť závislost velikosti odchylky na úhlu je pro každý vektor jiná. Zjištěné odchylky z uvedených grafů byly zprůměrovány a byly jimi proloženy vhodné polynomy. Pro odchylku vektoru U polynom 5. řádu, pro odchylku vektoru V polynom 6. řádu (viz. graf 7).



Graf 7. Proložené polynomy zprůměrovanými odchylkami.

Rovnice těchto proložených křivek jsou následující:

$$\Delta_U = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \theta^5 + 1 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^4 - 0,0003 \cdot \theta^3 - 0,013 \cdot \theta^2 + 0,1882 \cdot \theta + 7,1912$$

(8-1)

$$\Delta_V = -1 \cdot 10^{-9} \cdot \theta^6 + 3 \cdot 10^{-7} \cdot \theta^5 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^4 - 0,0006 \cdot \theta^3 + 0,0026 \cdot \theta^2 + 0,4563 \cdot \theta - 1,8452$$

(8-2)

kde Δ_U odchylka vektoru U (%)
 Δ_V odchylka vektoru V (%)

V této experimentálně zjištěné odchylce se ukrývá nepřesnost rychlostní i směrové kalibrace, polohy sondy, stárnutí drátku, nepřesnost rozkladu vektorů rychlosti a další vlivy, které jsou uvedeny v literatuře [19]. Nejistoty, které tato odchylka nezahrnuje, se týkají změn proudícího vzduchu během samotného měření. Změny teploty a tlaku se projevují na změnu hustoty vzduchu a tím se mění i hmotnostní tok vzduchu. Změna vlhkosti vzduchu mění jeho elektrickou vodivost. Vlivy teploty a tlaku nejsou závislé na rychlosti ani směru proudění a počítají se dle následujících vzorců [19].

Vliv změny teploty:

$$u_{\rho,T} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta T}{273} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{273} = 0,0021 \quad (8-3)$$

kde $u_{\rho,T}$ odchylka způsobená teplotní diferencí (-)
 ΔT teplotní diference během experimentu (°C)

Dosažená hodnota teplotní diference byla zvolena dle standardních hodnot, které uvádí literatura [19].

Vliv změny tlaku:

$$u_{\rho,P} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta P + P_0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1 + 99,33} = 0,0058 \quad (8-4)$$

kde: $u_{\rho,P}$ odchylka způsobená tlakovou diferencí (-)
 P_0 tlak při kalibraci (kPa)
 ΔP tlaková diference (kPa)

Vliv změny tlaku je v literatuře [19] uveden chybně, proto byl opraven do výše zmíněné podoby. Dosažené hodnoty byly zvoleny na základě porovnání kolísání tlaků z měřicí karty ovládacího systému zkušebny.

Vliv změny vlhkosti vzduchu už je závislý na rychlosti proudění, ale změna této rychlosti se na výsledku prakticky neprojeví. Proto lze tuto odchylku považovat za konstantu. Do vztahu

tak byla dosazena střední rychlost z rychlostní kalibrace, tedy $U_{vlh} = 7,5 \text{ ms}^{-1}$. Celá odchylka se vypočte z následujícího vztahu:

$$u_{vlh} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{U_{vlh}} \cdot \frac{\partial W}{\partial P_{wv}} \cdot \Delta P_{wv} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{7,5} \cdot 0,075 \cdot 1 = 0,0057 \quad (8-5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial P_{wv}} \approx 0,01 \cdot U_{vlh} \text{ na } 1 \text{ kPa } \Delta P_{wv} = 0,01 \cdot 7,5$$

kde u_{vlh} odchylka způsobená diferencí vlhkosti (-)
 ΔP_{wv} diference tlaku nasycených vodních par (kPa)
 U_{vlh} rychlost proudícího vzduchu pro výčet nejistot (ms^{-1})

Hodnota diference tlaku nasycených vodních par byla opět zvolena na základě běžných hodnot doporučených literaturou [19].

Souhrn všech vlivů se spočítá dle následujícího vztahu [19]:

$$u' = 2 \cdot \sqrt{\sum u_i^2} \cdot 100 = 2 \cdot \sqrt{0,0021^2 + 0,0058^2 + 0,0057^2} \cdot 100 = 1,68 \% \quad (8-6)$$

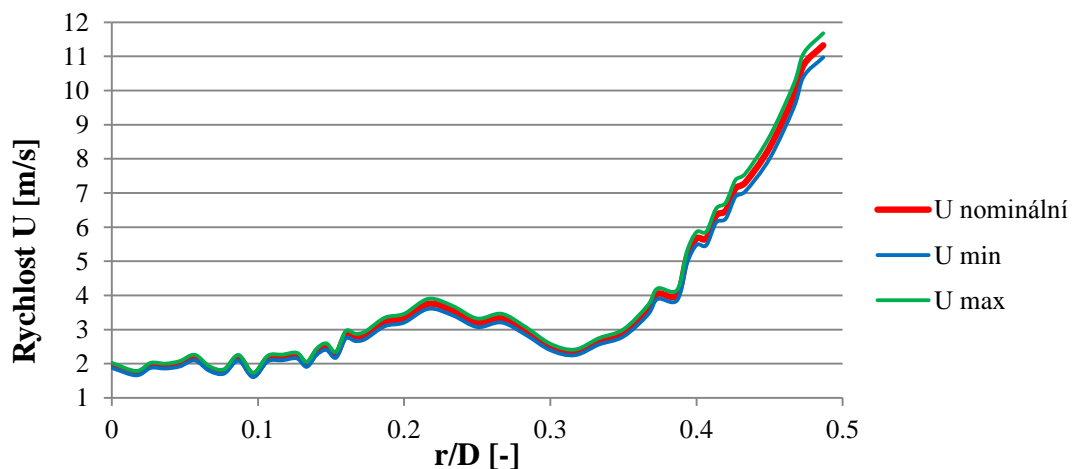
kde u' představuje nejistotu vedlejších vlivů (%).

Vypočtená nejistota vedlejších vlivů je stále konstantní. Spolu se zjištěnou hlavní odchylkou, počítanou dle polynomů (8-1) a (8-2) vytváří celkovou nejistotu měření počítanou dle vztahu:

$$u_{CU} = \sqrt{u'^2 + \Delta_U^2} \quad (8-7)$$

$$u_{CV} = \sqrt{u'^2 + \Delta_V^2}$$

kde u_{CU} a u_{CV} jsou celkové nejistoty měření závislé na úhlu proudění θ . Jejich hodnoty jsou pro základní rozsah úhlů uvedeny tabulce 7. Graf 8 představuje promítnutí pole nepřesnosti v závislosti na rychlosti do výsledku ilustračního měření. Zobrazen je vektor rychlosti U .



Graf 8. Promítnutí pole nepřesnosti do výsledku ilustračního měření.

Tab. 7. Vypočtené odchylky měření.

Úhel	Odchylka v %	
	U	V
-40	13.53	7.43
-30	7.49	3.88
-20	3.99	3.79
-15	2.60	4.94
-10	2.54	6.07
-5	3.34	6.44
0	4.71	5.81
5	6.20	4.33
10	7.38	2.50
15	7.96	1.73
20	7.77	2.95
30	6.87	4.23
40	5.54	5.03

8.2 OSTATNÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ

Do výsledků měření se promítají další vlivy, které provázely celý experiment, ale velikost těchto vlivů nebyla zjištěna. Přesto je nezbytné se o těchto vlivech zmínit. V první řadě se jedná o uložení víříče v měřicí trati. Odchýlení víříče od středu měřicí trasy bylo ovlivněno jednak součtem výrobních nepřesností jednotlivých komponentů pro uložení víříče, jednak i nepřesností válcovitosti samotného potrubí, ve kterém se s víříčem pohybovalo. Víříč byl na uložení usazován bez jakýchkoliv přípravků, takže nelze s jistotou tvrdit, že víříč byl vždy usazen zcela přesně kolmo na osu měřicí tratě. Další odchylky vznikly při ustavování víříče do měřicích poloh, což se dělalo podle ručně rýsovaných stupnic, které se jistě nemohou rovnat cejchovaným stupnicím na měřidlech.

V souvislosti s polohou víříče souvisí i vlastní poloha sondy. Ačkoliv její poloha ve středu měřicí trati byla nastavována podle laserových ukazovátek, tak přesnost jejího pohybu už závisela na přesnosti traverzéro. Při měření v blízkosti stěny potrubní trasy pak měření pravděpodobně ovlivňovala ne zcela těsná ucpávka.

Pro porovnání dat z jednotlivých měření je nutné brát v potaz rozdílný průtok vzduchu. Ten nešel pomocí frekvenčního měniče ventilátoru spalovacího vzduchu nastavit na přesnou hodnotu, neboť odečítání průtoku vzduchu, dle kterého se průtok nastavoval, odečítal se značnými odchylkami. Proto lze pouze konstatovat, že průtoky vzduchu při jednotlivých měření se vždy blížily stejné hodnotě.

Při porovnávání skutečného průtoku s průtokem vypočteným z naměřených rychlostních profilů je třeba uvažovat i případné ztráty, vzniklé netěsnostmi v potrubní trase. Jako

největšími zdroji úniků proudícího vzduchu je považováno zaslepení přívodu spalovacího vzduchu k hořáku a kontrolní otvor pro manipulaci s vířičem. Do jaké míry se nepřesnosti při porovnání průtoku vztahují na ztráty v potrubí, nebylo dosud nezjištěno.

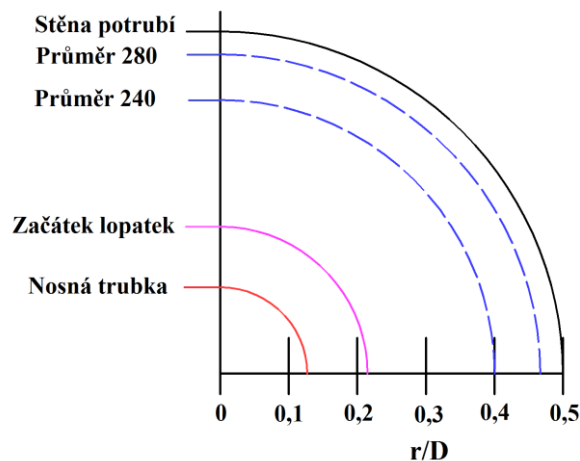
Pro zjištění, jak moc se tyto vlivy promítají do výsledné odchylky měření, by byla třeba provést opakovaná měření. Zjištěné odchylky by se poté zprůměrovaly a zahrnuly do celkového výčtu nejistot. Z časových důvodů ale nebylo možné tato měření vykonat.

9 VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT

Naměřená a vypočtená data je třeba vyhodnotit, aby se zjistilo, co získaná data vypovídají. Cílem rozboru dat je především zjištění, zda jsou naměřená data reálná, nebo zda je třeba dalšího upřesnění.

9.1 VYHODNOCENÍ RYCHLOSTNÍCH PROFILŮ

Vyhodnocení rychlostních profilů má stěžejní význam, neboť právě ony se budou dále porovnávat s vymodelovaným prouděním predikovaným metodou CFD. V kapitole 7.3 bylo popsáno, které veličiny jsou vypočítány a jakým způsobem jsou dále zpracovány. Toto vyhodnocení má za cíl popsat, co se s proudem vzduchu za vířičem děje. Při vyhodnocování jednotlivých poloh je třeba mít neustále představu o vzájemné poloze sondy a lopatek vířiče. Na obrázku 36 je vyznačena geometrie vířiče vztažená na bezrozměrný poloměr. V okolí vyznačených poloměrů lze očekávat vyšší gradienty rychlostí.

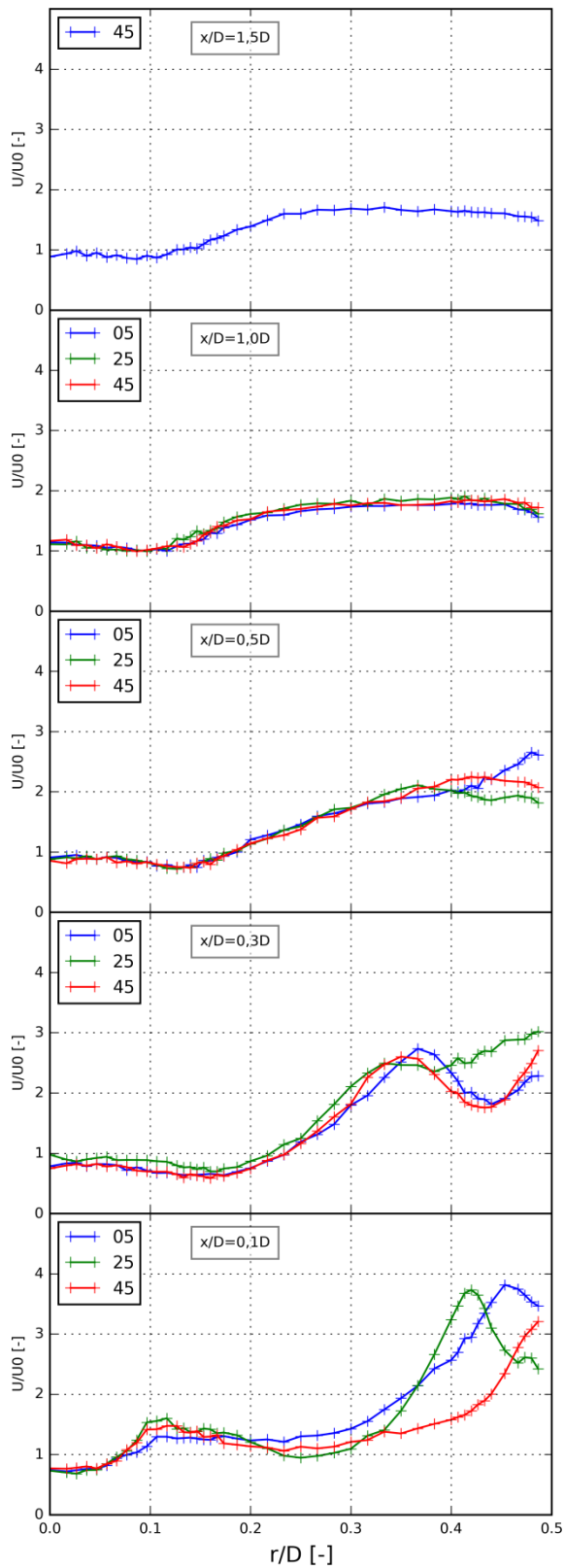


Obr. 36. Geometrie vířičů vztažené na bezrozměrný poloměr.

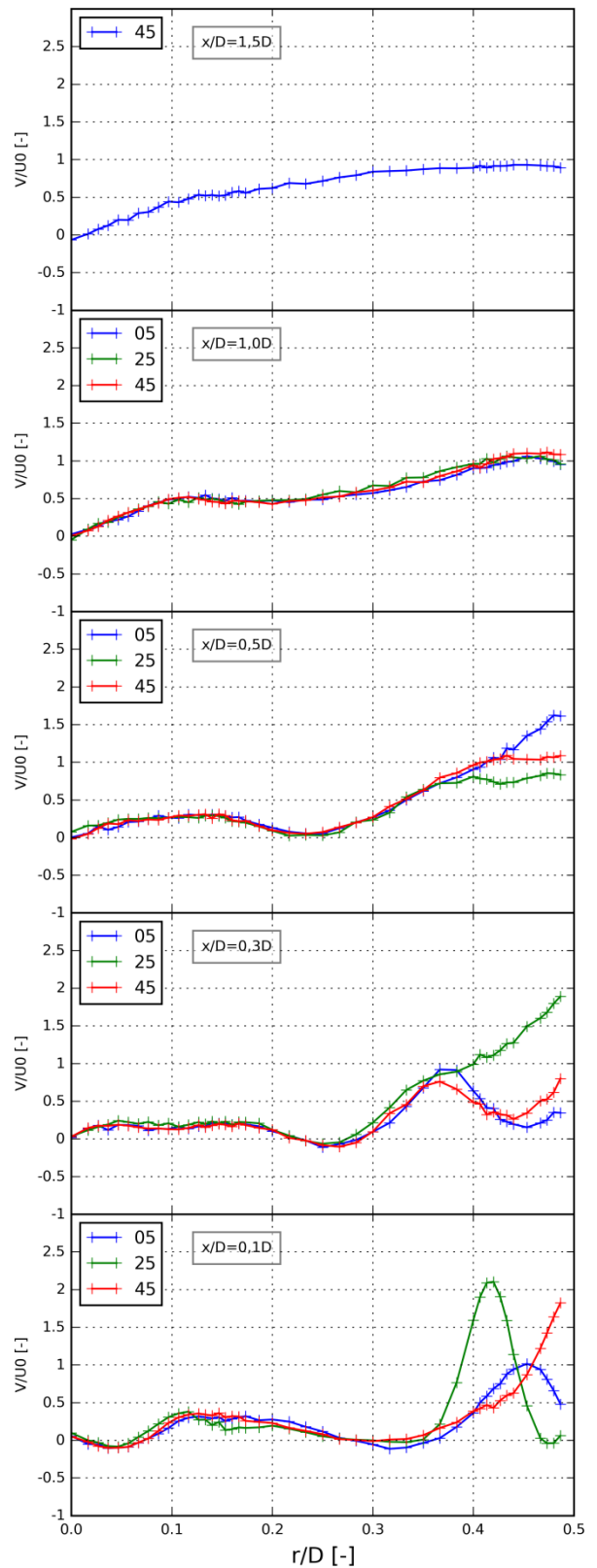
Protože by rozbor všech získaných rychlostních profilů byl velmi obsáhlý, bude popis dat uveden pouze pro vířič o průměru 280 mm a úhlu lopatek 55°.

Vektory rychlosti U a V jsou uvedeny v grafech 9 a 10. Je v nich patrný trend vývoje vektorů jak v závislosti na natočení vířiče, tak i na vzdálenosti vířiče od sondy. Na první pohled je patrné, že axiální složka rychlosti je vždy větší, než tangenciální. Dále je z obou grafů patrné, že vliv natočení vířiče se nejvíce projevuje hned za vířičem. S rostoucí vzdáleností vířiče od sondy se tento vliv snižuje.

Axiální složka rychlosti je vždy ve středu potrubí nízká, což je dáno zakrytím nosnou trubkou vířiče. V oblasti upevnění vířiče na nosnou trubku je patrný lokální nárůst rychlosti u všech natočení, což je pravděpodobně způsobeno protékáním vzduchu mezi vířičem a nosnou trubkou.



Graf 9. Vývoj vektoru rychlosti U .

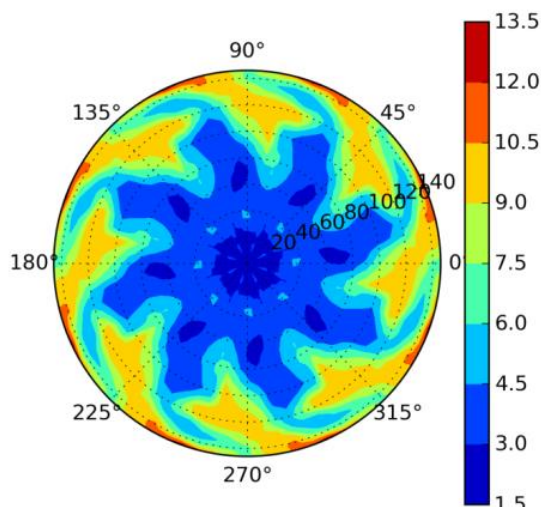


Graf 10. Vývoj vektoru rychlosti V .

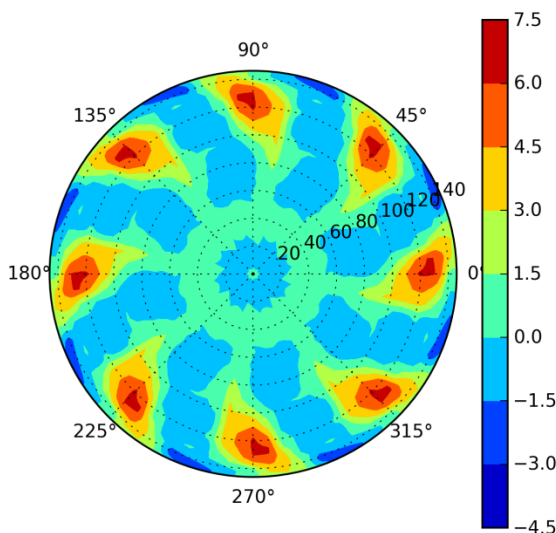
Poté se profily rychlosti mění v závislosti na poloze lopatek víříče. K výrazným změnám dochází v místě ukončení víříče, kde dochází k buď k nárůstu axiální rychlosti, což je způsobeno velkým objemem vzduchu obtékající víříč, ale v místech, kde je sonda zakryta lopatkou víříče, dochází k poklesu axiální rychlosti. Vývoj rychlosti přes všechna natočení ve vzdálenosti $0,1 D$ je vyobrazeno na obrázku 37. V něm je patrné zvýšení rychlosti v místech rozevření lopatek. S rostoucí vzdáleností od víříče se lokální extrémů vyhlazují a maxima axiální rychlosti, která jsou na počátku v oblasti mezi víříčem a stěnou potrubí se přesunuje ke středu potrubní trasy.

Tangenciální složka rychlosti je vždy u středu nulová, což potvrzuje známé definice. Změna opět nastává u spojení nosné trubky s víříčem, což ukazuje, že proud vzduchu, který prochází kolem nosné trubky, je značně turbulentní.

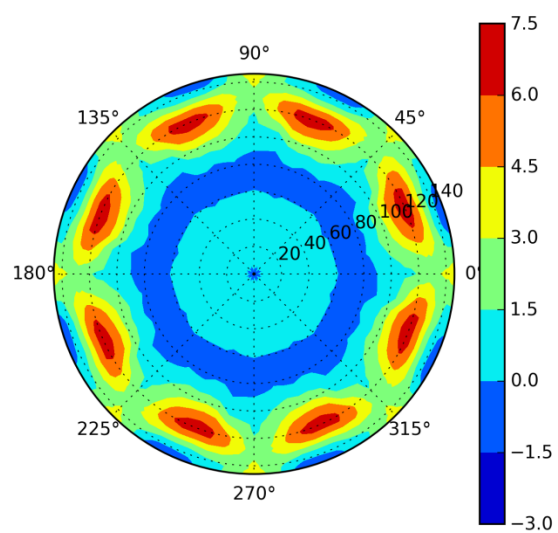
Další změna nastává na konci víříče, kdy v určitých oblastech dochází k prudkému nárůstu a vzápětí k ještě prudšímu poklesu až do záporných hodnot. Tato změna vykazuje, že v oblasti toku vzduchu přes hranu lopatky se stává proudění protisměrné. To potvrzují i obrázky 38 a 39, kde ve vzdálenosti $0,1 D$ jsou patrné oblasti s protisměrným prouděním, které se ve vzdálenosti $0,3 D$ spojí a vytvoří konstantní protisměrný tok. S rostoucí vzdáleností však tento tok zaniká a vyhlazují se lokální extrémů podobně jak u axiální složky.



Obr. 37. Vývoj axiální složky rychlosti [ms^{-1}] ve vzdálenosti $0,1 D$.



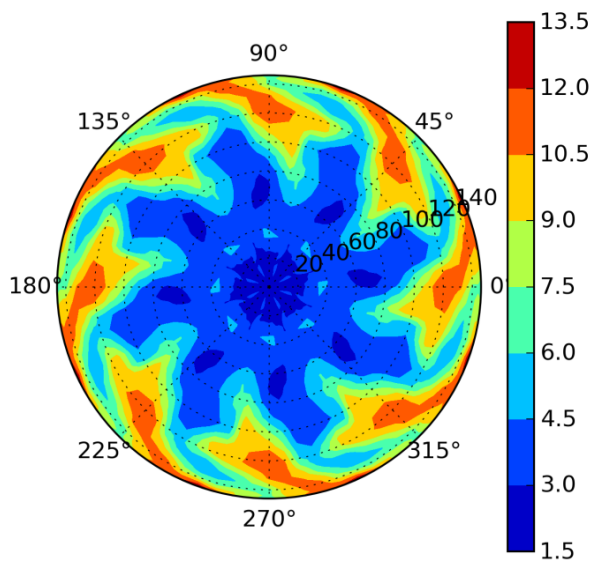
Obr. 38. Vývoj tangenciální složky rychlosti [ms^{-1}] ve vzdálenosti $0,1 D$.



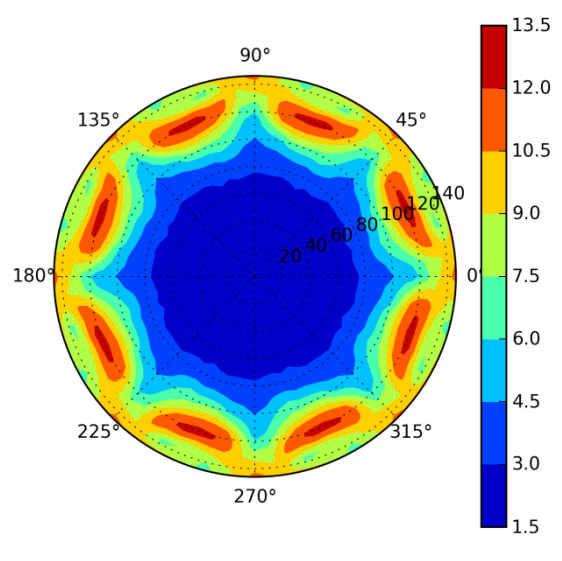
Obr. 39. Vývoj tangenciální složky rychlosti [ms^{-1}] ve vzdálenosti $0,3 D$.

Z axiální a tangenciální složky víříče se počítá celková rychlost a její úhel vůči ose potrubí. Na obrázcích 40 a 41 je vidět vývoj celkové rychlosti na natočení víříče a v grafu 11 je patrný vývoj rychlosti podle vzdálenosti víříče od sondy při poloměru sondy 110 mm. Souhrnný graf 13 znázorňuje pak trendy celkové rychlosti jak na natočení, tak na vzdálenosti víříče. Celková rychlost potvrzuje trend, že největší objem vzduchu bude protékat v mezikruží mezi vířičem a stěnou potrubí. Zároveň z grafů nic nenasvědčuje tomu, že by ve středu víříče docházelo ke zpětnému toku.

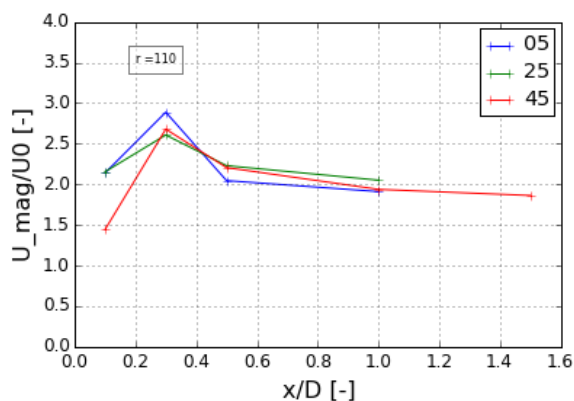
Úhel vektoru celkové rychlosti je vyobrazen na grafech 12 a 14. V nich se rovněž ukazuje, že v místě počátku lopatek získává proudění protisměrný charakter, které se pak s přibývajícím vzdáleností vytrácí a směr proudění se ustaluje.



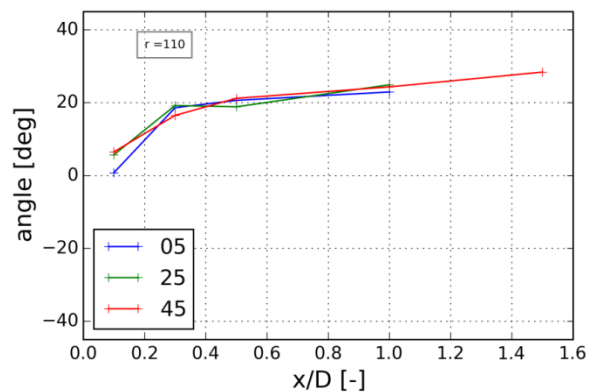
Obr. 40. Vývoj celkové rychlosti [ms^{-1}] ve vzdálenosti 0,1 D.



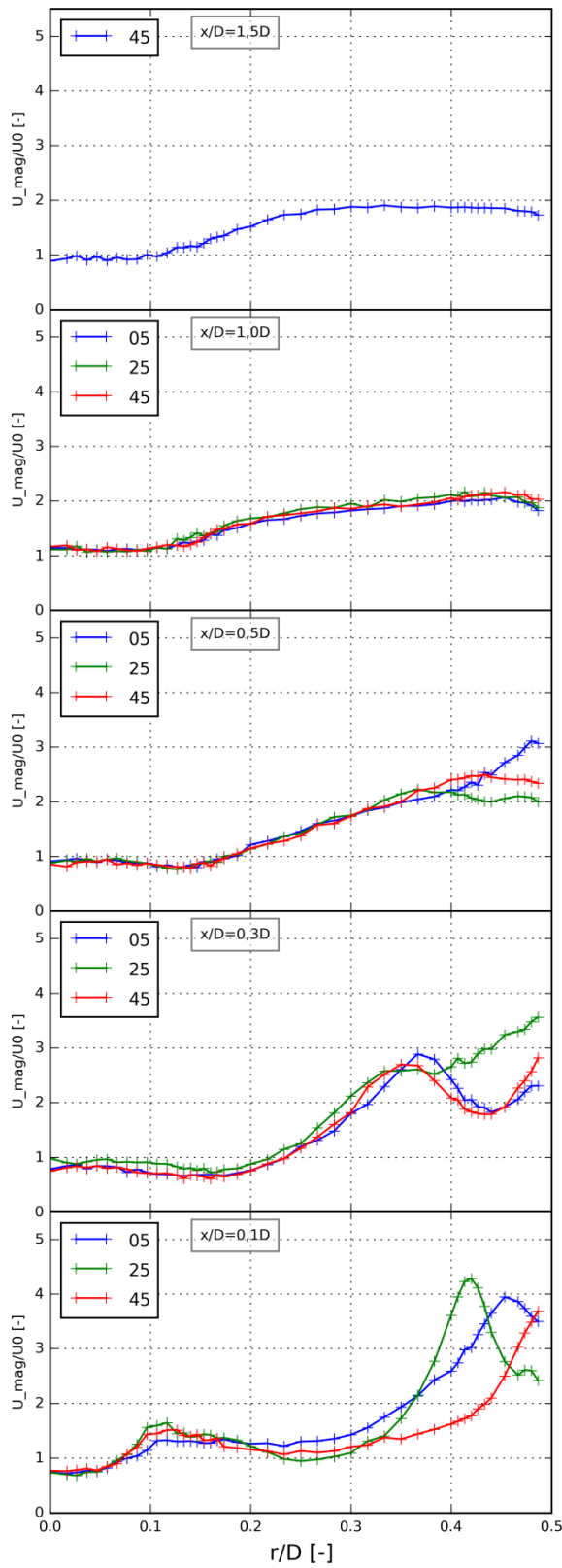
Obr. 41. Vývoj celkové rychlosti [ms^{-1}] ve vzdálenosti 0,3 D.



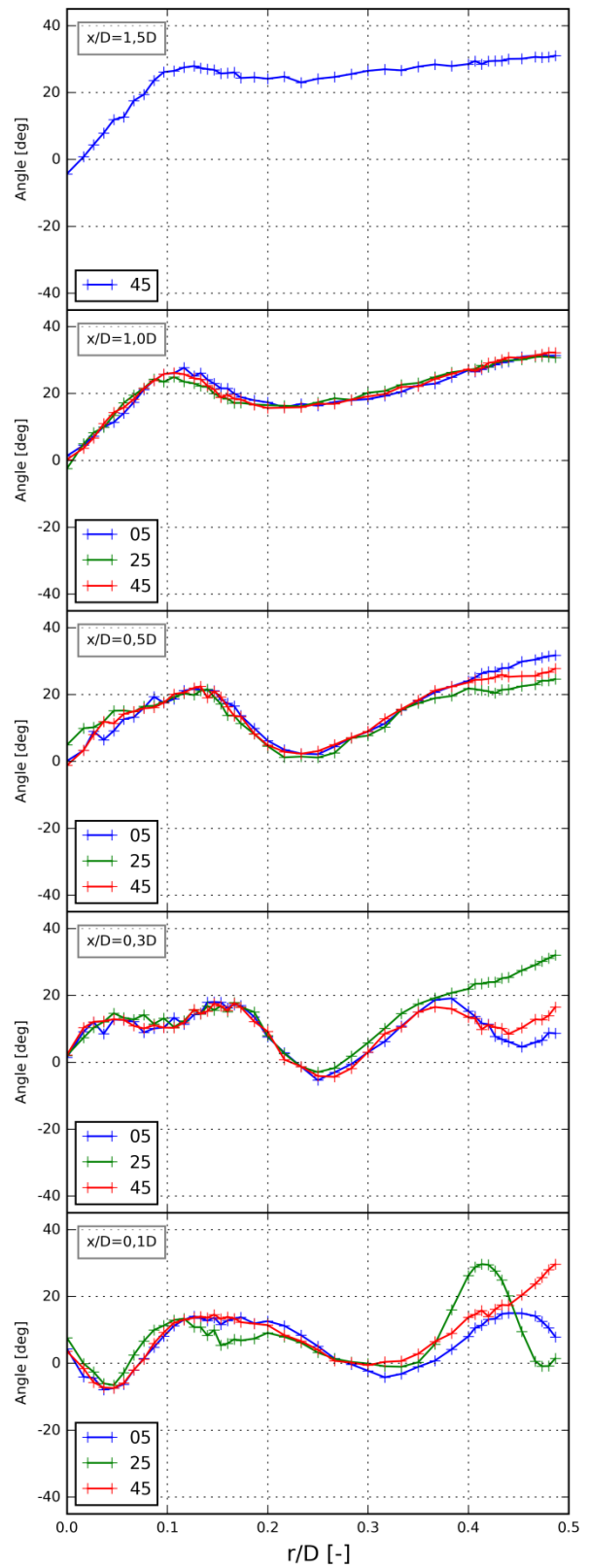
Graf 11. Vývoj U_0 podle vzdálenosti víříče od sondy.



Graf 12. Vývoj φ podle vzdálenosti víříče od sondy.

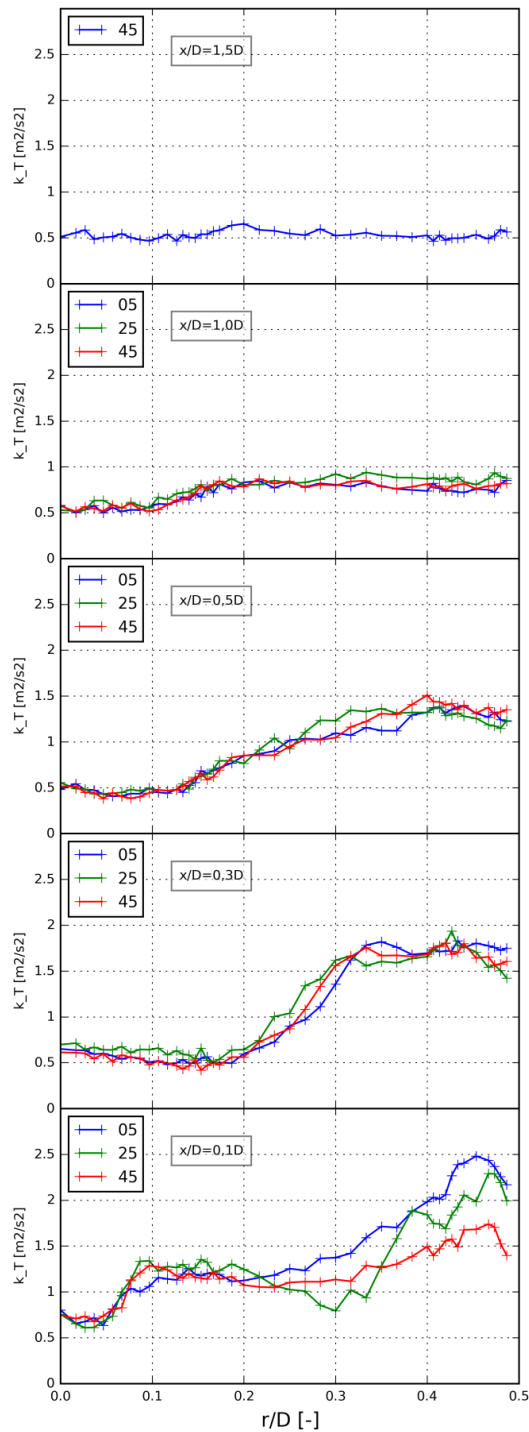


Graf 13. Vývoj celkové rychlosti U_0 .

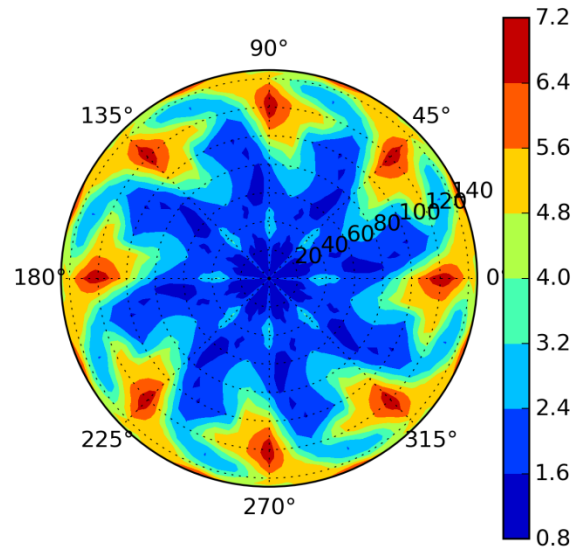


Graf 14. Vývoj úhlu φ .

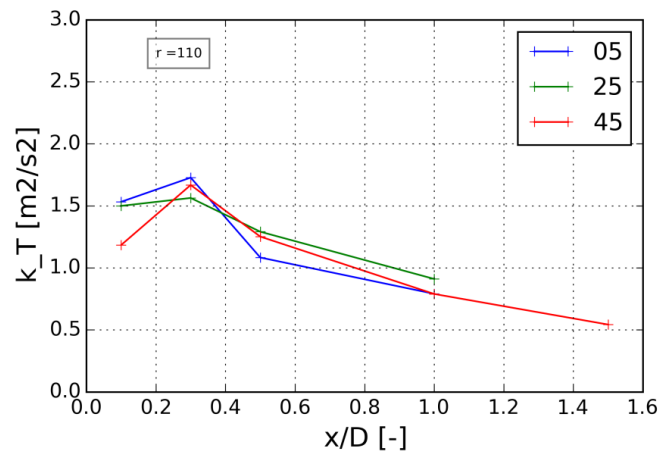
Posledním zkoumaným ukazatelem je vývoj kinetické energie turbulence. Závislost kinetické energie na natočení víříče je zobrazena na obrázku 42. Jsou na ní vidět lokální maxima v místě spojení víříče s nosnou trubkou. Maximální hodnoty energie turbulence jsou v místech odtokových hran lopatek. Trend vývoje turbulence lze vypořádat z grafů 15 a 16. V nich se ukazuje, že k největší turbulenci dochází hned za víříčem a s přibývajícím vzdáleností hodnota její energie klesá.



Graf 16. Vývoj kinetické energie turbulence k_T .



Obr. 42. Vývoj kinetické energie turbulence [m²/s²] ve vzdálenosti 0,1 D.



Graf 15. Vývoj k_T podle vzdálenosti víříče od sondy.

Z předchozího rozboru vyplývá, že naměřené rychlostní profily jsou reálné a jejich vývoj se shoduje s teoretickou představou. Zajímavým poznatkem je výskyt protisměrného proudění za vířičem, na jehož přesnější popsání by bylo vhodné zaměřit další výzkum.

9.2 SROVNÁNÍ PRŮTOKU Z RYCHLOSTNÍCH PROFILŮ

Vypočtené rychlostní průtoky a graf jejich vývoje v závislosti na vzdálenosti vířiče je uveden v příloze tohoto dokumentu. V tabulce jsou také uvedeny vypočtené průtoky pomocí programu *Air_flow_calc.xlsx*, které byly vypočteny z naměřených hodnot ovládacím systémem zkušebny hořáků. Při vzájemném porovnání těchto hodnot byly zjištěny značné odchylky. Vliv na jejich velikost má jednak zjištěná nejistota měření, která se do vypočteného průtoku značně projevuje. Dalším důvodem odchýlných hodnot může mít nepřesnost průtokoměru vzduchu a tlakoměru v laboratoři ÚPEI, z jejichž hodnot se počítal skutečný průtok. Tyto přístroje nebyly nikdy kalibrovány a nejistota jejich měření není tak známa [1]. Přesto zjištěné nepřesnosti i trend vývoje průtoků ukazuje na možnou chybu v provedení experimentu. Ta může mít příčinu ve způsobu provedení měření, nebo v chybném výpočtu průtoku z naměřených dat. Při budoucím výzkumu je třeba se na tento problém zaměřit a provést další měření.

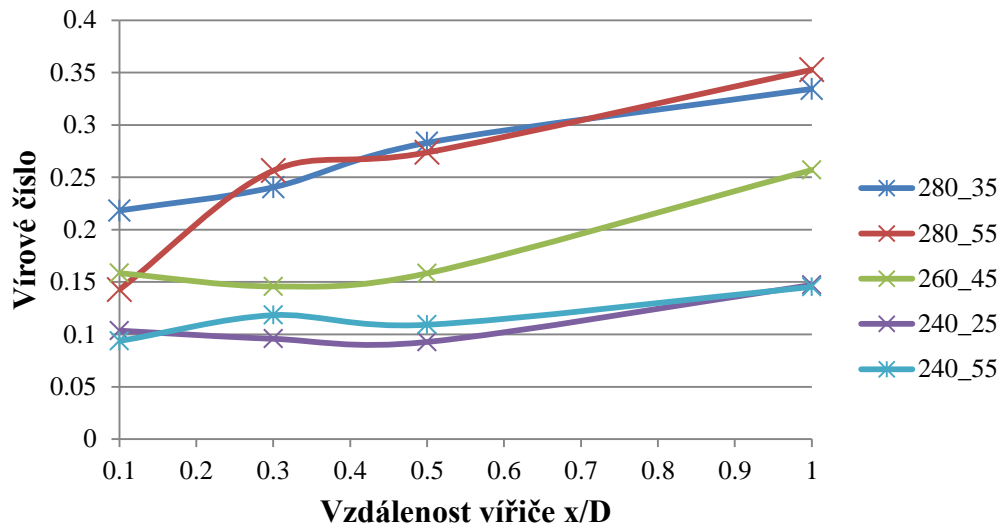
9.3 SROVNÁNÍ VÍROVÉHO ČÍSLA

Problematika výpočtu vírového čísla byla popsána v kapitole 3.3. Na základě tohoto popisu bylo předpokládáno, že se vírové čísla vypočtená z rychlostních profilů a z geometrických tvarů vířičů budou od sebe lišit. V tabulce 8 jsou uvedeny vypočtené vírové čísla pro jednotlivé vířiče. Trend vírových čísel vypočtených z rychlostních profilů ukazuje graf 17. Z něj se jasně ukazuje, že vírové čísla se zvětšující se vzdáleností od vířiče rostou. Tato skutečnost je v rozporu s předpokladem, že s rostoucí vzdáleností se proudění ustaluje a vírové číslo by se tak zmenšovat. Důvodem k tomuto růstu by mohl být fakt, že za vířičem je zjištěno protisměrné proudění, což ve výpočtu vírového čísla způsobí odečítání momentů hybností tangenciální složky rychlosti. Tak se stane, že vírové číslo za vířičem je nízké a až s ustálením směru proudění se vírové číslo zvýší. Pro potvrzení tohoto vysvětlení by bylo třeba provést další měření ve větší vzdálenosti od vířiče, kde by se už vírové číslo mělo skutečně snižovat.

Tab. 8. Srovnání vírových čísel proměřených vířičů.

vířič	S_G	0.1D	0.3D	0.5D	1D	1.5D
280_35	0.536	0.218	0.240	0.283	0.334	0.368
280_55	1.092	0.143	0.256	0.274	0.353	0.422
260_45	0.778	0.158	0.146	0.158	0.257	0.344
240_25	1.702	0.104	0.096	0.093	0.147	0.211
240_55	0.556	0.094	0.118	0.109	0.145	0.190

Z grafu se dále ukazuje, že hlavní vliv na velikost vírového čísla má průměr lopatek víříče. Úhel jejich natočení není zdaleka natolik výrazný, jak předpokládá geometrický výpočet vírového čísla.



Graf 17. Vývoj vírového čísla na vzdálenosti víříče od sondy.

10 POZNATKY PRO DALŠÍ MĚŘENÍ

Na základě zkušeností s měřením rychlostních profilů bylo navrženo několik námětů na vylepšení. V konstrukci měřicí trati by bylo třeba omezit i minimální úniky vzduchu vylepšením utěsnění zaslepení přívodu spalovacího vzduchu do hořáku a kontrolního otvoru. Samotné traverzovací zařízení pracovalo správně a zcela postačovalo svému účelu. Výhodou by bylo propojení ovládání traverzéry s programem StreamWare Pro, čímž by se značně urychlilo provádění měření. Dalším přínosem by bylo zjištění nejistoty měřidel ovládacího systému zkušebny hořáku. Pro zjištění celkové míry přesnosti by bylo vhodné provést opakované měření, aby se zjistil skutečný vliv nedostatků uvedených kapitole **Chyba! nalezen zdroj odkazů.** na celkovou nejistotu měření.

Vyčíslená odchylka měření byla zpracována na základě statistického vyhodnocení pouze tří směrových kalibrací. Pro další měření bude nezbytné provádět další směrové i rychlostní kalibrace, aby se vytvořil rozsáhlejší vzorek dat ke statistickému zpracování. Přesnost naměřených dat se zvýší, pokud by bylo možné kalibrovat před každým měřením.

Pro přesnější montáž víříče do měřicí trati by stálo za to vymyslet vhodnou univerzální nastavbu na nosnou trubku, která by zajistila vždy stejnou polohu víříče uvnitř potrubní trasy. Pro zvýšení přesnosti nastavování víříče do měřicí polohy by bylo vhodné zdokonalit měřicí stupnice, které jsou nyní jen ručně narýsované.

Z hlediska zpracování dat lze stále zdokonalovat podobu výstupních hodnot z výpočtového programu, kde, vzhledem k celkovému objemu dat, jsou možnosti téměř neomezené. Vykreslené grafy jsou nyní dostačující k vytvoření představy o průběhu rychlostních profilů, přesto je možné, že se v budoucnu ukáže potřeba graficky zpracovat ještě další údaje. Při dalším měření bude třeba více se zaměřit na oblast v blízkosti víříče a získat tak větší představu o generovaném protisměrném proudění. Za tímto účelem by stálo zvážit provedení měření sondou pro 3D proudění, které by pravděpodobně značně napomohlo přesnějšímu popisu rychlostních profilů.

11 ZÁVĚR

Byly proměřeny rychlostní profily za pěti axiálními lopatkovými vířiči. Samotnému měření předcházela obsáhlá příprava, což obnášelo poznání problematiky procesních hořáků, která úzce souvisí s problematikou vířičů. Porovnávacím faktorem je často používáno vírové číslo. To lze vypočítat z poměru axiálních a tangenciálních momentů hybnosti vzduchu za vířičem. Pro získání těchto momentů hybností je třeba měřit axiální a tangenciální složku rychlosti za vířičem.

To vedlo k požadavku naměření rychlostních profilů vhodnou metodou. V tomto případě byla navržena a sestavena měřicí trať a její příslušenství. Měřicí trať prošla mnoha konstrukčními úpravami, dokud její podoba nebyla optimální k provedení požadovaného experimentu. Pro polohování sondy bylo navrženo a vyrobeno polohovací zařízení.

Spolu se zdokonalováním měřicí tratě se prováděla pokusná měření, na jejichž základě se hledala optimální nastavení měřicích komponent, jako je vzorkovací frekvence a měřicí plán. Po vybrání vířičů a vytvoření měřicího plánu se přikročilo k vlastnímu měření. Během nich bylo proměřeno pět vířičů. Každý z nich byl proměřen v 31 polohách, ve kterých byly na 45 místech změřeny hodnoty napětí. Při zvoleném počtu vzorků tak bylo získáno 41 850 000 hodnot, které byly dále vyhodnocovány.

Pro vyhodnocení dat byl vytvořen výpočtový program, který prováděl nejen základní zpracování získaných dat, ale také z nich vypočítával další důležité údaje. Z vybraných údajů se vytvořily grafy, na kterých byl proveden rozbor naměřených rychlostních profilů. Mimo jiné se zjistilo, že v těsné blízkosti vířičů lopatky generují protisměrné proudění, které s rostoucí vzdáleností od vířiče zaniká. S ohledem na tuto skutečnost je třeba posuzovat i vypočtená vírová čísla, která nevykazují očekávaný trend. Na úplný závěr práce byly uvedeny i další poznatky, které je třeba při dalším výzkumu řešit.

Cílem práce bylo připravit vše potřebné k měření rychlostních profilů za vířiči spalovacího vzduchu. Proměřením pěti vířičů a provedení vyhodnocení získaných rychlostních profilů dokazuje, že tento cíl byl zcela splněn. Vytvořené rychlostní profily je možné dále porovnávat s rychlostními profily predikovanými metodou CFD.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Ing. Jiří Vondál, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, osobní konzultace.
- [2] LILLEY, D.G., *Investigations of Flowfields Found in Typical Combustor Geometries*. Technical Report, NASA, Washington, United States, 1985, 195 s.
- [3] CHANG, F., DHIR, V.K., *Turbulent flow field in tangentially injected swirl flows in tubes*. International journal of Heat and Fluid Flow, 1994, strana 346-356.
- [4] EDWARDS, R.J., JAMBUNATHAN, K., BUTTON, B.L., RHINE, J.M., *A comparison of two swirl measurement techniques*, Experimental Thermal and Fluid Science, 1993, strana 5-14.
- [5] SLOAN, D.G., SMITH, P.J., SMOOT, L.D., *Modeling of swirl in turbulent flow systems*, Progress in Energy and Combustion Science, 1986, strana 163-250.
- [6] SHEEN, H.J., *Correlation of swirl number for a radial-type swirl generator*. [online], Poslední aktualizace: 15. 5. 1996, Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0894177795001352>
- [7] Sekce výpočtového modelování dynamiky tekutin (CFD), [online], poslední aktualizace: 26. 4. 2015. Dostupné z: <http://www.upei.fme.vutbr.cz/sekce/CFD-sekce>
- [8] Tvorba škodlivin při spalování, [online], poslední aktualizace: 9. 1. 2015. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/tvorba.pdf>
- [9] Oxidy dusíku, [online], poslední aktualizace: 18. 1. 2015. Dostupné z: http://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_dusiku.pdf
- [10] Oxid uhelnatý, [online], poslední aktualizace: 18. 1. 2015. Dostupné z: http://www.irz.cz/repository/latky/oxid_uhelnaty.pdf
- [11] FÍK, J.: *Spalování plynných paliv a plynové hořáky*. První vydání. Praha: GAS s.r.o., 1998. 232 s.
- [12] Ing. Pavel Skryja, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, osobní konzultace.
- [13] GUPTA, A. K., LILLEY, D. G., SYRED, N.: *Swirl flows*. 1st. Kent: ABACUS PRESS, 1984, 475 p. ISBN 0-85626-175-0.
- [14] WEBER, R., DUGUÉ, J. *Combustion accelerated swirling flows in high confinements*. Progress in Energy and Combustion Science, Vol 17, pp. 349-367, 1992.
- [15] Ing. Petr Bělohradský, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, osobní konzultace.
- [16] JANALÍK, J., *Měření turbulentních fluktuací rychlosti*. VŠB TU Ostrava, fakulta strojní, Ostrava, 2006, [online], dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Mereniturflukrychlosti.pdf>

- [17] HAPALA, R. *Větrání kabiny osobního automobilu – výzkum charakteru proudění z rozmrazovací mřížky předního skla a účinnost tohoto systému*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Lízal.
- [18] URUBA, V. *Anemometrie – žhavené senzory*. Ústav termomechaniky Akademie věd České republiky, [online], poslední aktualizace: 26. 4. 2015. Dostupné z: <http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/HW/PA.pdf>
- [19] JØRGENSEN, F. *How to measure turbulence with hot-wire anemometers : a practical guide*. 1st edition. [s.l.] : Dantec Dynamics A/S, 2001. 56 s. Dostupný z WWW: <<http://www.dantecdynamics.com>>.
- [20] BRUUN, H. *Hot-Wire Anemometry : Principles and Signal Analysis* . Oxford : Oxford University Press, 1995. 507 s. ISBN 0-19-856342-6.
- [21] Zkušebna hořáků na plynná a kapalná paliva, [online], poslední aktualizace: 25. 1. 2015. Dostupné z: <http://www.upei.fme.vutbr.cz/veda-vyzkum/experimentalni-zakladna-zkusebna-horaku>
- [22] ARDUINO – oficiální stránky výrobce, [online], poslední aktualizace 27. 5. 2015. Dostupné z: <http://www.arduino.cc/>
- [23] Python – oficiální stránky tvůrců, [online], poslední aktualizace 27. 5. 2015. Dostupné z: <https://www.python.org/>
- [24] DANTEC DYNAMICS, *StreamWare Pro Installation and User Guide*. formát pdf.
- [25] Interquality – statisticky navržený experiment, Interguality s.r.o., [online], poslední aktualizace: 26. 5. 2015. Dostupné z: <http://www.interquality.cz/INTERN%C3%8DKURZY/DOEInterquality/tabid/79/Default.aspx>
- [26] UPEI – CFD / Hotwire, [online], poslední aktualizace 27. 5. 2015, Dostupné z: <https://github.com/UPEI-CFD/Hotwire>

SEZNAM PŘÍLOH

S výjimkou výkresové dokumentace traverzovacího zařízení jsou všechny přílohy pouze v elektronické podobě na přiloženém DVD.

1. Výkresová dokumentace traverzovacího zařízení
2. Model měřicí tratě
3. Program pro přepočet skutečného průtoku vzduchu
4. Výpočtový program na zpracování dat
5. Modely proměřených vířičů
6. Naměřená data
7. Data zaznamenaná z řídicího softwaru zkušebny
8. Zpracovaná data
9. Vypočtené průtoky