

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2022

**TOMÁŠ
HEJDUK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hejduk** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **491496**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Experimentální ověření parametrů aerodynamického tunelu

Název bakalářské práce anglicky:

Experimental verification of air flow parameters in the test section of a wind tunnel

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je ověření parametrů aerodynamického tunelu umístěného v laboratoři Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky. Jedná se zejména o tvar rychlostního profilu a rozložení intenzity turbulence na výstupu z dýzy, resp. na počátku měřicího prostoru. Znalost těchto parametrů je nezbytná pro další výzkum.

V rámci závěrečné práce bude provedeno následující:

- 1) Rešerše týkající se používaných konstrukčních uspořádání aerodynamických tunelů. Popis jednotlivých částí konkrétního tunelu a požadavky na tyto části. Popis možností k ovlivnění chování proudu vzduchu v měřicím prostoru.
- 2) Návrh a popis metod měření rychlostního profilu a rozložení intenzity turbulence.
- 3) Dohled na přípravou měřicího zařízení.
- 4) Vlastní experiment.
- 5) Vyhodnocení dat, formulace závěrů.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Michal Schmirler, Ph.D. ústav mechaniky tekutin a termodynamiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **25.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Michal Schmirler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Michal Schmirler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Tomáš Hejduk

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalovi Schmirlerovi, Ph. D. za poskytnutí potřebných rad, informací, podkladů a za bezproblémovou komunikaci při řešení této bakalářské práce.

Anotační list

Jméno autora:	Tomáš
Příjmení autora:	Hejduk
Název práce česky:	Experimentální ověření parametrů aerodynamického tunelu
Název práce anglicky:	Experimental verification of air flow parameters in the test section of a wind tunnel
Rozsah práce:	počet stran: 59 počet obrázků: 38
Akademický rok:	2021/22
Jazyk práce:	Český
Ústav:	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Michal Schmirler, Ph. D.
Klíčová slova:	aerodynamický tunel, anemometrie, žhavený drátek, Prandtlova trubice, turbulence , rychlostní profil, intenzita turbulence, proudění.
Klíčová slova anglicky:	wind tunnel, anemometry, hot-wire anemometry, Pitot-static system, turbulence, speed profile, turbulence intensity, flow.
Anotace česky:	Tato bakalářská práce se zabývá aerodynamickými tunely. Úvodní část obsahuje rozdělení aerodynamických tunelů podle různých hledisek a také jsou zde popsány jednotlivé části tunelu. V další části jsou podrobně popsány způsoby měření rychlosti, pomocí metody CTA a Prandtlovy sondy. V experimentální části je popis průběhu měření rychlostního profilu a intenzity turbulence v cirkulačním aerodynamickém tunelu. V závěru jsou diskutovány naměřené výsledky.

Anotace anglicky:

This Bachelor thesis deals with wind tunnels. Introductory part contains the distribution of wind tunnels according to different point of view and parts of wind tunnel are described here. There are described methods of speed measurement, using the CTA method and the Prandtl probe in the next section. There is description of the measuring the speed profile and the distribution of turbulence intensity in wind tunnel in the experimental part. At the end, the measured results are discussed.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Aerodynamický tunel.....	11
2.1	Historie aerodynamických tunelů.....	11
2.2	Aerodynamický tunel s otevřeným okruhem	12
2.3	Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem	13
2.4	Dělení podle rychlosti proudění	14
2.5	Dělení podle použitého zdroje pohonu	14
2.6	Hlavní části aerodynamického tunelu	16
2.6.1	Dýza	16
2.6.2	Uklidňovací komora	16
2.6.3	Usměrňovače toku.....	16
2.6.4	Usměrňovací lopatky	18
2.6.5	Měřicí prostor.....	18
2.6.6	Difuzor	19
2.6.7	Ventilátory.....	19
2.6.8	Chlazení aerodynamických tunelů	20
3	Režimy proudění	21
3.1	Laminární proudění.....	22
3.2	Přechodové proudění	22
3.3	Turbulentní Proudění	23
3.3.1	Struktura turbulence	24

4	Návrh a popis metod měření rychlostního profilu a rozložení intenzity turbulence	25
4.1	Měření žhaveným drátkem (Hot- wire anemometry).....	26
4. 1. 1	Princip fungování	27
4. 1. 2	Druhy sond	30
4. 1. 3	Výběr typu snímače	32
4. 1. 4	Senzory pro měření ve více rozměrech	32
4.2	Prandtlova sonda.....	33
5	Postup měření rychlostního profilu a intenzity turbulence aerodynamického tunelu	36
5.1	Stavba traverzovacího zařízení	36
5.2	Zprovoznění krokových motorů	40
5.3	Komponenty pro měření	40
5. 3. 1	Sonda	40
5. 3. 2	CTA anemometr	41
5. 3. 3	A/D převodník.....	41
5. 3. 4	Prandtlova sonda.....	41
5. 3. 5	Odporový snímač teploty Pt100.....	41
5. 3. 6	Diferenční a absolutní snímač tlaku.....	42
5.4	Popis měření a nastavení zařízení před měřením	42
5. 4. 1	Nastavení přehřívání drátku	42
5. 4. 2	Rychlostní kalibrace.....	43
5.5	Měření dat	44
5.6	Sběr dat.....	47

5.7	Vyhodnocení dat.....	47
6	Závěr	53
7	Seznam použité literatury.....	55
8	Seznam použitých obrázků	57
9	Seznam použitých veličin	59

1 Úvod

Aerodynamické tunely, tak jak je známe dnes se používají více než století. Rozměry aerodynamických tunelů mohou dosahovat až několika desítek metrů. Používají se pro výzkum proudění tekutin, pro měření aerodynamického zatížení a ke zkoumání aerodynamických vlastností různých objektů např. turbín, automobilů, trupů a křídel letadel atd. (vnější aerodynamika) nebo se může studovat proudění v různě tvarovaných kanálech (vnitřní aerodynamika). V minulosti se používaly aerodynamické tunely především v leteckém průmyslu, ale postupem času začala významnou roli aerodynamika i v automobilovém průmyslu i dalších odvětvích.

V první části bakalářské práci jsou uvedeny teoretické znalosti z oblasti aerodynamických tunelů. Jsou zde popsány základní konstrukční řešení aerodynamického tunelu: s otevřeným okruhem nebo s uzavřeným okruhem. Dále je můžeme dělit podle konstrukce měřicího úseku: s otevřeným nebo uzavřeným měřicím prostorem. Je zde též popsáno, z jakých hlavních částí se aerodynamický tunel skládá. Všechny jeho části jsou navrženy tak, aby v měřicím prostoru bylo dosaženo požadované rychlosti, vyrovnaného rychlostního profilu a nízké hodnoty intenzity turbulence. Část této práce se stručně věnuje popisu režimů proudění, které může být buď laminární nebo turbulentní a také popisu turbulence.

Experimentální část se věnuje problematice měření rychlostního profilu a rozložení intenzity turbulence na vstupu do otevřeného měřicího prostoru u cirkulačního aerodynamického tunelu umístěného v laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky. V práci je popsán princip funkce měření rychlosti proudění vzduchu Prandtlovou sondou, kterou byl měřen rychlostní profil tunelu a také princip měření žhaveným drátkem, který byl použit pro měření rozložení intenzity turbulence. V této práci je dále popsána stavba traverzovacího zařízení, které bylo použito k manipulaci sondy v měřicím prostoru. Na závěr je provedena diskuse výsledků.

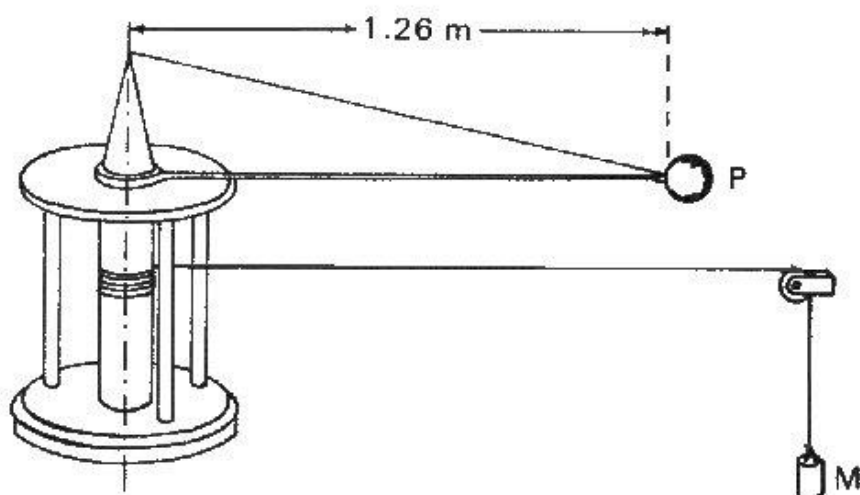
2 Aerodynamický tunel

Testování aerodynamických vlastností součástí ať už v plném nebo zmenšeném měřítku (modely) v aerodynamickém tunelu je velmi používaný způsob měření, který vede k podrobnému návrhu součástí a umožňuje výzkum jevů, které se v tekutinách vyskytují. Tento způsob testování se používá například v případech, kdy počítačové metody mechaniky tekutin (CFD) jsou buď příliš složité nebo ji nejsme schopni využít z důvodu nedostatečného výpočetního výkonu a také kvůli validaci výpočtů provedených pomocí CFD. Testování v aerodynamických tunelech je také finančně dostupné.

Aerodynamické tunely jsou široce využívány ve výzkumných ústavech, univerzitách a průmyslovém odvětví. Předmětem zkoumání může být obtékání různých předmětů vzduchem, např. letadel a jejich křídel, automobilů, lopatek turbín, případně i sledování proudění v různě tvarovaných kanálech.

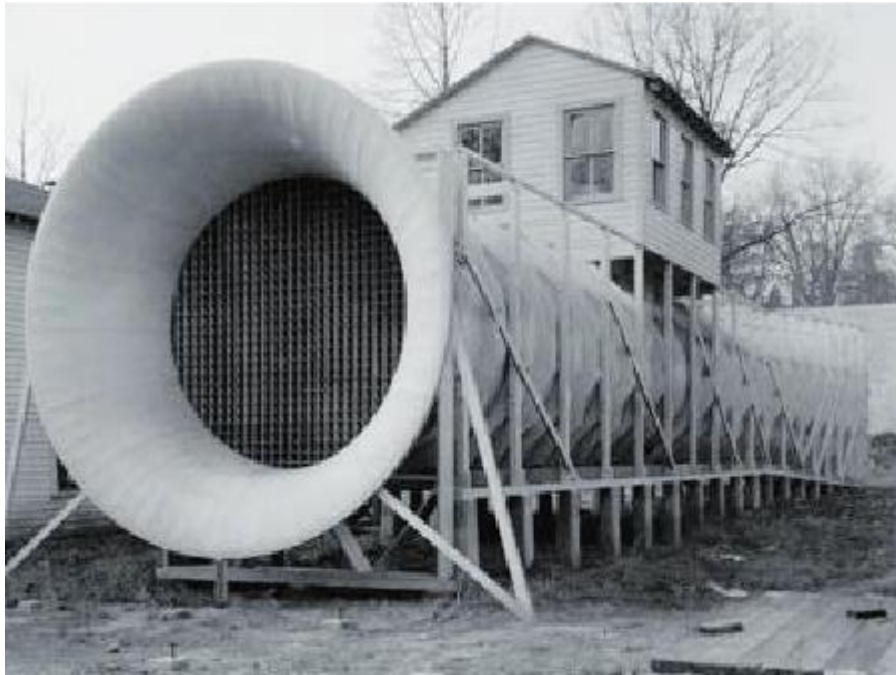
2.1 Historie aerodynamických tunelů

Od počátku 18. století zkoumal Angličan Benjamin Robins aerodynamické vlastnosti předmětů. Používal pro to zařízení, kde se daný předmět upevnil na otočné rameno a pohyboval se po kruhové dráze. Dosahoval rychlostí maximálně 3 m/s. Robins zkoumal odpor jednotlivých předmětů a formuloval první teorie vztahu mezi tvarem předmětu, jeho orientací a rychlostí, kterou se daný předmět pohyboval. [1]



Obrázek 1: Zařízení, na kterém byly zkoumány aerodynamické vlastnosti [1]

V roce 1871 Angličan Frank H. Wenham sestavil první aerodynamický tunel, který byl dlouhý 37 m a měl průměr 0,45 m. Ventilátor byl poháněn parním strojem a proud vzduchu dosahoval rychlostí až 65 km/h. Umisťoval do tunelu různé předměty a měřil vztahové a odporové síly, které vznikaly při obtékání předmětu. Od té doby se začaly využívat aerodynamické tunely, tak jak je známe dnes, kde měřený objekt stojí na místě a proud vzduchu proudí okolo něj. [2]



Obrázek 2: První aerodynamický tunel [2]

Rozvoj aerodynamických tunelů znamenal i velký rozvoj aerodynamiky, a to především v letectví. Postupem času si i konstruktéři automobilů začaly uvědomovat důležitost aerodynamiky. V roce 1934 byl sestaven první automobil, u kterého se počítalo s aerodynamikou, byla to Tatra T77. Dalším důležitým okamžikem v rozvoji aerodynamických tunelů byla stavba nadzvukového tunelu za dob nacistického Německa v roce 1938 v Pennemünde. Rychlost proudění vzduchu v něm překonávala rychlost zvuku až dva a půl krát. [2]

2.2 Aerodynamický tunel s otevřených okruhem

Aerodynamický tunel s otevřených okruhem je zobrazen na Obrázku 3. Jedná o jednodušší konstrukci, protože obsahuje méně součástí než aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem. Hnací ventilátor může být buď na vstupu do tunelu, před měřicím prostorem nebo až za ním. Mezi nevýhody tohoto konstrukčního řešení

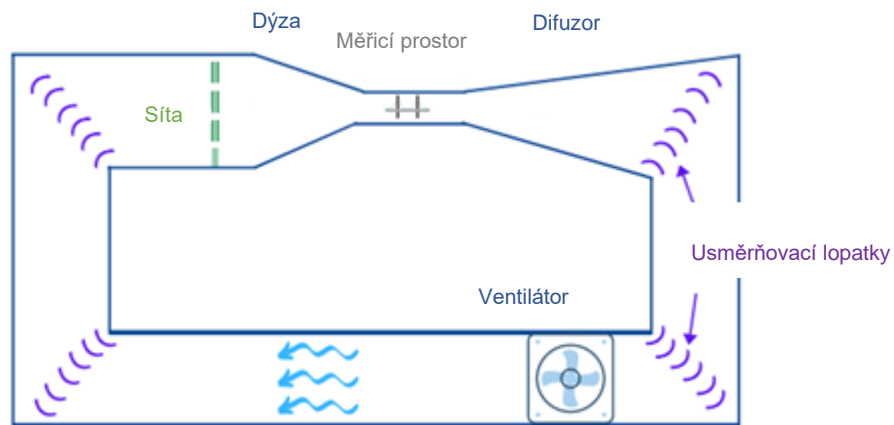
můžeme zařadit vyšší provozní náklady, vliv okolních podmínek na kvalitu proudění v měřicím prostoru, je-li tunel umístěn venku, pak má vítr značný vliv na kvalitu a rychlost proudění a také hluk vznikající od ventilátoru. Výhodami pak mohou být nižší konstrukční náklady. [3]



Obrázek 3: Aerodynamický tunel s otevřeným okruhem [4]

2.3 Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem

Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem je zobrazen na Obrázku 4. Hlavním rysem tohoto konstrukčního řešení je, že proud vzduchu cirkuluje uvnitř aerodynamického tunelu. Často se nazývá cirkulační aerodynamický tunel. Mohou mít, jak horizontální, tak i vertikální konstrukci, která zabírá méně místa. Náklady na provoz takového tunelu jsou mnohem nižší než u tunelu s otevřeným okruhem, protože nedochází k výrazným ztrátám kinetické energie proudícího vzduchu, tím pádem vynikají i tišším chodem. Nevýhodami jsou vyšší pořizovací náklady, teplo vznikající vlivem třením o stěny tunelu a teplo vznikající od ventilátoru. Přebytečné teplo je potřeba z tunelu odvést pomocí tepelných výměníků, aby se nezvyšovala teplota v měřicím prostoru. [3]



Obrázek 4: Schéma aerodynamického tunelu s uzavřeným okruhem [4]

Nejvhodnějším řešením z hlediska aerodynamiky se jeví použití uzavřeného měřicího prostoru, jehož pořizovací náklady jsou sice vysoké, vyvažují to ale nižší provozní náklady. Většina použitých aerodynamických tunelů jsou tunely s uzavřeným okruhem a s otevřeným měřicím prostorem. [3]

2.4 Dělení podle rychlosti proudění

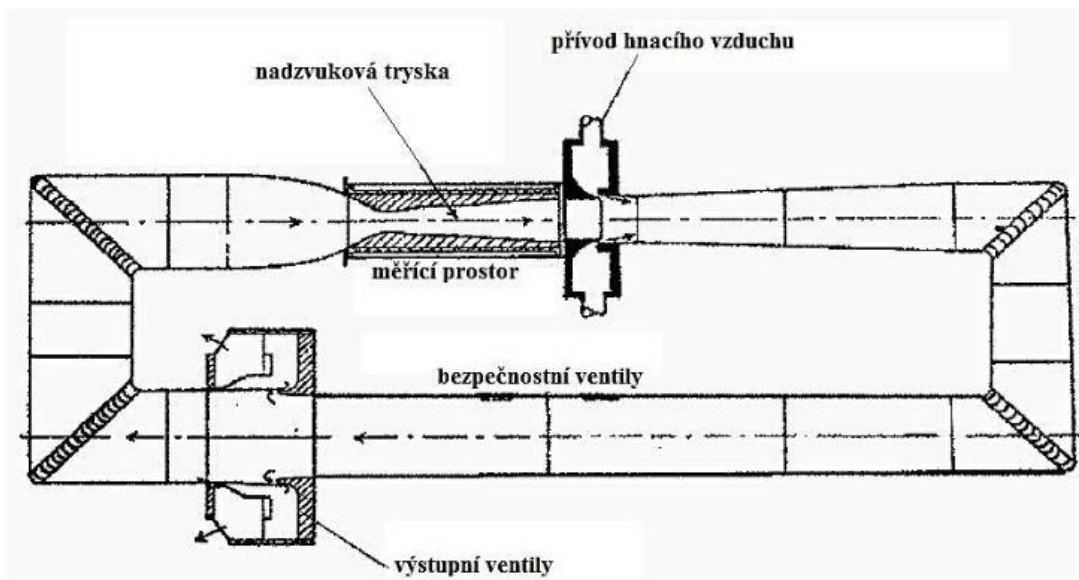
Tunely můžeme dělit také podle hodnoty dosahovaného Machova čísla v měřicím prostoru. Typy aerodynamických tunelů dělených podle tohoto parametru jsou:

- subsonické (podzvukové): pro rychlosti do 0,5 Ma. Lze v nich zanedbat stlačitelnost vzduchu,
- transsonické: pro rychlosti okolo 1 Ma,
- supersonické (nadzvukové): pro rychlosti od 1 do 5 Ma,
- hypersonické: pro rychlosti nad 5 Ma. [5]

2.5 Dělení podle použitého zdroje pohonu

K zajištění tlakového spádu lze použít různé konstrukce. Tlakovému rozdílu, a tím pádem proudění vzduchu lze dosáhnout přivedením přetlaku na vstup tunelu, zatímco na výstupu je atmosférický tlak, nebo vytvořením podtlaku na výstupu tunelu a na vstupu nasávat vzduch z volné atmosféry. Další konstrukční variantou je kombinace dvou zmíněných způsobů. Podle způsobu použitého pohonu se aerodynamické tunely dělí. [6]

- Kompresorový pohon: Tento druh pohonu se používá především v tunelech s uzavřeným okruhem, kdy dochází k vytvoření přetlaku na vstupu měřicího prostoru, ale kompresor zároveň vytváří podtlak na jeho výstupu.
- Podtlaková nádoba: Pokud je obtížné dosáhnout požadovaného podtlaku na výstupu po delší dobu, používá se tento způsob v kombinaci přetlaku na vstupu.
- Ejektorový pohon: K vyvození podtlaku se používá plynový ejektor, který při správné konstrukci vytváří podtlak v hnané trysce. Hnaná tryska je nainstalována na výstupu měřicího prostoru. Princip činnosti ejektoru spočívá v nasávání nízkotlakého média pomocí vysokotlakého média. Přitom dochází k přímému předání části kinetické energie od hnacího k hnanému proudu během směšování obou proudů. [7]



Obrázek 5: Uzavřený tunel s ejektorovým pohonem [1]

2.6 Hlavní části aerodynamického tunelu

Aerodynamické tunely se skládají z mnoha částí. Každá část aerodynamického tunelu je navržena tak, aby v měřicím prostoru byla požadovaná rychlost s vyrovnaným rychlostním profilem a nízkou nebo přesně definovanou hodnotou intenzity turbulence. [6]

2. 6. 1 Dýza

Dýza je prvek, který se používá k urychlení toku vzduchu do měřicího prostoru a k potlačení turbulentních vírů. V měřicím prostoru tak získáme vyšší rychlost s menší intenzitou turbulence. Rozložení tlaků podél stěn dýzy přímo ovlivňuje tloušťku mezní vrstvy, tlakové ztráty a nerovnoměrnost proudění v měřicím prostoru. Mnoho problémů s kvalitou proudění v měřicím prostoru může vzniknout nevhodným návrhem dýzy. Kombinace malé kontrakce a krátké dýzy způsobuje zvýšení nerovnoměrnosti proudění. [6]

Parametr popisující dýzu je kontrakce, který je definován jako poměr mezi plochou na vstupu S_1 a plochou na výstupu z dýzy S_2 .

$$K = \frac{S_1}{S_2}. \quad (1)$$

Čím větší je poměr kontrakce, tím vyšší velikost rychlosti získáme na výstupu a tím větší bude potlačení turbulentních vírů. Doporučená velikost kontrakce, která zajistí kvalitní průtok v měřicím prostoru je $K = 9$. [6]

2. 6. 2 Uklidňovací komora

Uklidňovací komora je část aerodynamického tunelu, kde jsou umístěny usměrňovače toku. Průřez usazovací komory by měl být co nejvyšší, aby se snížila rychlost a tím i tlakové ztráty usměrňovačů proudění. [6]

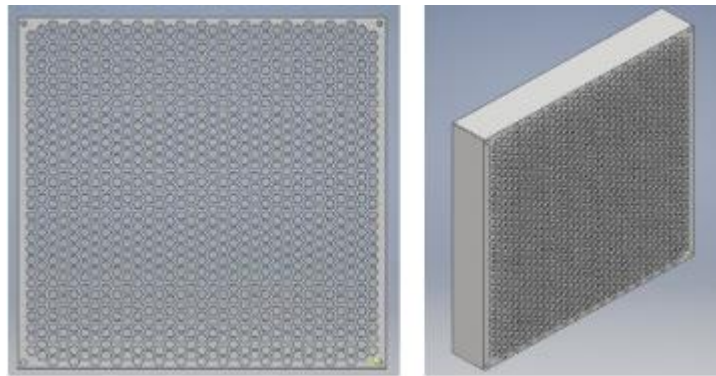
2. 6. 3 Usměrňovače toku

Usměrňovače toku jsou nezbytnou součástí aerodynamického tunelu. Používají se dva typy usměrňovačů proudění: síta a voštiny. Voštiny snižují příčné fluktuace rychlosti, zatímco síta snižují podélné fluktuace rychlosti. Minimální doporučená

vzdálenost mezi usměrňovači proudu je rovna 0,2 - násobku hydraulického průměru uklidňovací komory. Použito může být mnoho kombinací usměrňovačů proudění. [6]

Voštiny

Toto zařízení se umísťuje na vstupu do usazovací komory. V těle voštiny jsou malé dlouhé otvory, které mohou mít v příčném řezu různé tvary, např. kruhové, čtvercové. Nejobvyklejší je průřez šestiúhelníkový, protože má nejnižší koeficient tlakové ztráty. Doporučený poměr mezi délkou otvoru a jeho hydraulickým průměrem je devět. Voština má za úkol snížit kolísání rychlosti v příčném směru. Musí být vyrobeny z lehkého a odolného materiálu. V malých aerodynamických tunelech jsou voštiny vyráběny z plastu na 3D tiskárně, zatímco ve velkých aerodynamických tunelech jsou vyráběny ze dřeva nebo hliníku. [6]



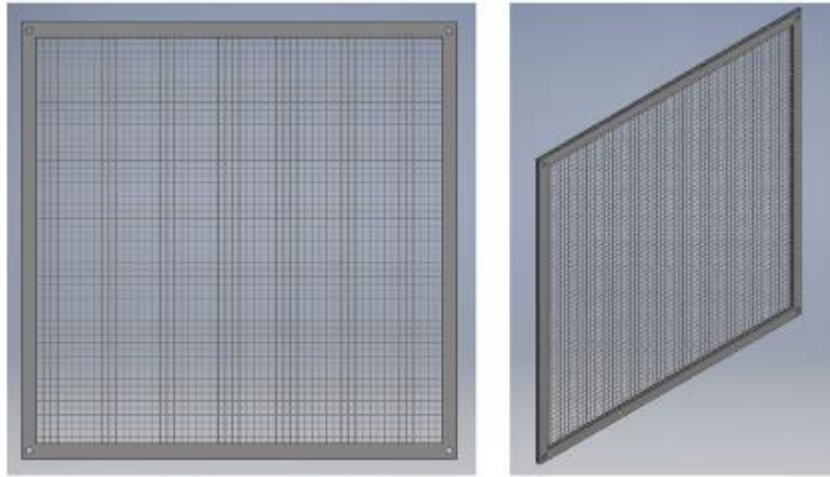
Obrázek 6: Voština [6]

Síta

Síta se používají ke snížení podélných výkyvů rychlosti. Důležitým parametrem síta je hustota síťování, která je definována poměrem mezi plochou volnou pro proudění S_p a celkovou plochou síta S_0 .

$$\sigma = \frac{S_p}{S_0} \quad (2)$$

Pro správnou funkci síta by měla být hustota síťování menší jak 0,5, jinak mohou naopak vytvářet nežádoucí turbulence v měřicím prostoru. Proto je vhodné kombinovat více sít za sebou s různou hustotou síťování, abychom dosáhli požadovaných vlastností. Dráty v sítích by měly být tuhé, neměly by vibrovat, dále by mělo být navrženo pevné spojení drátu s rámem. [6]



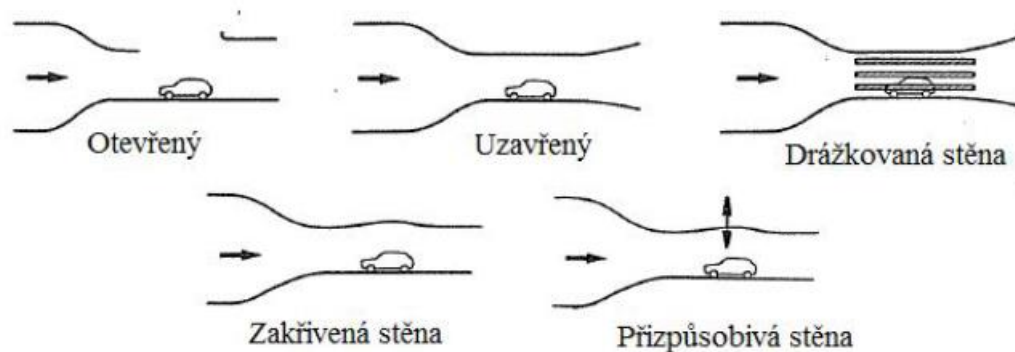
Obrázek 7: Síto pro snížení podélných výkyvů rychlosti [6]

2. 6. 4 Usměrňovací lopatky

V aerodynamický tunelech s uzavřeným okruhem, dochází v rozích k zahnutí proudu vzduchu o 90° . Tím dochází k oddělení proudění, což má za následek významný pokles tlaku, nestabilitu proudění a také zvýšenou hlučnost. Usměrňovací lopatky jsou umístěny v rozích tunelu, aby zmírnily tyto negativní účinky na kvalitu proudění. K návrhu usměrňovacích lopatek se používají moderní CFD metody. Důležitým požadavkem na konstrukci je zajištění jejich správného fungování v celém rozsahu rychlostí. Konstrukce usměrňovacích lopatek může být taková, že jsou uvnitř duté. V dutině proudí tekutina, nejčastěji voda, která z tunelu odvádí přebytečné teplo, a tím je zajištěno chlazení tunelu. [8]

2. 6. 5 Měřicí prostor

Měřicí prostor je klíčová část aerodynamického tunelu, ve které je požadován vyrovnaný rychlostní profil a nízké hodnoty intenzity turbulence. Různé typy měřicího prostoru jsou zobrazeny na Obrázku číslo 8. Konstrukce zkušebního prostoru by měla umožňovat snadnou manipulaci, montáž a demontáž měřeného modelu. [9]



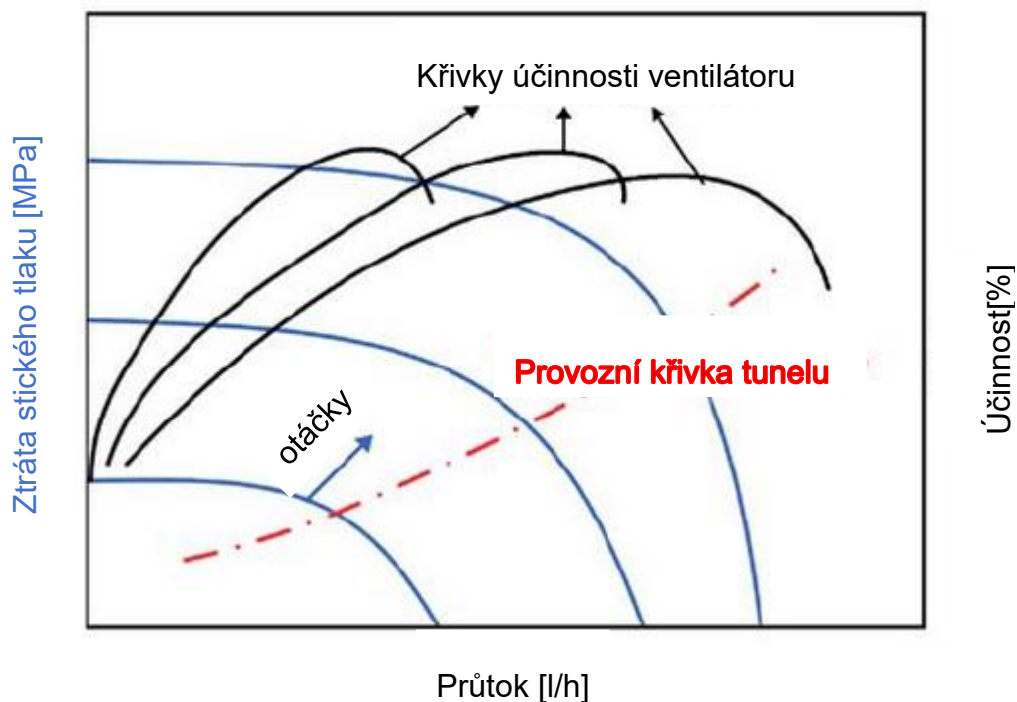
Obrázek 8: Typy měřících prostorů [9]

2. 6. 6 Difuzor

Difuzor má za úkol snížit rychlost proudění v místech, která nejsou potřebná pro měření. Podle Bernoulliho rovnice dojde v důsledku snížení rychlosti proudění ke zvýšení statického tlaku, to může způsobit oddělení proudění, což vede k větším ztrátám, změně rychlosti proudění, vzniku vibrací nebo rozkmitání ventilátoru. V aerodynamických tunelech jsou používány dva difuzory, aby nedocházelo k tak prudkým změnám statického tlaku. Z pravidla bývá první difuzor umístěn za měřícím prostorem a ten druhý za ventilátorem. Při návrhu difuzoru jsou klíčovými parametry jeho délka a úhel sklonu. Úhel sklonu bývá menší jak 9° . [6]

2. 6. 7 Ventilátory

Ventilátory jsou dimenzovány podle objemového průtoku a podle poklesu statického tlaku, který mohou překonat. Mohou mít buď axiální nebo radiální konstrukci. Výkon ventilátoru je charakterizován křivkami zatížení, ty jsou na Obrázku číslo 9, kde je zobrazena závislost účinnosti ventilátoru a ztráty statického tlaku na průtoku. Křivky účinnosti ventilátoru jsou udány pro různé rychlosti otáčení ventilátoru. Body, ve kterých se protíná křivky ztrátového tlaku a výkonnostní křivky ventilátoru představují provozní body aerodynamického tunelu. [8]



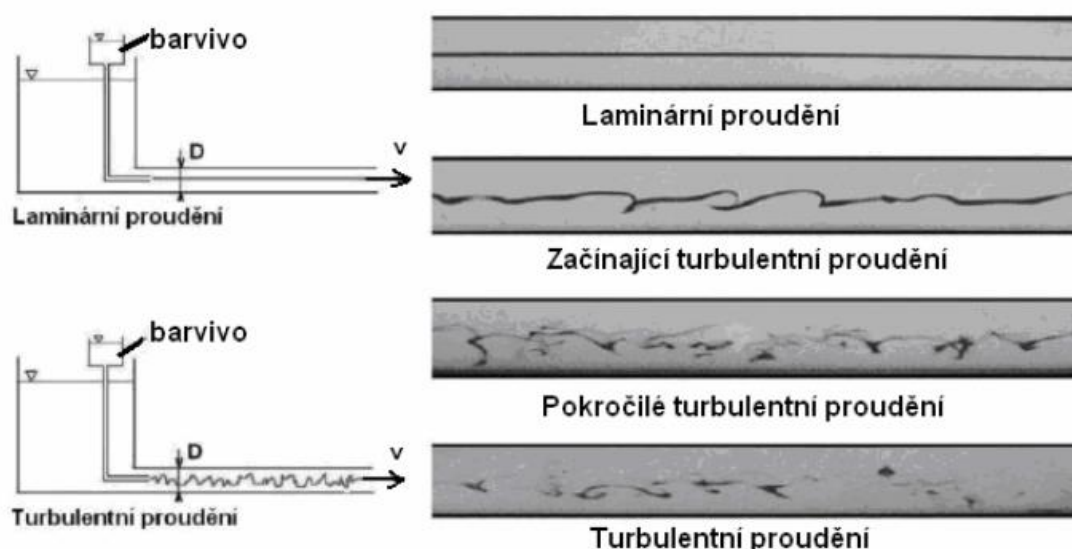
Obrázek 9: Křivky zatížení aerodynamického tunelu [8]

2. 6. 8 Chlazení aerodynamických tunelů

Hlavní energetickou ztrátou při proudění vzduchu v cirkulačních tunelech je přeměna části kinetické energie proudícího vzduchu na teplo. Toto teplo roste s rostoucím průtokem vzduchu, tím pádem dochází k nežádoucímu zvyšování teploty v měřicím prostoru, které může mít vliv na testování. Abychom tento jev odstranili jsou aerodynamické tunely vybaveny tepelnými výměníky. [10]

3 Režimy proudění

V osmdesátých letech 19. století identifikoval Osborne Reynolds při zviditelňování proudění vody v trubici kruhového průřezu úzkým pramenem vpouštěné barvy, dva typy proudění. Při proudění v nízkých rychlostech a v trubici malého průřezu zachovával pramének barvy svou individualitu (s okolním proudem se směšoval pouze difuzí), takové proudění bylo později pojmenováno laminární. Při vyšších rychlostech a v trubicích většího průměru zjistil proudění, kdy existovalo intenzivní směšování, takže pramének barvy v malé vzdálenosti za výtokovým otvorem z trysky rozpustil do celého průřezu trubice. Tento typ proudění byl nazván turbulentním. [11]



Obrázek 10: Reynoldsův pokus [11]

Laminární proudění nepřechází do turbulence okamžitě. V proudovém poli vzniká přechodová nestacionární oblast.

V rozvoji mechaniky tekutin hrál vždy mimořádně významnou úlohu experiment. Účelně experimentální řešení fyzikální úlohy na geometricky podobných modelech se provádí s využitím nauky o fyzikální podobnosti, v níž se nahrazují konvenční rozměrové proměnné proměnnými bezrozměrovými, jež se nazývají podobnostní čísla. Při jejich odvozování se využívá vazeb mezi rozměry původních veličin v soustavě jednotek SI (tzv. Buckinghamův teorém). To vede ke zhuštění informací v bezrozměrových rovnicích, ke značnému snížení počtu experimentů a ke snížení nákladů na ně. Navíc odvození plynou podobnostní zákony, které umožňují provádět

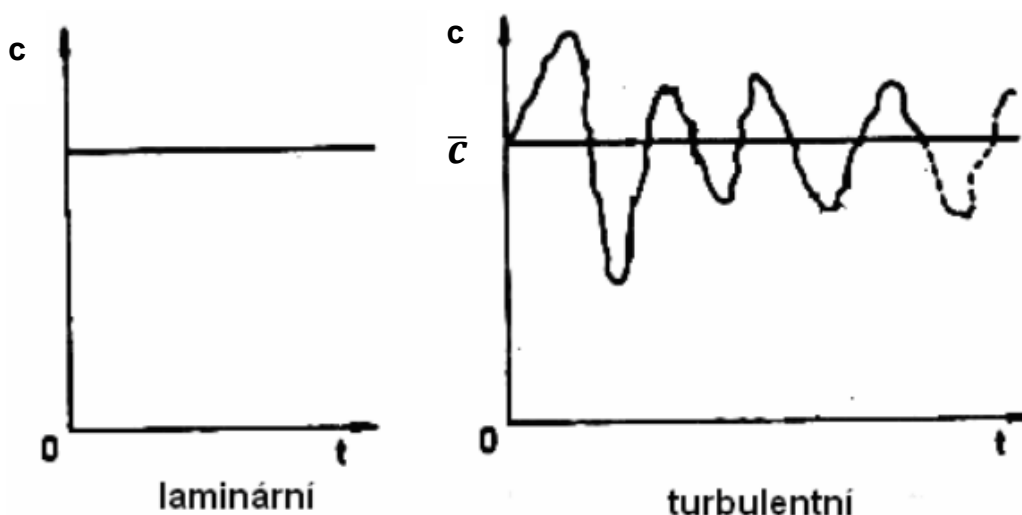
experimenty na geometricky podobných modelech. Proudění vazkých tekutin charakterizuje tzv. Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{c.L}{\nu} = \frac{\rho.c.L}{\eta}. \quad (3)$$

Za zmínku stojí také tzv. Machovo číslo

$$Ma = \frac{c}{a}. \quad (4)$$

Nejčastěji se setkáváme s turbulentním prouděním, méně často pak s prouděním laminárním. Oba tyto typy vznikají za specifických podmínek a liší se vnitřní strukturou, proto jsou i jejich projevy (přenos tepla, energetické ztráty apod.) rozdílné. Laminární proudění přechází do turbulence při určitých velikostech Reynoldsova čísla. [11]



Obrázek 11: Rychlost při laminárním a turbulentním proudění [11]

3.1 Laminární proudění

Je charakterizováno tím, že při dostatečně malém Re tvoří mikroskopické částice tekutiny vrstvy, které po sobě kloužou. [11]

3.2 Přechodové proudění

Zaujímá obvykle jen krátkou oblast, v níž se mění laminární proudění v turbulentní. Je nejméně probádanou oblastí proudového pole. Proces

tzv. relaminarizace (přechod turbulentního proudění na laminární) probíhá na delším úseku než přechod laminárního proudění do turbulentního. [11]

3.3 Turbulentní Proudění

Turbulence v proudovém poli nebo v jeho části, vzniká ztrátou stability laminárního proudění, je-li překročeno kritické Re . Je v praxi i přírodě nejčastější a představuje jeden z největších problémů současné fyziky. Jeho definice není dosud ustálena. Zde je uvedena jeho definice z roku 1975: „Turbulentní proudění tekutiny je nepravidelný stav proudění, ve kterém různé veličiny vykazují náhodné změny v čase a prostoru, při čemž mohou být určeny jejich statistické střední hodnoty“. [11]

Reynolds chápal turbulentní proudění jako nestacionární a trojrozměrné oscilační proudění, které nabízí možnost popisu turbulentního proudění okamžitou rychlostí \vec{c} , což lze chápat jako součet časové střední hodnoty \vec{c}

$$\bar{c} = \frac{1}{t_0} \cdot \int_0^{t_0} c \, dt \quad (5)$$

a fluktuace rychlosti \vec{c}'

$$\vec{c} = \vec{c} + \vec{c}' \quad (6)$$

Podobný rozklad platí i pro tlak, hustotu a teplotu. Flukтуаční složky jsou superponovány na střední časovou hodnotu \vec{c} , mají stochastický charakter a jejich časové hodnoty jsou nulové. Mohutnost turbulence se charakterizuje bezrozměrovou veličinou tzv. intenzitou turbulence. [11]

$$Tu = \frac{1}{\bar{c}} \sqrt{\overline{c'^2_x} + \overline{c'^2_y} + \overline{c'^2_z}} \quad (7)$$

Hlavní znaky turbulentního proudění:

- je nestacionární (stacionární může být pouze střední časová hodnota \vec{c}),
- je nedeterministické v prostoru i čase,
- je vířivé a trojrozměrné,

- difuze během turbulentního proudění je mohutnější než běžná molekulární difuze, proto je v turbulentním proudovém poli přenos skalárních i vektorových vlastností daleko intenzivnější než v proudění laminárním,
- dochází k tzv. disipaci turbulentní energie rozpadem velkých vírů v menší a menší až na velikost molekul, ty se pak vazkou disipací utlumí,
- podstatně větší třecí odpory než v proudění laminárním. [11]

3. 3. 1 Struktura turbulence

V turbulenci dochází vedle molekulárního pohybu, který je charakteristický pro laminární proudění, k pohybu makroskopických částic tekutiny, tj. shluků o velkém počtu molekul. Ty konají neuspořádaný translační i rotační pohyb, který lze pokládat za fluktuace kolem střední hodnoty. Zmíněné částice se nazývají turbulentními víry. V rovinném pojetí si je lze představit jako průměty vírového vlákna s osou kolmou k hlavnímu směru proudu. Jsou různě velké, a protože mohou vznikat a zanikat, tak i různou živostnost (za typickou velikost fluktuace rychlosti můžeme považovat $c' = 0,01\bar{c}$). To vše je důvodem, že turbulentní proudění nelze popsat deterministickým způsobem a je nutno využít statistických metod a spektrální analýzy. [11]

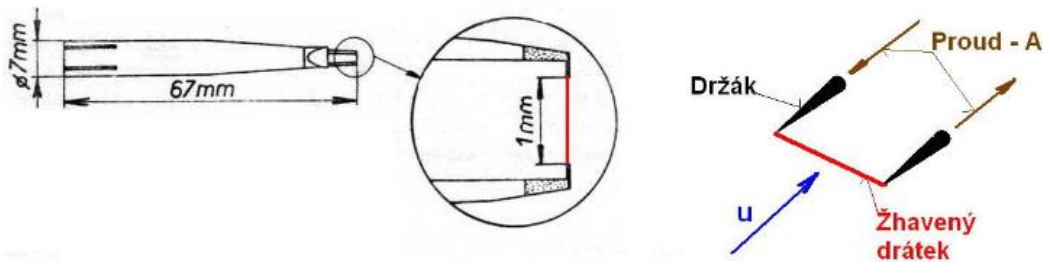
4 Návrh a popis metod měření rychlostního profilu a rozložení intenzity turbulence

Existuje mnoho metod, jak měřit rychlostní profil, ale každá metoda má svá omezení. V úvahu připadá například Pitotova trubice, která umožňuje měřit i 2D proudění, ale pro proudění, kde se vyskytují vyšší turbulence je nevhodná kvůli malé vzorkovací frekvenci. Další metodou může být LDA (Laser Doppler Anemometry), kde se pomocí Doplerova jevu měří laserový paprsek, který je rozptylován částicemi, které jsou rozptýleny v měřeném proudu tekutiny. Tento způsob měření je velmi přesný, mezi nevýhody ale můžeme zařadit nutnost dodávat do tekutiny částice pro rozptyl paprsku. Novější metodou, než LDA je metoda PIV (Particle Image Velocimetry). Do proudu tekutiny se opět přimíchají částice jako u LDA, které se osvětlí pomocí tzv. světelného nože, což je světelný svazek z laseru upravený tak, že osvětluje jen rovinu, ve které chceme měřit. Osvětlené částice se snímají digitální kamerou nebo fotoaparátem a výsledný obraz představuje podobu proudění. Další metodou je žárová anemometrie, která nám umožňuje měřit rychlost proudění tekutiny jen v určitém bodě, tak i intenzitu turbulence. I když tato metoda není tak přesná jako LDA nebo PIV, dokáže snímat s vyšší vzorkovací frekvencí než ostatní jmenované metody. [12]

Problémem při měření turbulentního proudového pole je, že proudění dosahuje vysoké frekvence fluktuací a pro přesné měření je potřeba správně nastavit vzorkovací frekvenci. Dalším problémem může být tvorba turbulentních vírů, které mohou být velmi malé, proto by měly být Měřicí přístroje co nejmenší, aby neovlivňovaly proudění a do měření se nevnášela systematická chyba. [12, 13]

4.1 Měření žhaveným drátkem (Hot-wire anemometry)

Měření žhaveným drátkem je technologie pro měření rychlosti tekutin a lze ji využít v mnoha různých oblastech. Anemometr se skládá ze dvou podpěr, mezi nimi je natažený drát. Drát je obvykle vyroben z wolframu, platiny nebo slitiny platiny a india. [14, 13]



Obrázek 12: Sonda se žhaveným drátkem [15]

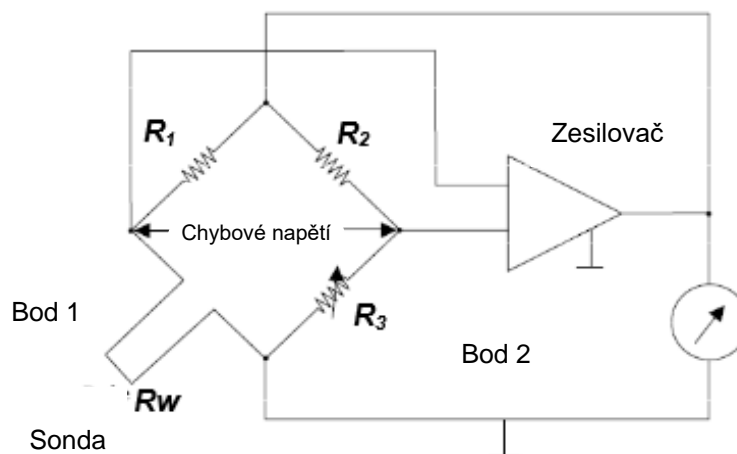
Žhavený drátek funguje následovně: elektrický proud, který teče přes drát, způsobí, že se drát ohřeje. Proudící tekutina (obvykle vzduch) způsobí ochlazení drátku a odebere mu část jeho tepelné energie. Proces ohřevu a následného ochlazování může být popsán bilanční rovnicí. Řešení této rovnice vede k určení rychlosti tekutiny, který proudí přes drát. Jendou z mnoha výhod oproti jiným snímačům pro měření rychlosti jsou velmi malé rozměry, proto je minimalizováno rušení měřených hodnot. Anemometry s žhaveným drátem jsou také velmi citlivé na rychlé změny rychlosti, protože mají malou časovou konstantu. [14, 13]

Tyto anemometry lze provozovat ve dvou režimech:

- žhavení za konstantního elektrického proudu (CCA - constant current anemometry),
- žhavení za konstantní teploty (CTA – constant temperature anemometry).

V režimu konstantního elektrického proudu hrozí nebezpečí spálení drátku, pokud je průtok tekutiny a tím jeho chlazení příliš nízké. Stejně tak, pokud je rychlost proudící tekutiny příliš vysoká, drát se dostatečně nezahřeje a poté neposkytuje kvalitní výsledky. Z těchto důvodů je většina anemometrů s žhaveným drátkem provozována v režimu žhavení za konstantní teploty, proto se dále omezíme pouze na tento způsob použití.

Chceme-li získat co nejpřesnější údaje, CTA anemometry se používají jako součást Wheatstonova můstku.



Obrázek 13: Wheatstoneův můstek [13]

4. 1. 1 Princip fungování

Obvod se skládá ze dvou známých pevných odporů R_1 a R_2 , odpor R_3 je proměnný. Žhavený drát představuje odpor R_w a uzavírá celý odporový můstek. Můstek je vyvážený, pokud $R_1/R_w = R_2/R_3$ to znamená, že rozdíl napětí („chybového napětí“) mezi body 1 a 2 je nulový. [13]

Tento obvod využívá skutečnosti, že odpor drátu R_w je funkcí teploty. Když je teplota drátu a tím i její odpor v počátečním provozním bodě, proměnný odpor R_3 se nastaví tak, aby se můstek přivedl do rovnováhy. Jak se rychlost proudění vzduchu okolo drátku zvyšuje nebo snižuje, změní se teplota drátku, stejně tak i jeho odpor. To způsobí, že se stane můstek nevyváženým a vznikne rozdíl napětí mezi body 1 a 2. Zesilovač tento rozdíl detekuje a podle toho zpětnovazebně upravuje elektrické napětí, aby udržoval konstantní teplotu a odpor drátku, tím se celý můstek znovu vyváží. Tyto změny elektrického napětí lze měřit a použít je k výpočtu rychlosti proudění okolo drátku. [13]

Abychom pochopili vztah mezi rychlostí proudění a změnami napětí je nutné řešit tepelnou rovnováhu pro drátek, která je určena rovnicí

$$Q_g = Q_o + Q_a. \quad (8)$$

Odvedené teplo se skládá z tepla odvedeného konvekcí do proudící tekutiny, dále se vyskytuje vedení tepla do držáku drátku a odvod tepla sáláním teplého drátku. Teplo odvedené sáláním a vedením je malé, může se proto zanedbat, potom pro tepelnou rovnováhu platí

$$Q_g = Q_o, \quad (9)$$

kde

$$Q_g = I^2 \cdot R_w = \frac{U^2}{R_w}, \quad (10)$$

$$Q_o = \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot l(t - t_{vz}). \quad (11)$$

Poslední rovnice se upraví na tvar

$$I^2 \cdot R_w = \frac{U^2}{R_w} = \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot l(t - t_{vz}). \quad (12)$$

Pro určení hodnoty Q_g , množství tepla přeneseného do kapaliny, je nutné dát do souvislosti odpor drátku a obecnou rovnici přenosu tepla. Odpor drátku lze popsat následujícím výrazem

$$R_w = R_0[1 + C(q_w - q_0) + C_1(q_w - q_0)^2 + \dots], \quad (13)$$

kde R_0 je odpor drátku při počáteční referenční teplotě C je teplotní koeficient odporu, nebo tuto rovnice lze s dostatečnou přesností lze vyjádřit lineární funkcí

$$R_w = R_0[1 + \alpha_1(t - t_{vz})] \quad . \quad (14)$$

Pro odvedené teplo při obtékání nekonečně dlouhého válce rychlostí kolmou k jeho ose, za předpokladu vynucené konvekce, platí kriteriální rovnice

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = 0,42Pr^{0,2} + 0,57Pr^{0,33} + Re^n, \quad (15)$$

kde

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (16)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad (17)$$

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu}. \quad (18)$$

Tato rovnice platí pro rozsah Reynoldsova čísla $0,01 < Re < 10000$, což odpovídá při průměru drátku $d = 5 \mu m$, rychlosti vzduchu $4 < c < 4 \cdot 10^6 m/s$. Z posledních tří rovnic po jednoduchých úpravách dostaneme tzv. Kingovu rovnici

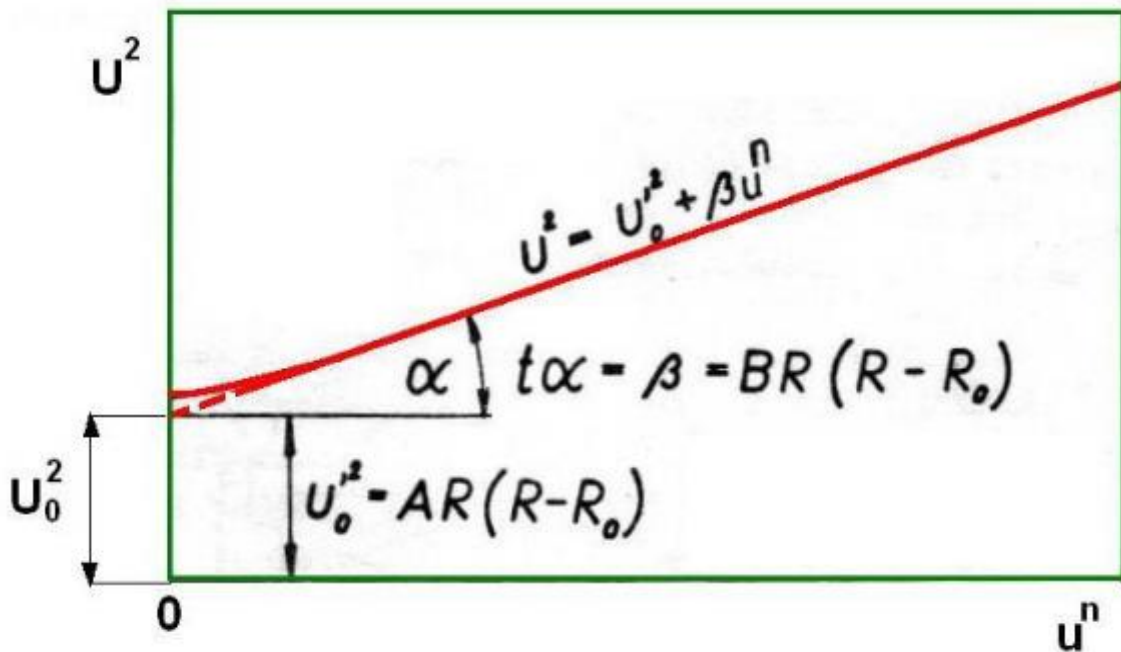
$$U^2 = R_w(R_w - R_0) \cdot (A + B) \cdot u^n = U_0^2 + \beta \cdot u^n, \quad (19)$$

kde A i B jsou konstanty, pro které platí

$$A = \frac{0,42 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda}{R_0 \cdot \alpha_1} Pr^{0,2}, \quad (20)$$

$$B = \frac{0,57 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda}{R_0 \cdot \alpha_1} Pr^{0,33} \left(\frac{d}{v}\right)^n. \quad (21)$$

V rovnici (19) jsou konstanty β , n , které se při praktických měřeních určují cejchováním anemometru. [15]



Obrázek 14: Závislost $U = f(c)$ [15]

Uvedený postup příliš zjednodušuje, co se vlastně v anemometru děje. Pro kompletní analýzu by bylo třeba vzít v úvahu vedení tepla v drátu, ztráty v bodech, kde je drátek připojený držákům. [13]

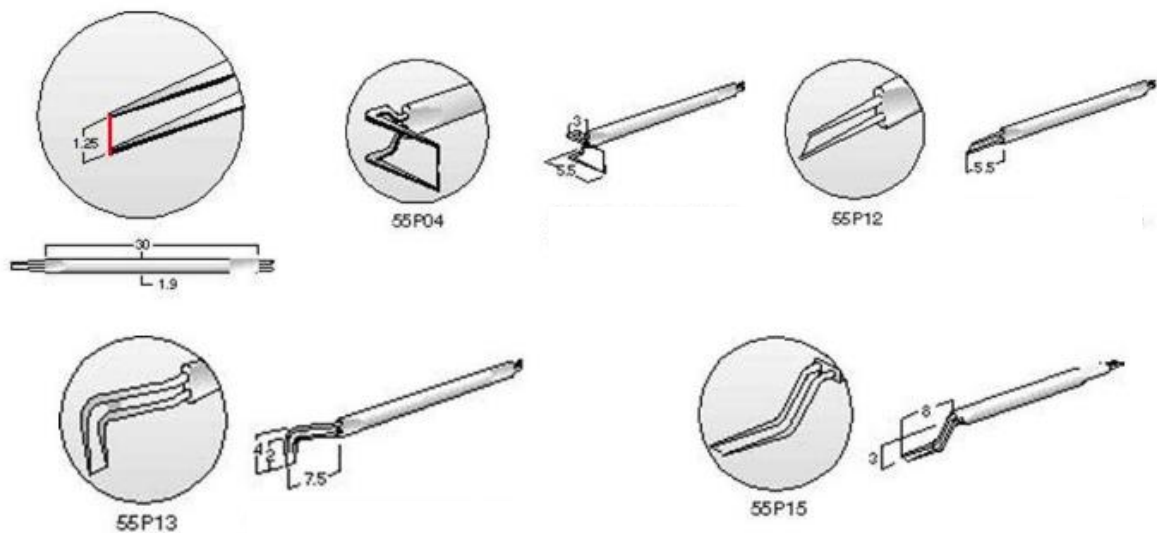
Při nízkých rychlostech proudění mohou účinky volné konvekce způsobit chyby při kalibraci. I když je v aerodynamickém tunelu nastavena rychlost na nulu, zahřátý drát stále přenáší tepelnou energii do okolí. [13]

Anemometry s horkým drátem jsou vynikající nástroje pro měření rychlosti proudění plynů a inertních kapalin. Vynikají rychlou reakcí na změny proudění, a proto jsou vhodné pro měření intenzity turbulence, a také tím, že dochází k minimálnímu rušení vlivem velikosti sondy. Mohou se použít pro široký rozsah rychlostí. Další výhodou CTA oproti jiným principům měření rychlosti proudění je snadné použití a dostupnější cena. [13]

4. 1. 2 Druhy sond

Drátkové sondy

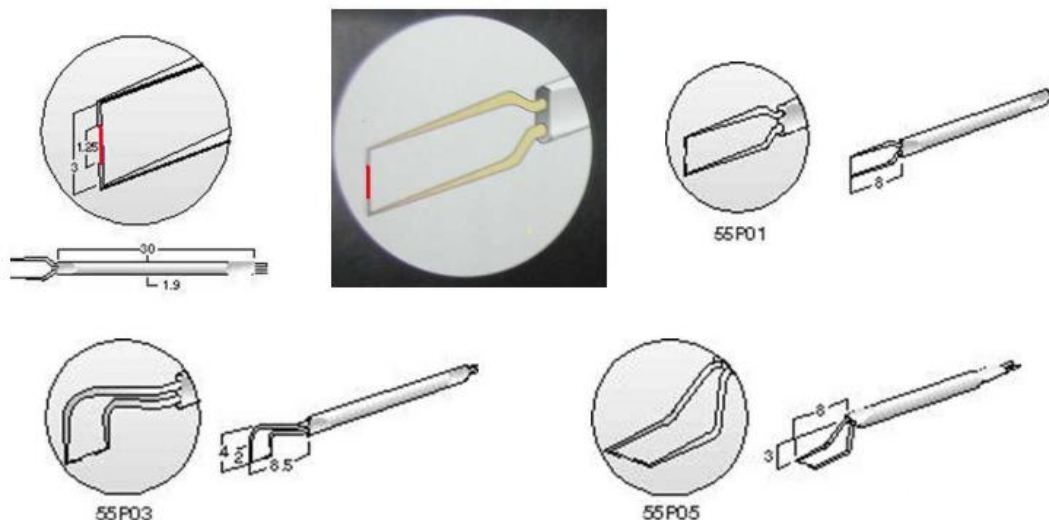
Drátky mají v průměru obvykle 5 μm , na délku 1-2 mm a jsou zavěšené mezi dvěma jehlovými hroty. [15]



Obrázek 15: Drátková sonda Dantec [15]

Pozlacené sondy

Mají stejnou aktivní délku jako sondy drátkové, ale konce jsou měděné a pozlacené. Toto provedení sondy má omezený přístup tepla do podpěry držáku a tím pádem rovnoměrnější rozdělení teplot podél drátku. [15]



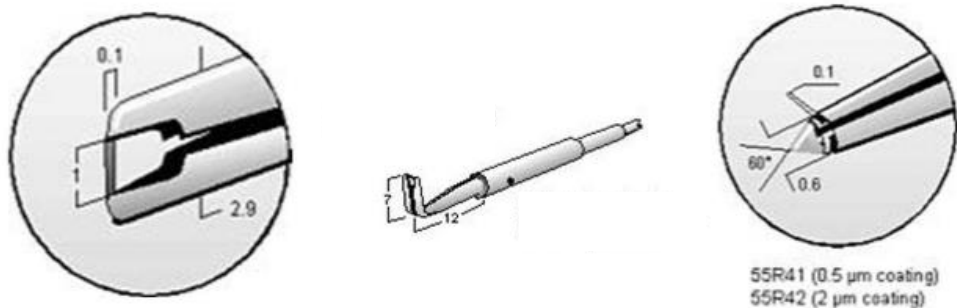
Obrázek 16: Pozlacená sonda Dantec [15]

Pro drátkové sondy platí:

- volit co největší poměr l/d , aby se minimalizoval odvod tepla do podpěry (držáku),
- drátky jsou povlakované platinou, musí být odolné proti oxidaci,
- délka drátku by měla být co nejménší, to znamená několikanásobně menší než je velikost měřených vírů,
- provozovat drátek za vyšší žhavicí teploty, sníží se poměr signálu/šum,
- teplotní součinitel odporu by měl být, co nejvyšší, zlepšit se tím citlivost sondy a zlepšit se frekvenční odezva. [15]

Filmové sondy

Sonda je tvořena vrstvou niklu napařeného na křemenné folii (tělísku). Vrstva z niklu je pokryta ochrannou vrstvou oxidu křemíku. Ta chrání nikl proti opotřebení, korozi a zároveň elektricky izoluje. Tato sonda se nedá opravit. Existují i jiná provedení filmových sond, např. vrstva niklu je napařená na kuželové křemenné ploše. [15]



Obrázek 17: Filmová sonda Dantec [15]

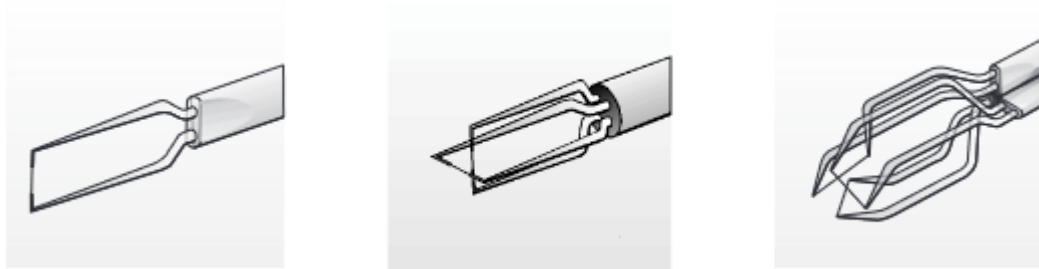
4. 1. 3 Výběr typu snímače

- Drátové senzory: miniaturní dráty jsou vhodné pro aplikace ve vzduchu s intenzitou turbulence od 5–10 %. Mají nejvyšší frekvenční odezvu. Jsou cenově nejdostupnější.
- Pozlacené dráty jsou vhodné pro aplikace s intenzitou turbulence od 20–25 %.
- Filmové senzory: Pro aplikace ve vzduchu při nízkých až středních velikostech fluktuace. Jsou nejrobustnější a mohou být použity v méně čistém vzduchu.

Pro měření v plynech a v elektricky nevodivých kapalinách se používají sondy bez povrchové izolace. Naopak pro elektricky vodivé kapaliny, např. vodu se musí používat krytých sond, které mají povrch drátku nebo fólie izolován vrstvou křemene, její tloušťka je asi 3 μm . Drátkové sondy mají velmi malou hmotnost a tím i malou tepelnou setrvačnost, uplatňují se při měření pulzací rychlosti s vysokými frekvencemi. Naopak fólie, vzhledem ke své větší hmotnosti, vykazují podstatné snížení horní mezní frekvence, jsou však mechanicky pevnější, proto se používají při měření nadzvukových rychlostí a v kapalinách. [14]

4. 1. 4 Senzory pro měření ve více rozměrech

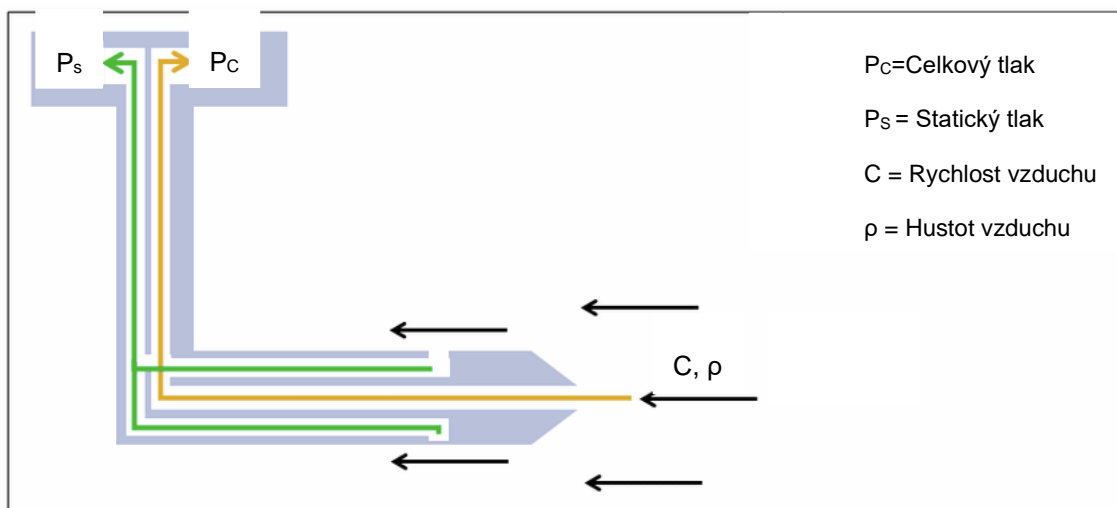
Senzory jsou k dispozici v jednorozměrných, dvourozměrných a trojrozměrných verzích. Senzory (dráty nebo vlákna) mohou reagovat na velikosti i směr vektoru rychlosti. Informace o směru vektoru rychlosti mohou být získány pouze tehdy, když jsou dva nebo více senzorů umístěny pod různými úhly vzhledem k vektoru rychlosti proudění. [14]



Obrázek 18: Vícerozměrné CTA sondy [14]

4.2 Prandtlova sonda

Je zařízení na měření rychlosti proudění. Principiálně jde o upravenou Pitotovu trubici, proto se také často nazývá Pitot-statická trubice. [16]



Obrázek 19: Princip Prandtlovy sondy (1)

Měření rychlosti snímáním kinetického tlaku Prandtlovou trubicí je v praxi velmi rozšířené. Prandtlova trubice je spojena dvěma hadičkami s tlakoměrem. Hadičky přenášejí celkový tlak, který je tvořen součtem statického a kinetického tlaku. Celkový tlak je snímán otvorem umístěným na konci trubice, který je nastaven proti směru proudění, statický tlak je snímán v otvoru umístěném tak, aby se v něm vliv proudění neprojevil. Snímač tlakové difference měří rozdíl obou tlaků, což je tlak kinetický. Ten závisí na rychlosti proudění a hustotě plynu podle vztahu

$$p_k = \frac{1}{2} \rho c^2. \quad (22)$$

Dynamický tlak p_D zahrnuje vliv stlačitelnosti s a je roven

$$p_d = s \cdot p_k. \quad (23)$$

Rychlost se vypočte z Bernouliho rovnice podle vztahu

$$p_S + \frac{1}{2} \rho c^2 = p_C + \frac{1}{2} \rho c^2. \quad (24)$$

Parametry nerušeného proudu vzduchu před Prandtlovou sondou označíme indexem S a parametry, charakterizující proud vzduchu v otvoru do trubice indexem C. V otvoru do trubice dojde o zabrzdění proudu vzduchu, tím pádem rychlost bude nulová. Upravíme Bernouliho rovnici

$$p_C = p_S + \frac{1}{2} \rho c^2. \quad (25)$$

Z tohoto výrazu vyplývá, že celkový tlak je součet statického tlaku p_S a kinetického tlaku, který označíme p_k

$$p_C = p_S + p_k, \quad (26)$$

Úpravou rovnice (22) a (25) získáme vztah rychlost

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_C - p_S)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}. \quad (27)$$

Tento vzorec platí pouze pro nestlačitelné proudění (pro rychlosti do 50 m/s). Rozdíl tlaků je měřen pomocí diferenčních manometrů. A hustotu vzduchu vypočteme ze stavové rovnice ideálního plynu

$$p \cdot v = r \cdot T, \quad (28)$$

$$\rho = \frac{p}{r \cdot T}. \quad (29)$$

K určení rychlosti proto bude nutné měřit teplotu proudícího vzduchu a také atmosférický tlak. [16]

Omezení při použití Prandtlovy sondy:

- Pokud je rychlost příliš nízká, rozdíl tlaků je velmi malý a je obtížné jej přesně změřit. Chyby v měřicích přístrojích mohou být větší než naměřený tlakový

diferenciál. Takže Pitot-statické trubice nefungují příliš dobře pro měření při nízkých rychlostech.

- Pokud je rychlost naopak velmi vysoká, porušili jsme předpoklady Bernoulliho rovnice, tím pádem rychlost nebude změřena správně. Na přední straně trubice se vytvoří rázová vlna, která změní celkový tlak. Existují korekce rázové vlny, které tento problém řeší, abychom mohli použít Pitot-statickou trubici i pro nadzvukové proudění.
- Pokud dojde k ucpání trubek, výsledné změřené tlaky nebudou správné. [18]

Pro stlačitelné podzvukové proudění ($0,3 < Ma < 1$) lze rychlost spočítat následovně

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{p_S}{\rho} \cdot \left[\left(\frac{p_C}{p_S} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]}. \quad (30)$$

5 Postup měření rychlostního profilu a intenzity turbulence aerodynamického tunelu

Cílem této práce bylo změřit rychlostní profil a rozložení intenzity turbulence na výstupu z dýzy (na vstupu do měřicího prostoru) nejmodernějšího aerodynamického tunelu umístěného v laboratořích ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky. Jedná se o aerodynamický cirkulační tunel s otevřeným měřicím prostorem, který má velikost 950 x 450 mm a je dlouhý 1200 mm. Rychlost vzduchu v něm dosahuje až 50 m/s. Axiální ventilátor, který udává vzduchu kinetickou energii je poháněn asynchronním motorem, který je řízen frekvenčním měničem. V měřicím prostoru předpokládáme pouze jednorozměrné nestlačitelné proudění ve směru rovnoběžném s osou tunelu.

5.1 Stavba traverzovacího zařízení

Před samotným měřením bylo nutné v měřicím prostoru aerodynamického tunelu postavit manipulační zařízení, které bude pohybovat s měřicí sondou před výstupem z dýzy, abychom mohli změřit rychlostní profil v celé oblasti. Z toho vyplynuly následující požadavky na konstrukci:

- přesný a plynulý posuv ve všech třech osách,
- jednoduché odsunutí celé konstrukce z měřicího prostoru,
- snadné a bezpečné nasazení sondy do polohovacího zařízení,
- dostatečná tuhost konstrukce,
- motorizovaný pohon posuvu,
- pohodlné ovládání činnosti traverzéry,
- využití krokových motorů, které se již nacházely v laboratořích.

K stavbě byla použita konstrukce, která už v laboratořích ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky stála, je zobrazena na Obrázku 20, ale bylo nutné ji z velké části upravit.



Obrázek 20: počátky stavby manipulátoru

Na podélné (rovnoběžné s aerodynamickým tunelem) horní profily z tzv. Alutecu (hliníkový konstrukční systém společnosti Alutec) byly naraženy vodící lišty. Následně byly na tyto vodící lišty na obou stranách nasunuty jezdce, ty jsou zobrazeny na Obrázku 21. Poté byly jezdce spojeny a sešroubovány pomocí dvou příčných profilů, jak lze vidět na Obrázku 22.



Obrázek 21: Jezdec



Obrázek 22: Průběh stavby manipulátoru

Na příčný profil blíže k vstupu do měřicího prostoru byly opět naraženy vodící tyče a nasunut jezdec. Naproti tomuto jezdcovi byl našroubován další jezdec, který slouží k pohybu ve svislém směru. Na horní podélné profily byl namontován příčný profil, abychom na něj mohli uchytit tělesa krokových motorů pro podélný posuv.



Obrázek 23: Konstrukce před připevněním krokových motorů

Posuvný pohyb byl realizován pomocí matice a závitové tyče, která byla spojena s hřídelí krokového motoru. Toto řešení je konstrukčně jednoduché a dostatečně přesné. Všechny krokové motory a závitové tyče s vodicími kuličkovými pouzdry byly již v laboratořích připraveny. Závitové tyče bylo nutné uříznout na požadovanou délku, upravit jejich konce a udělat na nich z jedné strany potřebné osazení pro spojení s hřídelí krokového motoru pomocí spojky a na druhé straně na ně upevnit ložisko.

Krokové motory a kuličková pouzdra byly ke konstrukci připevněny pomocí šroubových spojů a plastových desek, které byly vyřezány na laseru v laboratořích ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky. Na Obrázku 24 je zobrazeno připevnění motoru, který zajišťuje svislý posuv.



Obrázek 24: Připevnění motoru pro svislý posuv

5.2 Zprovoznění krokových motorů

K zprovoznění krokových motorů bylo nutné dokoupit zdroje a drivery pro krokové motory. Krokové motory jsou za účelem ovládní propojeny s PC prostřednictvím karet National Instruments a USB rozhraní. V následující Tabulce je seznam nakoupených komponent, u kterých je uvedena i cena.

Název	Počet kusů
M542 driver pro 2- fázové krokové motory	3
EM885S driver pro 2- fázové krokové motory	1
RPS488 průmyslový spínaný zdroj 350W	1
S350 průmyslový spínaný zdroj 350W	3
Kabely pro připojení motorů, typ 4x1,5, JZ_HF-CY	15
Ovládací kabely JZ500	10

5.3 Komponenty pro měření

5.3.1 Sonda

Pro tento experiment byla požita jedno drátková, povlakovaná sonda typ 55R01 od společnosti Dantec Dynamics. Žhavený element tvoří drátek o průměru 70 μm , dlouhý 3 mm, ten je povlakován vrstvou niklu o tloušťce 0,5 μm . Tento typ sondy se používá pro měření středních rychlostí a jejich fluktuací při jednorozměrném proudění. Sonda je na Obrázku číslo 25. [19]



Obrázek 25: Sonda typ 55R01

5. 3. 2 CTA anemometr

V tomto Experimentu byl použit CTA anemometr, který se prodává pod názvem MiniCTA typ 54T30. S ostatními komponenty byl propojen pomocí speciálních kabelů s BNC konektory.

5. 3. 3 A/D převodník

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, rychlost proudění je charakterizována výstupním napětím z CTA anemometru, který je v analogové podobě. Toto zařízení nám umožňuje převod analogového signálu do digitální podoby. V našem případě byl použit převodník od společnosti National Instruments, který umožňuje převod signálu o frekvenci až 100kHz.

5. 3. 4 Prandtlova sonda

Prandtlova sonda byla použita k měření referenční rychlosti proudění, potřebné ke kalibraci žhaveného drátku. Dále s ní byl změřen rychlostní profil na výstupu z dýzy.

5. 3. 5 Odporový snímač teploty Pt100

Pro výpočet hustoty vzduchu bylo nutné znát i teplotu vzduchu v tunelu. Teploměr byl umístěn do difuzoru aerodynamického tunelu, přibližně 5 m za měřícím prostorem.

U odporových snímačů teploty je měření založeno na změně odporu drahých kovů vlivem teploty. Každý kov má svoji specifickou odporovou charakteristiku. U drahých kovů, jako je platina, vykazuje odporová charakteristika přibližně lineární chování. Při napájení snímače konstantním proudem, lze změnu odporu (teploty) odvodit ze změny napětí. Měřicí proud je volen co nejnižší, aby se minimalizovalo vlastní zahřívání odporového snímače. [20]

V tomto experimentu byl použit snímač Pt100 ve čtyřvodičovém zapojení. Použití třetího a čtvrtého vodiče umožňuje nezávislou kompenzaci obou přírodních vodičů. Odpor přírodních vodičů je zcela kompenzován i v případě, že odpory vedení R_{w1} a R_{w4} nejsou stejné. Kompenzace vedení je automaticky prováděna vyhodnocovací jednotkou / převodníkem. [20]

5. 3. 6 Diferenční a absolutní snímač tlaku

V našem měření byly použity tlakové snímače od společnosti BD senzors. Diferenční snímač tlaku měřil rozdíly mezi celkovým a statickým tlakem, získaných na Prandtlově trubici. Absolutní snímač tlaku byl připojen přes T- kus k hadičce se statickým tlakem.

5.4 Popis měření a nastavení zařízení před měřením

Před samotným měřením bylo nutné provést řadu kalibrací a nastavení.

5. 4. 1 Nastavení přehřívání drátku

Nastavení přehřívání drátku se provádí odšroubováním zadního krytu u miniCTA anemometru, kde je nutné nastavit do správné polohy osm přepínačů. Nastavení závisí na typu sondy. Pro toto nastavení slouží výpočtový soubor od společnosti Dantec Dynamics, zpracovaný v excelu, ve kterém se nastaví parametry drátku a požadovaná žhavicí teplota. Program pak zobrazí obrázek s nastavením jednotlivých přepínačů. Na Obrázku číslo 26 je vidět nastavení v našem experimentu.

Mini-CTA type 54T30, 54N80, 54N81 and 54N82: Selecting and adjusting overheat. 9054S4016
 Org. 980528/TSV
 Rev. 100531/MHA
 DMS no. 4867v7

Probe identification prb.001 ch.1 -

Insert probe specific parameters etc.

Sensor resistance, R_{20}	6,19 Ω	See probe box
Sensor lead resist., R_L	0,50 Ω	55P11/61 family
Support resistance, R_s	0,60 Ω	Non standard
Cable resistance, R_c	0,45 Ω	Non standard
Sensor TCR, α_{20}	0,41% /K	
Desired wire temp., T_w	250 $^{\circ}\text{C}$	Wire mean temperature
Temperature of flow	25 $^{\circ}\text{C}$	Temperature during measurement

Click box below to select resistance range.
 (Check label on the Mini-CTA for actual range!)
 4-20 Ohms (Standard: 4-20 ohms)

Calculated wire operating resistance etc.

Over temperature, ΔT	225 $^{\circ}\text{C}$
Operating resist., R_w	12,03 Ω
Total resistance, R_T	13,58 Ω
Overheat ratio, a	0,94
Bridge ratio, M	1:20
Decade resistance, R_0	271,5 Ω

Set decade controls as follows:
 (grey dot indicates switch in down position)

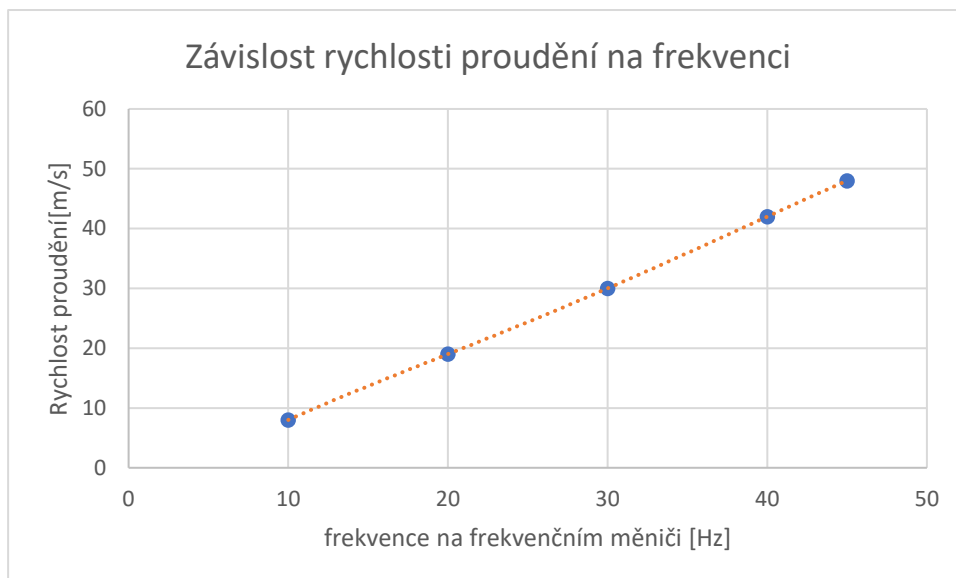
Obrázek 26: Nastavení přehřívání drátku Dantec

5. 4. 2 Rychlostní kalibrace

Kalibrací se stanoví výsledný vztah mezi výstupním napětím z CTA a rychlostí proudění. To se provádí tak, že se sonda vystaví ustálenému proudění o známe rychlosti a změří se napětí. Tím získáme jeden bod kalibrační křivky. Pro získání doporučených alespoň deseti bodů proložíme těmito body kalibrační křivku. V našem experimentu použijeme polynom 4. řádu, kterým byly jednotlivé body proloženy. Přesnost kalibrace lze ovlivnit přidáním dalších kalibračních bodů, tím pádem tyto kalibrační body pokryjí rozsah měřených rychlostí. Kalibraci lze provést buď specializovaným kalibrátorem sondy nebo v aerodynamickém tunelu, kde se použije referenční rychlost např. z Prandtlovy sondy. Je důležité mít přehled i tom jaká je teplota při kalibraci. Pokud se teplota kalibrace liší od teploty, při které je prováděn experiment, je nutné provést teplotní korelaci. Vytvořením kalibrační křivky získáme koeficienty, podle kterých se dále přepočítává napětí na rychlost: (2)

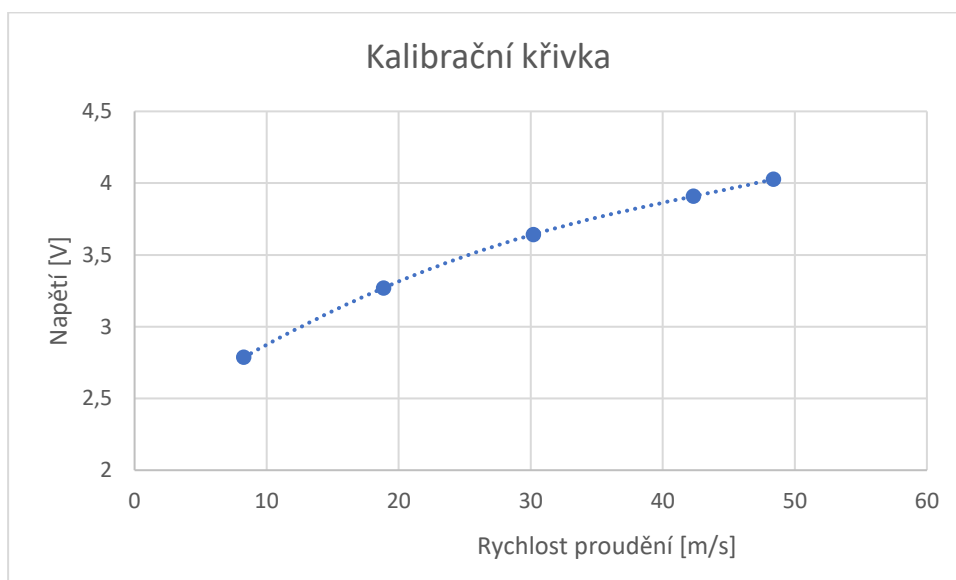
$$C = C_0 + C_1 \cdot U + C_2 \cdot U^2 + C_3 \cdot U^3 + C_4 \cdot U^4. \quad (31)$$

Kalibrační měření bylo provedeno v pěti bodech. Rychlost otáčení ventilátoru, tím pádem i rychlost proudění v aerodynamickém tunelu, je řízena frekvenčním měničem. Postupně byla nastavována frekvence na měniči na 10, 20, 30, 40 a 45 Hz, což přibližně odpovídá rychlostem 8, 19, 30, 42 a 48 m/s.



Obrázek 27: Závislost rychlosti proudění na frekvenci

Referenční rychlost byla v našem experimentu získávána z Prandtlovy trubice, která byla umístěna 25 mm pod žhaveným drátkem. Všechna data pro kalibraci byla zaznamenávána 5 sekund s vzorkovací frekvencí 20 kHz, tj. 100000 hodnot pro každý kalibrační bod. Spolu s napětím z CTA anemometru byla zaznamenávána také teplota proudícího vzduchu a atmosférický tlak. Na Obrázku 28 je zobrazena kalibrační křivka.

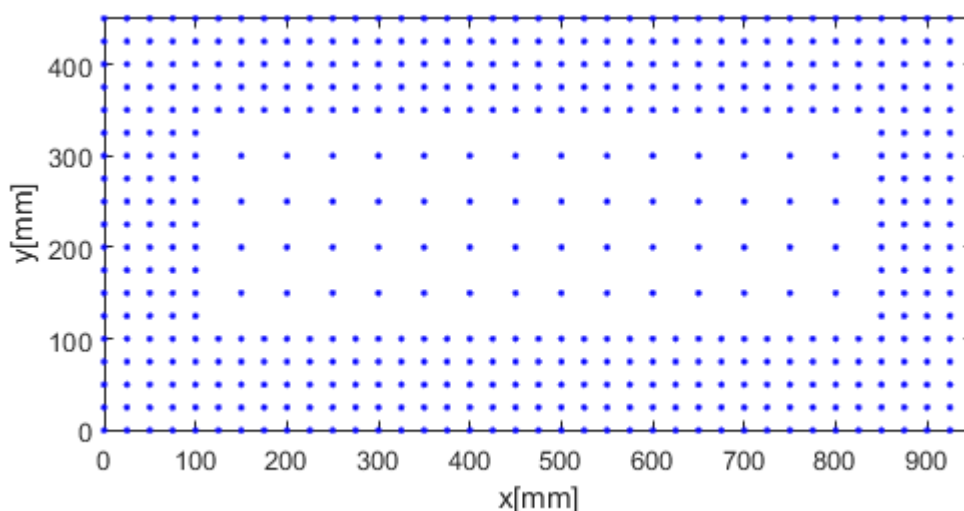


Obrázek 28: Závislost napětí na rychlosti proudění

5.5 Měření dat

Jak již bylo zmíněno dříve, úkolem bylo proměřit rychlostní profil a intenzitu turbulence na výstupu z dýzy. Protože byl použit žhavený drátek a Prandtlova trubice

a obě metody měření umožňují pouze bodové měření rychlosti, bylo nutné vstup do měřicího prostoru, který má rozměr 950 mm x 450 mm, rozdělit a menší úseky a určit body, kde budeme měřit. K okrajům byly měřené body zhuštěné a to po 25 mm, ve středu dýzy byly měřené po 50 mm. Celkem bylo měření provedeno v 500 bodech. Měřicí síť je zobrazena na Obrázku 29.

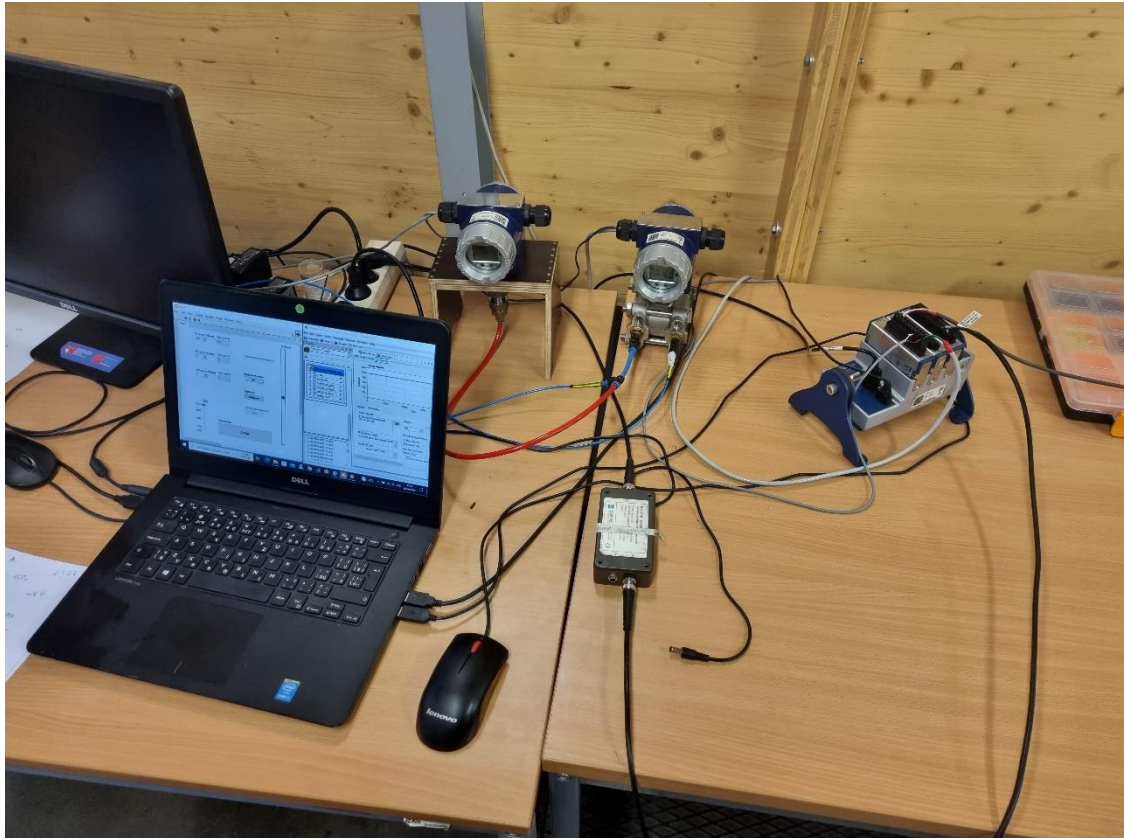


Obrázek 29: Měřicí body

K měření byl použit držák, ve kterém byla umístěna Prandtlova sonda a držák pro žhavený drátek zároveň, ve vertikální vzdálenosti 25 mm, jak můžeme vidět na Obrázku číslo 30. Pomocí manipulační zařízení byly sondy umístěny 50 mm před okraj dýzy. Žhavený drátek byl za zvýšené opatrnosti vyjmut z obalu a vložen do držáku s následným zapojením napájení CTA anemometru. Byl spuštěn ovládací systém aerodynamického tunelu a na frekvenčním měniči byla nastavena hodnota 35 Hz, což zhruba odpovídá rychlosti proudění 34 m/s. V programu SignalExpress byla nastavena vzorkovací frekvence 20 kHz a doba měření jednoho vzorku 5s. Manipulačním zařízením byla sonda přesunuta na levý, spodní roh dýzy, na Obrázku 29 se jedná o polohu [0,0]. I když průřez dýzy není obdélníkový, ale jde o nepravidelný osmiúhelník. V rohových bodech fakticky neproudí žádný vzduch, měření jsme i tak v těchto bodech prováděli, hlavně z důvodu jasného číslování jednotlivých textových souborů. Samotné měření představovalo přepínání mezi programem traverzéro, ve kterém se vždy nastavilo posunutí do dalšího měřicího bodu a programem SignalExpress, kde se spustilo měření aktuálního bodu. Po změření všech bodů byla nejprve vyjmuta sonda žhaveného drátku z držáku a uložena do obalu, aby se tak předešlo jejímu poškození.



Obrázek 30: Držák se sondami



Obrázek 31: Pohled na měřicí pracoviště

5.6 Sběr dat

Sběr surových dat byl proveden pomocí programu SignalExpress s následným exportem změřených hodnot do textových dokumentů. Výstup z měření v každém bodě byl tvořen údaji o čase, absolutním tlaku, diferenčním tlaku na Prandtlově trubici, teplotě v tunelu a také napětím na CTA anemometru. Dále byly ihned v programu spočítány hodnoty hustoty vzduchu a hodnota rychlosti proudění z Prandtlovy sondy podle následujících vztahů a taktéž exportovány do stejného textového dokumentu.

$$\rho = \frac{p}{r.T}, \quad (32)$$

$$c_{prantl} = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_s)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}. \quad (33)$$

5.7 Vyhodnocení dat

Zpracování dat bylo provedeno programem Matlab. Program nejdříve načte všechna vyexportovaná data, která byla ve formátu textových dokumentů. V jednotlivých dokumentech přepíše desetinné čárky na tečky. Nejdříve jsou jednotlivá napětí z CTA anemometru přepočtena přes teplotní korekci podle vzorce, kde T_w je teplota přežhavení drátku, T_0 je teplota při kalibraci a T_a je teplota při daném měření:

$$U_{corr} = \left(\frac{T_w - T_0}{T_w - T_a} \right)^{0,5} \cdot U. \quad (34)$$

Hodnoty teplotně korigovaných napětí jsou dále přepočteny podle kalibrační křivky na rychlosti. Podle rovnice.

$$C = C_0 + C_1 \cdot U_{corr} + C_2 \cdot U_{corr}^2 + C_3 \cdot U_{corr}^3 + C_4 \cdot U_{corr}^4. \quad (35)$$

Jednotlivé koeficienty kalibrační křivky jsou taktéž vypočteny v programu Matlab, z dat získaných při kalibračním měření. Vypočtené rychlosti jsou pro každý měřený bod zprůměrovány a z údajů je také vypočtena intenzita turbulence podle následujících rovnic. Rovnice jsou zde uvedeny pouze pro první bod měření. Výpočet

všech ostatních bodů je analogický. V našem experimentu byl počet vzorků pro každý bod 100 000.

Výpočet průměrné rychlosti:

$$c_{1STŘ} = \frac{1}{N} \cdot \sum_1^N c_{1i}, \quad (36)$$

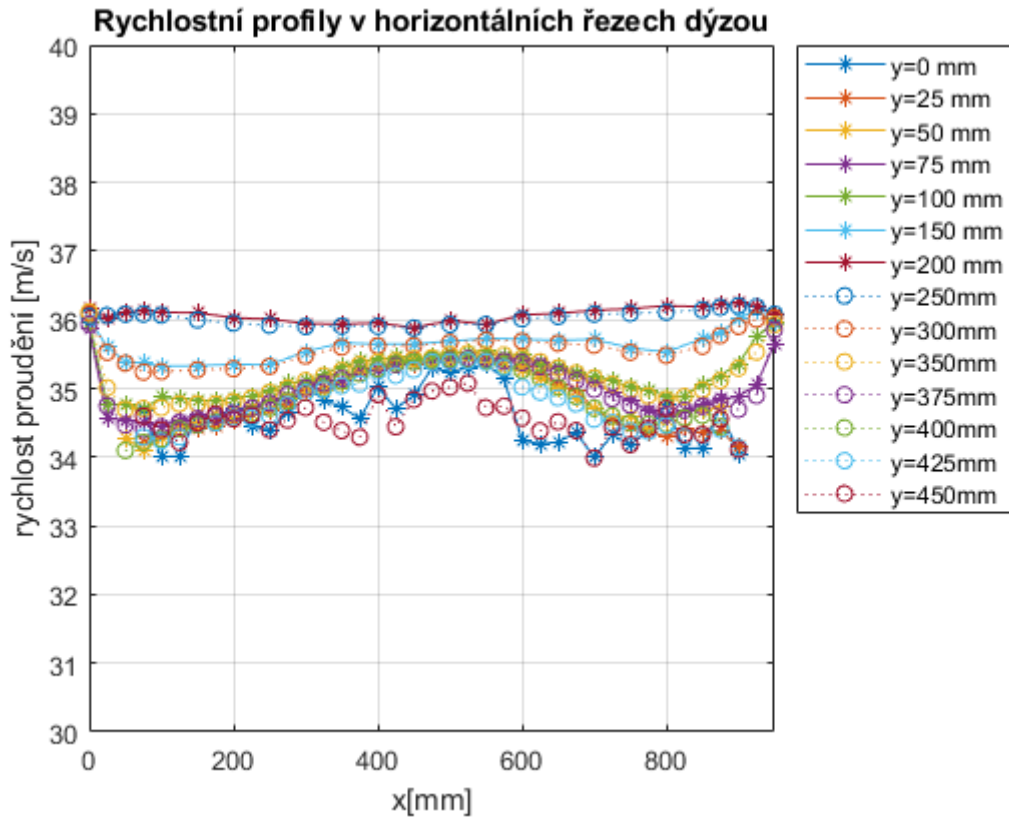
výpočet střední hodnoty čtverce flukтуаčních rychlostí:

$$c_{1RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_1^N (c_{1i} - c_{1STŘ})^2}, \quad (37)$$

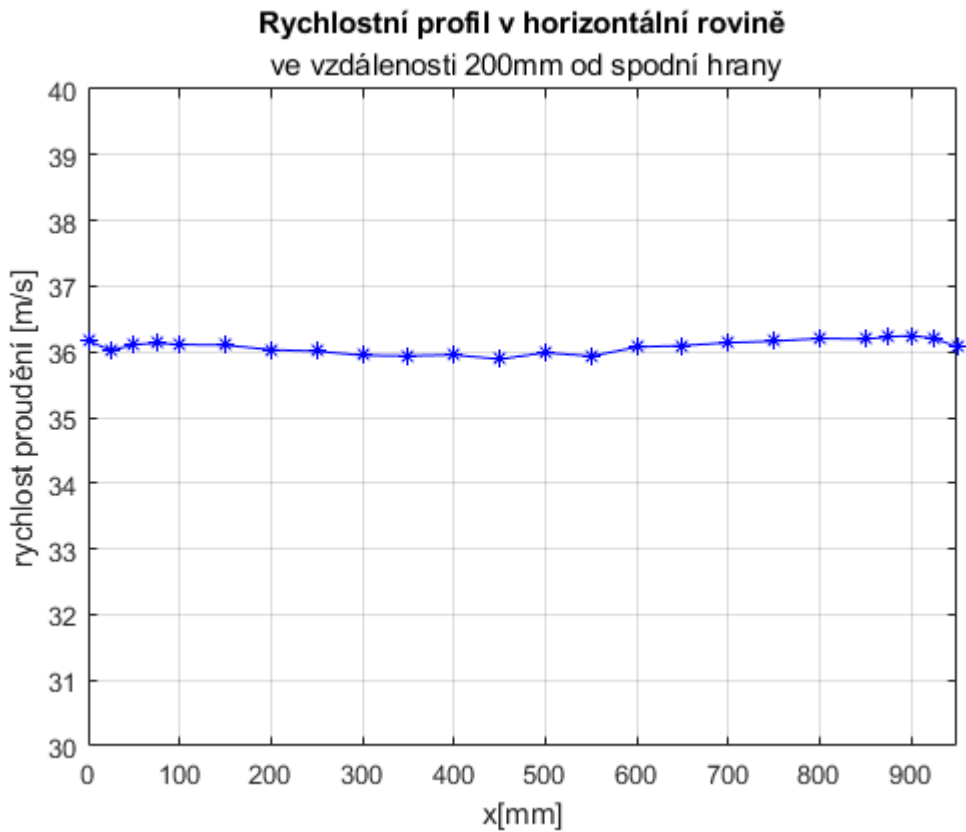
a výpočet intenzity turbulence:

$$Tu_1 = \frac{c_{1RMS}}{c_{1STŘ}} \cdot 100. \quad (38)$$

Tento proces byl opakován pro všech 500 bodů, jednotlivé hodnoty intenzity turbulence a rychlosti proudění byly ukládány do matice. Změřeným hodnotám byly přiřazeny souřadnice a byly vyneseny do grafů. Na Obrázku 32 jsou zobrazeny rychlosti proudění v horizontálních řezech dýzou v různých vzdálenostech od spodní hrany dýzy, změřené Prandtlovou sondou. Na Obrázku 35 je zobrazeno rozložení intenzity turbulence v různých vzdálenostech od spodní hrany. Rychlostní profil v horizontálních řezech přibližně středem dýzy se zná být vyrovnaný. Na ostatních horizontálních řezech můžeme vidět, že se rychlosti u stěn naopak zvyšují, to může být způsobeno nevhodným návrhem dýzy, kde pravděpodobně dochází k příliš velkému urychlení proudu podél bočních stěn dýzy. Intenzita turbulence dosahuje v měřicím prostoru hodnot 0,8 – 1,7% a v těsné blízkosti stěn dýzy se dle očekávání pohybuje okolo vyšších hodnot a to 1,7 – 3,5%.

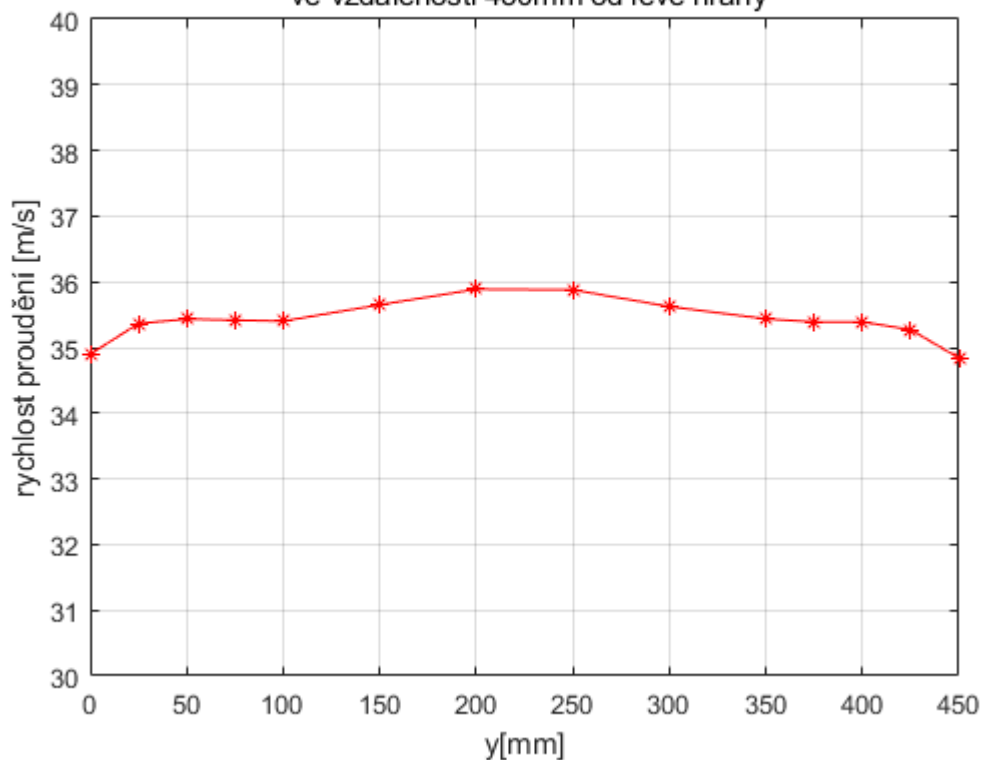


Obrázek 32: Rychlostní profil v horizontálních řezech dýzou



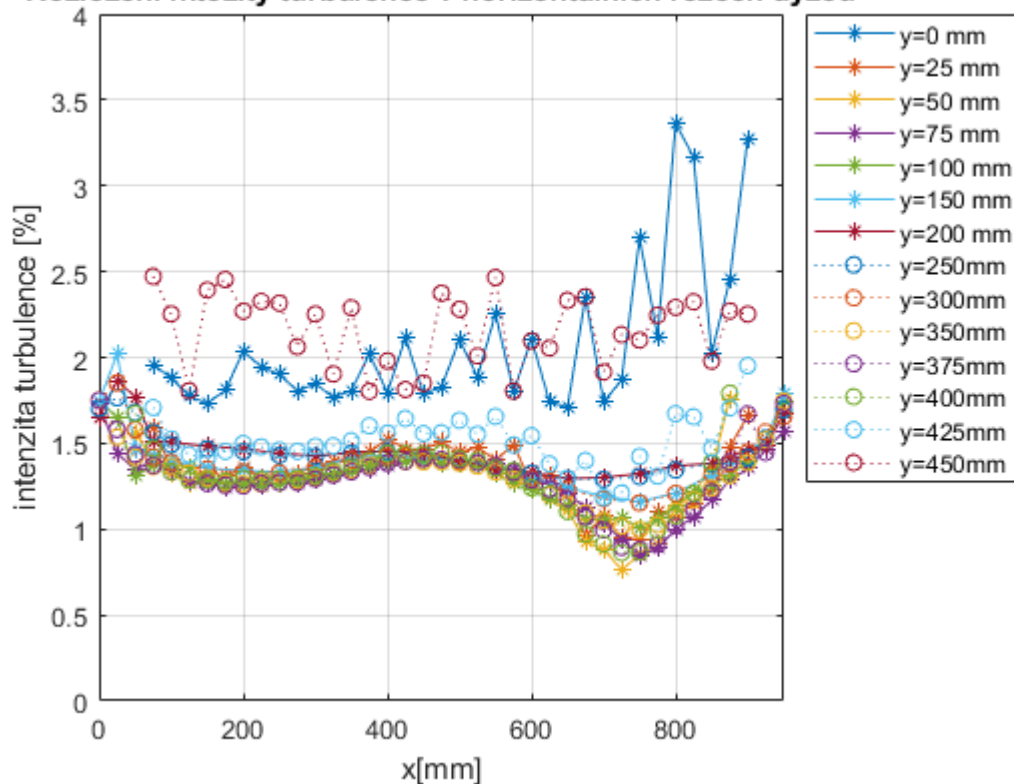
Obrázek 33: Rychlostní profil v horizontální rovině ve vzdálenosti 200 mm od spodní hrany

Rychlostní profil ve vertikální rovině
ve vzdálenosti 450mm od levé hrany

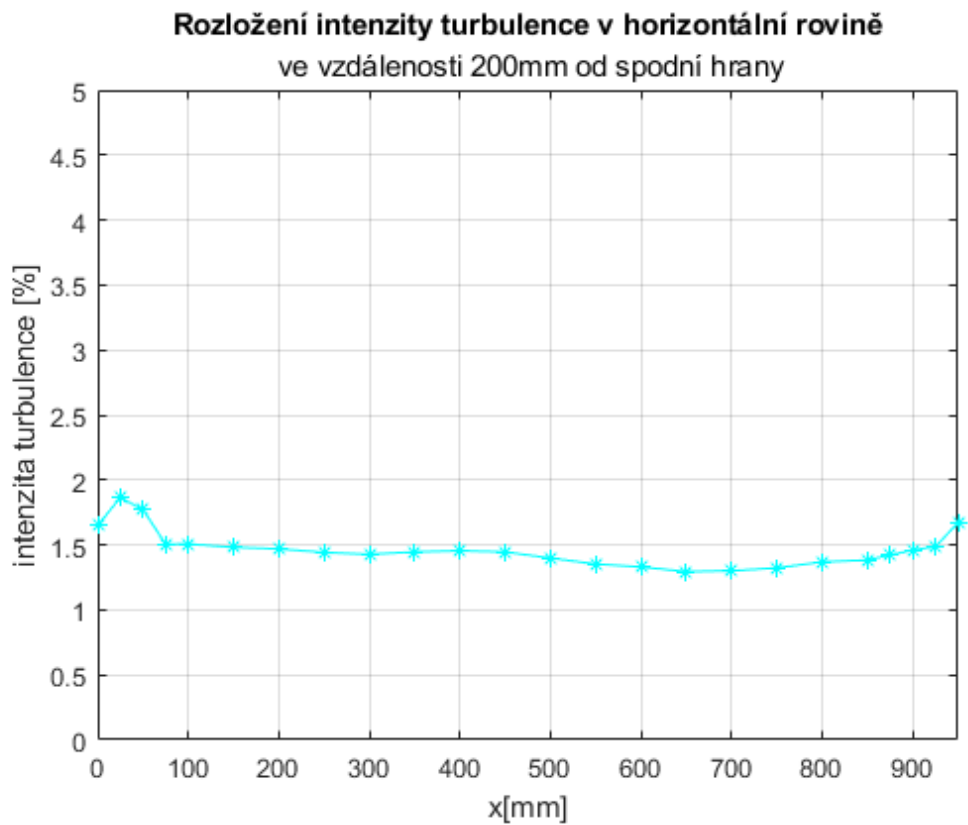


Obrázek 34: Rychlostní profil ve vertikální rovině ve vzdálenosti 450 mm od levé hrany

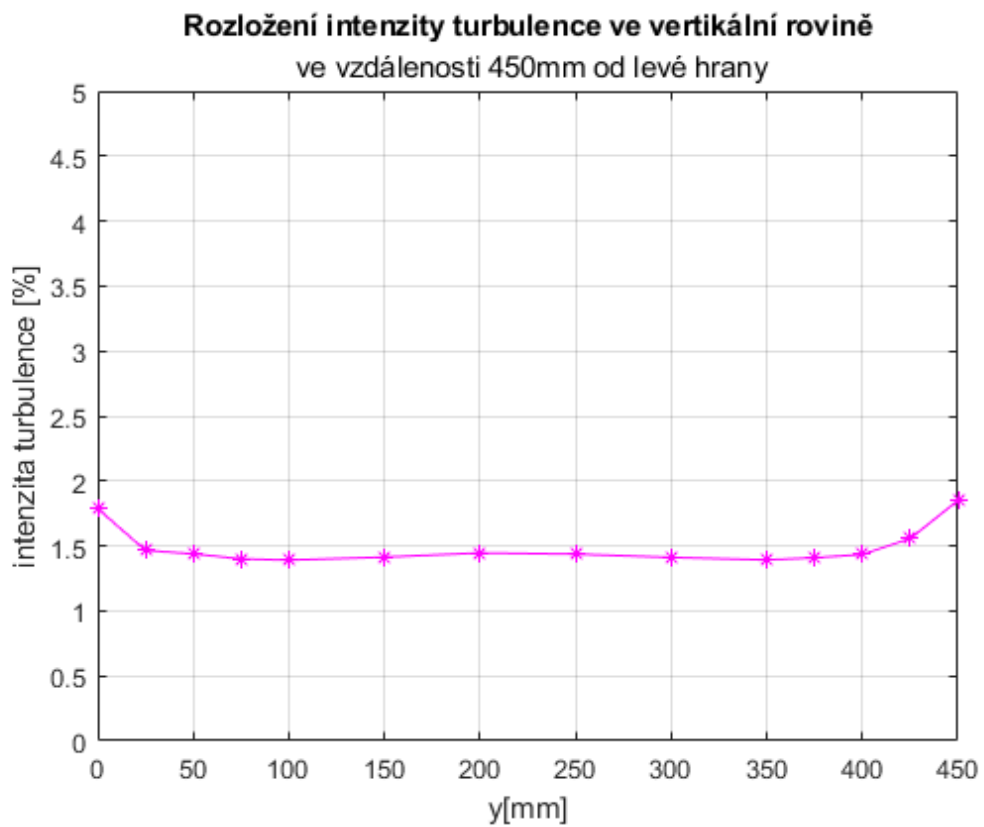
Rozložení intezity turbulence v horizontálních řezech dýzou



Obrázek 35: Rozložení intezity turbulence v horizontálních řezech dýzou

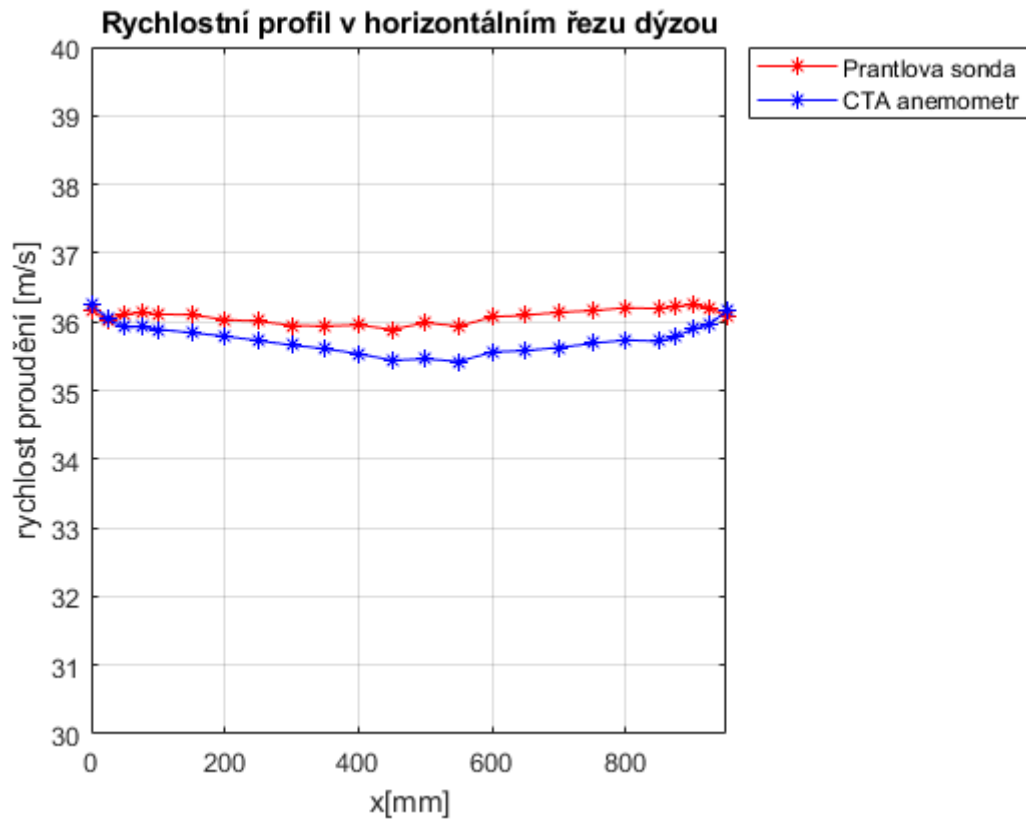


Obrázek 36: Rozložení intenzity turbulence v horizontální rovině ve vzdálenosti 200 mm od spodní hrany



Obrázek 37: Rozložení intenzity turbulence ve vertikální rovině ve vzdálenosti 450 mm od levé hrany

Hodnoty rychlosti proudění byly také zaznamenávány pomocí CTA anemometru. Na Obrázku 38 jsou porovnány tyto hodnoty s hodnotami získanými z Prantlovy sondy a to v horizontálním řezu dýzou ve vzdálenosti 200 mm od spodní hrany. Rozdíl mezi těmito hodnotami může být způsobený nedostatečnou kalibrací CTA anemometru.



Obrázek 38: Rychlostí profil v horizontálním řezu ve vzdálenosti 200 mm od spodní hrany dýzy

6 Závěr

V rámci této bakalářské práce byla zpracována rešerše týkající se konstrukce aerodynamických tunelů, která může být buď s otevřeným nebo uzavřeným okruhem. Použití aerodynamického tunelu s uzavřeným okruhem je běžnější, především díky nižším provozním nákladům, i když jejich výstavba je nákladnější. Byly zde popsány nejdůležitější části aerodynamických tunelů a také prvky, které slouží ke snížení turbulentních vírů v měřicím prostoru. Jedná se především o voštiny a síta, umístěná před dýzou. Všechny části tunelů jsou konstruovány za účelem vyrovnaného rychlostního profilu a nízké, či přesně definované hodnoty intenzity turbulence v měřicím prostoru. Další část této práce byla věnována proudění, to může být buď laminární, turbulentní nebo přechodové. Tato část se dále věnovala popisu turbulence a turbulentnímu proudění, které vzniká ztrátou stability laminárního proudění, je-li překročena kritická hodnota Reynoldsova čísla.

Dále se práce věnovala návrhu a popisu metod k měření rychlostního profilu a hodnoty intenzity turbulence. Pro měření rychlostního profilu byla zvolena Prandtlova sonda, ta umožňuje měřit proudění v jedné ose, ale není vhodná pro měření turbulentního proudění, ve kterém se vyskytují vysoké hodnoty fluktuace rychlosti, protože má malou vzorkovací frekvenci. Pro měření rozložení intenzity turbulence byla zvolena technologie CTA, která je založena na principu ochlazování žhaveného drátku proudícím vzduchem, a je vhodná pro měření turbulentního proudění, protože poskytuje rychlé odezvy na změny rychlosti.

V experimentální části byl změřen rychlostní profil a rozložení intenzity turbulence na výstupu z dýzy u cirkulačního aerodynamického tunelu umístěného v laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky. Jedná se o tunel s měřicím prostorem velkým 950 mm x 450 mm a dlouhým 1200 mm. V experimentu bylo uvažováno nestlačitelné a pouze jednosměrné proudění. Objemový průtok vzduchu v aerodynamickém tunelu byl generován axiálním ventilátorem, rychlost jeho otáčení byla řízena frekvenčním měničem, jehož hodnota byla v experimentu nastavena na 35 Hz, což přibližně odpovídá rychlosti 35 m/s. V rámci této práce bylo také postaveno traverzovací zařízení, které sloužilo k manipulaci sond v měřicím prostoru, a bude se i nadále využívat k experimentům u tohoto aerodynamického tunelu.

Intenzita turbulence dosahovala v měřicím prostoru hodnot 0,8 – 1,7 %. V těsné blízkosti stěn dýzy byla dle očekávání tato hodnota vyšší a to 1,7 – 3,5 %. Při pohledu na rozložení intenzity turbulence v horizontálních řezech na Obrázku 35 můžeme v pravé části dýzy vidět i hodnoty intenzity turbulence dosahující nejnižší hodnoty až 0,8 %. Mírný nárůst hodnot intenzit turbulence uprostřed výstupu z dýzy, může být způsoben konstrukcí sít před dýzou, které jsou za účelem pevnosti vyztuženy křížem z ploché oceli generující větší turbulenci.

Rychlostní profil se v horizontálních řezech přibližně středem dýzy jeví jako vyrovnaný. Na ostatních horizontálních řezech můžeme vidět, že se rychlosti u stěn naopak zvyšují, to může být způsobeno nevhodným návrhem dýzy, kde pravděpodobně dochází k příliš velkému urychlení proudu podél bočních stěn dýzy.

Na Obrázku 38 můžeme vidět porovnání hodnot rychlosti proudění získaných z Prandtlovy sondy a metodou CTA. Rozdíly v těchto hodnotách mohou být způsobeny vyšší citlivostí CTA anemometru na fluktuace rychlosti a také malým počtem kalibračních bodů při kalibraci CTA anemometru.

7 Seznam použité literatury

1. Aerodynamika: Aerodynamické tunely. [Online] [Citace: 6. 20 2022.] <http://historieletectvi.xf.cz/aerodynamika.htm#Tunely>.
2. VTM. 2015. [online]. [cit. 6. 5. 2022]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/clanek/kdy-byl-postaven-prvni-tunel>.
3. KATZ, J. *Race car aerodynamics: designing for speed*. místo neznámé : Bentley Publishers, 2006. ISBN 0-8376-0142-8.
4. Zhang, Yuxiang. Researchgate. [Online] [Citace: 7. 6 2022.] https://www.researchgate.net/figure/Layout-of-the-closed-circuit-wind-tunnel_fig2_349213941.
5. VŠEVĚD. *Encyklopedie v pohybu*. [Online] [Citace: 5. 7 2022.] <https://encyklopedie.vseved.cz/aerodynamick%c3%bd+tunel>.
6. CEJPEK, Ondřej. Návrh a realizace aerodynamického tunelu pro rozstříkovací trysky [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124871>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
7. KOLÁŘ, Jan. Návrh a optimalizace ejektoru pro nadzvukový aerodynamický tunel. [Online] [Citace: 27. 4 2022.] https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/148285/V_06907_S.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.
8. Cattafesta, Louis & Bahr, Christopher & Mathew, Jose. *Fundamentals of Wind-Tunnel Design*. [Online] 2010. https://www.researchgate.net/publication/230271809_Fundamentals_of_Wind-Tunnel_Design/citation/download.
9. DIMITRIADIS. G. *Experimental Aerodynamics: Wind tunnel tests on road vehicles*. [Online] <http://www.ltas-aea.ulg.ac.be/cms/uploads/Expaero02.pdf>.
10. DIMITRIADIS. G. *Experimental Aerodynamics: Introduction*. [Online] [Citace: 2022. 6 17.] <http://www.ltas-aea.ulg.ac.be/cms/uploads/Expaero01.pdf>.

11. Doc. Jan Citavý, DrSc., Prof. Ing. Jiří Nožička, CSc. *Proudění vazkých tekutin- Tenké smykové vrstvy*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03037-7.
12. 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.
13. Advanced thermal solutions. [Online] 2007. [Citace: 5. 5 2022.] https://www.mouser.com/catalog/additional/ATS_Qpedia_Dec07_Understanding%20hot%20wire%20anemometry9.pdf.
14. Jørgensen, Finn E. *How to measure turbulence with hot-wire anemometers*. místo neznámé : DANTEC DYNAMICS, 2002.
15. Janalík, Jaroslav. *Měření turbulentních fluktuací rychlosti*. Ostrava : autor neznámý, 2006.
16. AUTOMA. [Online] [Citace: 7. 6 2022.] https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/prandtlovou-trubici-je-mozne-merit-i-male-rychlosti-proudeni-2003_08_28914_2752/.
17. Ortega, Cristina Benéitez. [Online] Pitot-Static-tube-working-principle. [Citace: 20. 6 2022.] <https://www.researchgate.net>.
18. NASA. [Online] [Citace: 4. 5 2022.] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/pitot.html>.
19. Dantec Dynamics. [Online] [Citace: 15. 6 2022.] <https://www.dantecdynamics.com>.
20. PROFESS. [Online] [Citace: 14. 5 2022.] https://www.profess.cz/cs/pci/odporove_snimace_tepoty.

8 Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Zařízení, na kterém byly zkoumány aerodynamické vlastnosti [1]	11
Obrázek 2: První aerodynamický tunel [2]	12
Obrázek 3: Aerodynamický tunel s otevřeným okruhem [4]	13
Obrázek 4: Schéma aerodynamického tunelu s uzavřeným okruhem [4]	14
Obrázek 5: Uzavřený tunel s ejektorovým pohonem [1]	15
Obrázek 6: Voština [6]	17
Obrázek 7: Síto pro snížení podélných výkyvů rychlosti [6]	18
Obrázek 8: Typy měřičích prostorů [9]	19
Obrázek 9: Křivky zatížení aerodynamického tunelu [8]	20
Obrázek 10: Reynoldsův pokus [11]	21
Obrázek 11: Rychlost při laminárním a turbulentním proudění [11]	22
Obrázek 12: Sonda se žhaveným drátkem [15]	26
Obrázek 13: Wheatstoneův můstek [13]	27
Obrázek 14: Závislost $U = f(c)$ [15]	29
Obrázek 15: Drátková sonda Dantec [15]	30
Obrázek 16: Pozlacená sonda Dantec [15]	31
Obrázek 17: Filmová sonda Dantec [15]	32
Obrázek 18: Vícerozměrné CTA sondy [14]	33
Obrázek 19: Princip Prandtlovy sondy (17)	33
Obrázek 20: počátky stavby manipulátoru	37
Obrázek 21: Jezdec	37

Obrázek 22: Průběh stavby manipulátoru	38
Obrázek 23: Konstrukce před připevněním krokových motorů.....	38
Obrázek 24: Připevnění motoru pro svislý posuv	39
Obrázek 25: Sonda typ 55R01	41
Obrázek 26: Nastavení přehřívání drátku Dantec	43
Obrázek 27: Závislost rychlosti proudění na frekvenci	44
Obrázek 28: Závislost napětí na rychlosti proudění	44
Obrázek 29: Měřicí body.....	45
Obrázek 30: Držák se sondami.....	46
Obrázek 31: Pohled na měřicí pracoviště	46
Obrázek 32: Rychlostní profil v horizontálních řezech dýzou.....	49
Obrázek 33: Rychlostní profil v horizontální rovině ve vzdálenosti 200 mm od spodní hrany	49
Obrázek 34: Rychlostní profil ve vertikální rovině ve vzdálenosti 450 mm od levé hrany	50
Obrázek 35: Rozložení intenzity turbulence v horizontálních řezech dýzou... 50	
Obrázek 36: Rozložení intenzity turbulence v horizontální rovině ve vzdálenosti 200 mm od spodní hrany	51
Obrázek 37: Rozložení intenzity turbulence ve vertikální rovině ve vzdálenosti 450 mm od levé hrany.....	51
Obrázek 38: Rychlostí profil v horizontálním řezu ve vzdálenosti 200 mm od spodní hrany dýzy	52

9 Seznam použitých veličin

značka	rozměr	název
\bar{c}	$m \cdot s^{-1}$	Časová střední rychlost
\vec{c}, c	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost
c'	$m \cdot s^{-1}$	Fluktuace rychlosti
a	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost zvuku
t	s	čas
Q	J	Teplo
I	A	Elektrický proud
U	V	Elektrické napětí
α	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla
d	m	průměr
l	m	délka
R	Ω	Elektrický odpor
T	K	Teplota
Nu	-	Nusseltovo číslo
Pr	-	Prandtlovo číslo
Re	-	Reynoldsovo číslo
Ma	-	Machovo číslo
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti
ν	$m^2 \cdot s$	Kinematická viskozita
p	Pa	Tlak
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	Hustota
v	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem
r	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Měrná plynová konstanta
γ	-	Poisonovo číslo
η	$Pa \cdot s^{-1}$	Dynamická viskozita