



Měření součinitele přestupu tepla při impaktním proudění

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Josef Kubálek

Vedoucí práce:

prof. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.
Katedra energetických zařízení





Zadání bakalářské práce

Měření součinitele přestupu tepla při impaktním proudění

Jméno a příjmení: **Josef Kubálek**
Osobní číslo: S16000103
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávací katedra: Katedra energetických zařízení
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

Množství technologií je dnes závislých na konvektivním ohřevu. Jednou z nejintenzivnějších metod ohřevu je využití impaktního proudu tekutiny. Cílem práce je navrhnout algoritmus vyhodnocení dat získaných při měření součinitele přestupu tepla na stávajícím experimentálním zařízení. Pro práci bude nutné osvojení si základů měření rychlosti a přestupu tepla termoanemometrickými metodami. Práci by měla odpovídat následující struktura: 1. Rešerše prací, které se zabývají zvolenou problematikou 2. Rozbor úlohy, popis experimentu 3. Návrh algoritmu pro vyhodnocení dat. 4. Provedení zkušebního experimentu a vyhodnocení výsledků. 5. Analýza a diskuse výsledků.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

cca 15 stran
cca 35 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

Rieger, F., Šesták, J.: Přenos hybnosti, tepla a hmoty, 1996, Vydavatelství ČVUT Praha Bruun, H.H.:
Hot-wire anemometry: principles and signal analysis, Oxford University Press, 1995 TU Liberec, KEZ:
Technické zprávy 2012-2014

Vedoucí práce:

prof. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce:

1. listopadu 2019

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

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

V Liberci dne 14. února 2020

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

15. července 2020

Josef Kubálek

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat rodině a blízkým za podporu po celou délku studia a všem, kteří mi pomáhali při vzniku této práce, především vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Tomáši Vítovi, Ph.D. a konzultantce doc. Ing. Petře Dančové, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné vedení při tvorbě bakalářské práce.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá měřením součinitele tepla a rychlosti při impaktním proudění. Měření probíhalo ve vzduchu přiváděném pomocí štěrbinové trysky. Pro měření rychlosti a součinitele přestupu tepla byla použita metoda CT anemometrie.

Klíčová slova: anemometrie, impaktní proudění, součinitel přestupu tepla

Annotation

The bachelor thesis deals with measuring the heat transfer coefficient and velocity by the impacted flow. The measurements were performed in air using continual jet. For velocity and heat transfer coefficient measurements was used CT thermoanemometry method.

Keywords: anemometry, heat transfer coefficient, impact flow

Obsah

Úvod	10
1 Přestup tepla.....	11
1.1 Impaktní proudění	11
1.2 Typy proudění tekutin	12
1.3 Tepelná konvekce.....	13
1.3.1 Volná konvekce	13
1.3.2 Nucená konvekce	13
1.4 Fyzikální vlastnosti tekutin.....	13
1.5 Součinitel přestupu tepla	14
1.6 Podobnostní čísla	15
2 Měření rychlosti a přestupu tepla.....	16
2.1 HWA	16
2.2 CTA.....	17
2.3 CCA.....	18
2.4 HFA.....	19
2.5 Metody měření přestupu tepla	19
2.5.1 Filmové sensory	20
2.5.2 Sublimace naftalenu	21
2.5.3 Infračervená termografie	21
2.6 Metodika vyhodnocování součinitele přestupu tepla.....	22
3 Rozbor úlohy a navrhnutí experimentu	24
3.1 Měření rychlosti	24
3.1.1 Rozbor úlohy	25
3.1.2 Popis sensoru	26
3.1.3 Kalibrace.....	26
3.1.4 Výpočet rychlosti proudění	27
3.2 Měření součinitele přestupu tepla	28
3.2.1 Rozbor úlohy	28
3.2.2 Popis sondy	30
4 Výsledky experimentů.....	31
4.1 Měření rychlosti	31
4.2 Výpočet součinitele přestupu tepla	34

Závěr.....	38
Bibliografie	39

Veličiny

a	$(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	Teplotní vodivost
U	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Rychlost
D	(m)	Průměr trysky
g	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	Gravitační zrychlení
\dot{q}	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	Plošná hustota tepelného toku
\dot{Q}	(W)	Tepelný tok
l	(m)	Charakteristický rozměr
T	(K)	Teplota
t	(s)	Čas
A	(m^2)	Plocha
I	(A)	Elektrický proud
E	(V)	Elektrické napětí
p	(W)	Příkon
f	(Hz)	Frekvence
α	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	Součinitel přestupu tepla
τ	(Pa)	Tečné napětí
μ	$(\text{Pa} \cdot \text{s})$	Dynamická viskozita
λ	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Součinitel tepelné vodivosti
ν	$(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	Kinematická viskozita
γ	(K^{-1})	Teplotní objemová roztažnost
Re	(1)	Reynoldsovo číslo
Gr	(1)	Grashofovo číslo
Pr	(1)	Prandtlovo číslo
Nu	(1)	Nusseltovo číslo
R	(Ω)	Elektrický odpor

Úvod

Bakalářská práce se zabývá přestupem tepla pomocí impaktního proudění, které se používá při ohřevu, chlazení nebo sušení v různých průmyslových odvětvích. V současnosti se začínají objevovat další způsoby jeho uplatnění především v elektronice. Je to jeden z nejefektivnějších způsobů přenosu tepla.

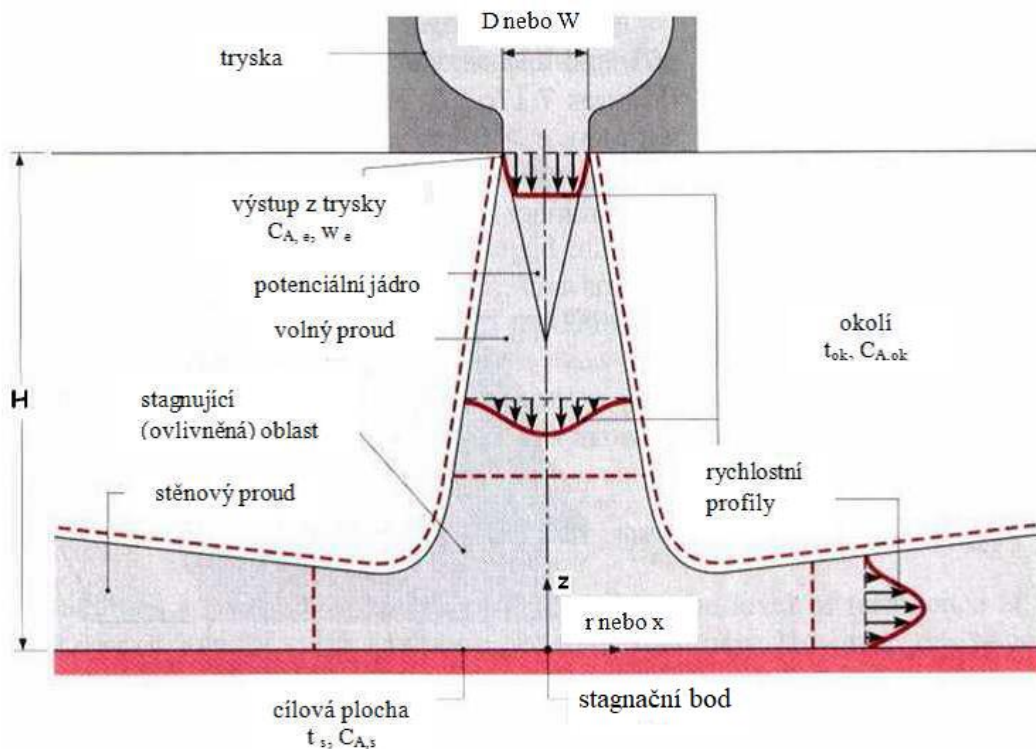
Cílem bakalářské práce je připravit experiment na měření rychlosti proudění a vytvořit algoritmus, který využijeme na vyhodnocení dat, které naměříme, a dále na vyhodnocení součinitele přestupu tepla, pro který jsme hodnoty obdrželi. Tryska je upevněna tak, aby proud dopadal kolmo na tenkofilmovou sondu, která je připevněna na zahřívané desce, a na drátkovou sondu, která je připevněna k držáku a na ní se měří rychlost. Dále se musí vyhodnotit výsledky měření v různých vzdálenostech od středu do směrů osy x a y . Pro měření součinitele přestupu tepla a rychlosti byla použita metoda anemometrie CT. Výsledky měření budou zpracovány v tabulkách a vyhodnoceny pomocí grafů.

1 Přestup tepla

Přestup tepla je jeden z možných způsobů vedení tepla, při kterém dochází na rozhraní dvou látek v mezní vrstvě k tepelnému přenosu. V následujících kapitolách je popsáno, jak přestup tepla probíhá v různých podmínkách a jak ho lze charakterizovat.

1.1 Impaktní proudění

Impaktní proudění popisujeme jako proudění jednoho, popřípadě více paprsků kapaliny na povrch pevné nebo poddajné stěny. Využití nachází zejména v chlazení, ohřevu či sušení různých ploch. Využívá se především díky tomu, že na mezifázovém rozhraní je dosahováno vysokých hodnot přestupu tepla a hmoty. Na obr. 1.1 můžeme vidět, že z kruhové trysky o průměru D vystupuje proud tekutiny, který má rovnoměrný rychlostní profil. Se zvětšující se vzdáleností od výstupu z trysky se potenciální jádro, kde je udržována rovnoměrná výstupní rychlost proudu, zmenšuje. Rychlost kolmo na stěnu se zpomaluje, pro stagnační bod je rychlost nulová a zároveň se rychlost tekutiny obtékající stěnu zvyšuje. Po opuštění stagnující oblasti se rychlost tekutiny obtékající stěnu snižuje.



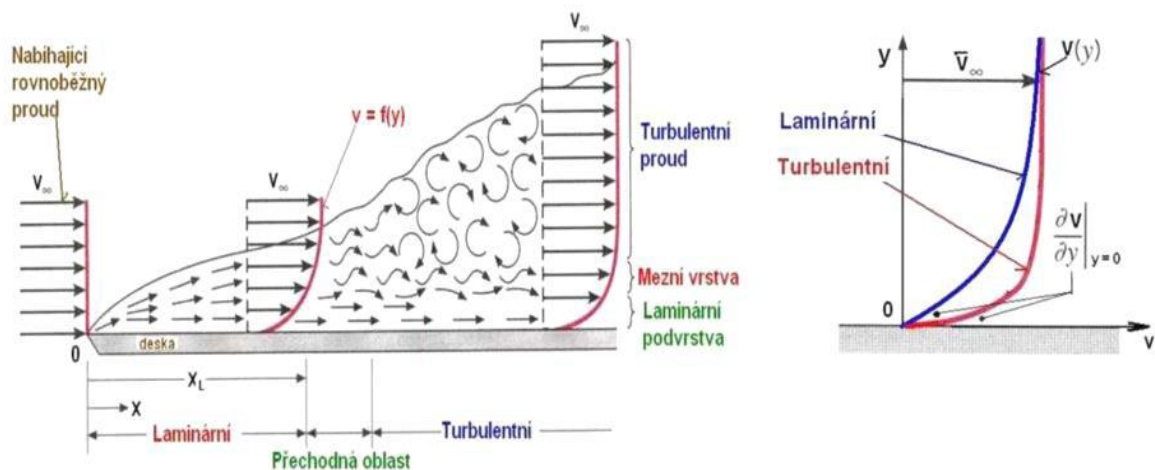
Obr. 1.1 – Impaktní proudění z trysky na plochu [1]

1.2 Typy proudění tekutin

Jednou z nejdůležitějších vlastností proudění je jeho stav ve smykové oblasti. Jelikož uvažujeme vazkost kapaliny, dělíme ho na dvě základní skupiny, a to na laminární a turbulentní proudění. Laminární proudění je charakterizováno proudnicemi, které jsou uspořádané a jednotlivé částice se deformují pouze podle příčného gradientu rychlosti. Jelikož má toto proudění konstantní viskozitu, platí pro něj Newtonův zákon pro tečná napětí:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dc_x}{dy} \quad (1.2)$$

Kde τ je tečné napětí v tekutině (Pa), μ je dynamická viskozita a dc_x ku dy je rychlostní gradient tekutiny. Pokud pracujeme s Newtonovskými tekutinami, tak je viskozita konstantní. U turbulentního proudění se proudnice prolínají mezi sebou. U laminárního proudění je dán efekt tření hlavně normálovým rychlostním gradientem, přičemž u turbulentního proudění je tření způsobeno převážně sdílením hybnosti mezi makročásticemi, případně turbulentními shluky či vrstvami. To je hlavním důvodem rozdílných rychlostních profilů těchto proudění. Pro každý případ proudění existuje kritická hodnota Reynoldsova čísla Re_k , při které už proudění mění svůj charakter, například z laminárního na přechodové a dále na turbulentní proudění.



Obr. 1.2 – Rozdělení proudění [5]

1.3 Tepelná konvekce

Tepelná konvekce je jednou z metod šíření tepla, která spočívá v tepelné výměně mezi dvěma tělesy s různou teplotou. Pro přenos tepla musí být mezi povrchem kontrolního objemu tekutiny a prostředím dosaženo relativního pohybu. V některých případech mohou oba druhy konvekce, jak volná, tak nucená konvekce, probíhat zároveň. Poté záleží především na tom, jak velký je rychlostní rozdíl mezi jednotlivými prouděními. Konvekce v praxi nejčastěji probíhá mezi povrchem tuhého tělesa a proudem tekutiny.

1.3.1 Volná konvekce

Přirozená neboli volná konvekce vzniká v případě, kdy je rozdílná hustota (měrná hmotnost) molekul v tekutinách. Například pokud je voda o dané teplotě T_1 ve styku s vertikální stěnou o teplotě T_2 , ale jedna z těchto teplot je větší, bude vznikat volná konvekce. Hlavní parametry vzniku tohoto proudění závisí na gradientu hustoty a na velikosti prostoru, ve kterém se konvekce uskutečňuje.

1.3.2 Nucená konvekce

Nucená konvekce je druh proudění, který je podmíněn působením vnějších účinků. Mezi přírodní činitele patří třeba vítr a mezi lidské patří turbíny, ventilátory či čerpadla. Pro výpočet nucené konvekce je nutno znát celou řadu faktorů. Závisí především na geometrickém uspořádání kanálu, fyzikálních vlastnostech tekutiny, na rychlosti proudění a na teplotě kapaliny.

Nucená konvekce v turbulentním režimu proudění se řeší jiným způsobem než pro proudění laminární. Přenos hybnosti a tepla má v laminární oblasti převážně molekulární charakter. Pokud Re dosahuje hodnot vyšších než Re kritických, tak se na molekulární mechanismus superponuje mechanismus turbulentní, který hodnoty součinitele přenosu tepla zvyšuje.

1.4 Fyzikální vlastnosti tekutin

Pokud pracujeme s médiem, kterým je tekutina, tak potřebujeme znát její vlastnosti, abychom mohli popsat průběh proudění. Pro různé druhy tekutin

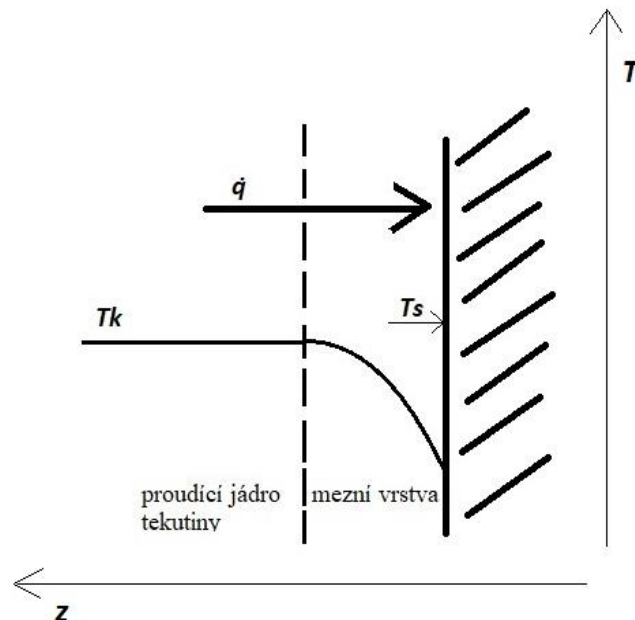
se intenzita přestupu tepla liší v závislosti na jejich hustotě (měrném objemu), tepelné vodivosti a viskozitě.

1.5 Součinitel přestupu tepla

Přenos tepla konvekcí probíhá v teplotní mezní vrstvě. Pro řešení přestupu tepla a zjišťování součinitele přestupu tepla se nejvíce využívá Newtonův ochlazovací zákon:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_K - T_S), \quad (1.5)$$

kde viz. Obr. 1.5 je T_S teplota stěny a T_K teplota kapaliny. Dále je pak ve vzorci α , což je součinitel přestupu tepla. Jelikož ho nelze nikterak odvodit, zjišťuje se prostřednictvím experimentů, kde se s pomocí modelu výsledky aplikují na skutečný případ. Při jeho zjišťování se vychází z fyzikálních jevů, které jsou si podobné, a jsou popsány stejnými podobnostními parametry a matematicky vyjádřeny rovnicemi stejného tvaru a obsahu. V závislosti na typu podobnosti se používají podobnostní čísla pro výpočet součinitele přestupu tepla. Funkční závislost mezi podobnostními parametry je popsána kritériální rovnicí v závislosti na jednotlivém případě. Součinitel přestupu tepla je závislý na vícero proměnných, například na viskozitě, typu konvekce, typu proudění, jednofázovém či vícefázovém proudění, na tvaru obtékané plochy atd.



Obr. 1.5 – Přestup tepla, svislá stěna

1.6 Podobnostní čísla

Podobnostní čísla charakterizují fyzikální a geometrické podobnosti příslušných jevů a jsou bezrozměrná. V závislosti na druhu podobnosti se poté definují různá podobnostní čísla. Pro hydrodynamickou podobnost se používá pro případ nucené konvekce Reynoldsovo číslo – Re ,

$$Re = \frac{u \cdot l}{\nu} \quad (2.1)$$

a pro volnou konvekci Grashofovo číslo – Gr ,

$$Gr = \frac{\gamma \cdot g \cdot l^3 \cdot (T_s - T_k)}{\nu^2}. \quad (2.2)$$

Reynoldsovo číslo srovnává setrvačné a třecí síly. Grashofovo číslo srovnává podobnost při volném proudění, dále pak setrvačné, třecí a vztlakové síly. Termokinetická podobnost, která je pro sdílení tepla, se vyjadřuje pomocí Prandtlova čísla – Pr ,

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (2.3)$$

a Nusseltova čísla – Nu

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}. \quad (2.4)$$

Prandtlovo číslo vyjadřuje podobnost fyzikálních vlastností proudící tekutiny, kdežto Nusseltovo přenos tepla kondukcí a konvekcí v termokinetické mezní vrstvě.

Tyto čísla se používají v kritériálních rovnicích, kde se používají jejich funkční závislosti, například pro nucenou konvekci se používá Re , Pr , Nu v rovnici:

$$Nu = Nu(Re, Pr). \quad (2.5)$$

Kritériální rovnice pro volnou konvekci závisí na číslech Gr , Pr , Nu a jejich závislost je:

$$Nu = Nu(Gr, Pr). \quad (2.6)$$

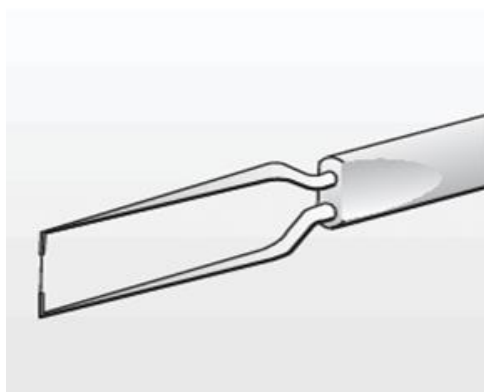
2 Měření rychlosti a přestupu tepla

Měření přestupu tepla spolu s rychlostí proudění je jedním z parametrů, který přímo ovlivňuje podmínky pro chlazení nebo ohřev dané plochy. Pokud známe teplotu tekutiny a povrchu, můžeme poté měřením získat součinitel přestupu tepla. Existuje několik metod a způsobů měření.

2.1 HWA

Tento druh anemometrie se ideálně využívá jako nástroj pro měření rychlostních fluktuací v časovém úseku turbulentního proudění. Měří okamžitou rychlost a teplotu v určitém bodě proudu tekutiny. Metoda HWA funguje na základě konvekčního přenosu tepla z vyhřívaného snímacího prvku (sonda), který má určitý teplotní koeficient odporu. [3,4]

Sonda je převážně vyráběna z wolframu a je potažená tenkou vrstvou platiny. Pro výjimečné případy, jako například vysoké teploty, se upřednostňují slitiny platiny a iridia. Existuje několik variant sond, avšak abychom mohli zaznamenávat informace o velikosti a směru rychlosti, musí mít sonda nejméně jeden sensor (drátek). Podle počtu drátů sondy jsme pak schopni zjišťovat více informací. Sonda se tedy volí podle toho, jaké máme proudění. Pro jednodimenzionální proudění, viz. Obr. 2.1, má sonda jeden drátek, dvoudimenzionální dva drátky a trojdimenzionální tři drátky. [3,4]



Obr. 2.1 – Jednodrátková sonda [6]

Jsou dva základní módy nastavení HWA. V prvním případě se proud v drátce udržuje konstantní. Změny v odporu drátce způsobené prouděním jsou měřeny monitorováním změny úbytku napětí napříč vláknem. Tento režim nastavení se nazývá

CC (Constant Current). V druhém případě se teplota i s odporem drátu udržují konstantní pomocí servo zesilovače. Signál, který se měří, když nastane změna v rychlosti proudění, se projeví změnou proudu, který se přivádí na sensor. Tento režim má název CT (Constant Temperature). [3]

2.2 CTA

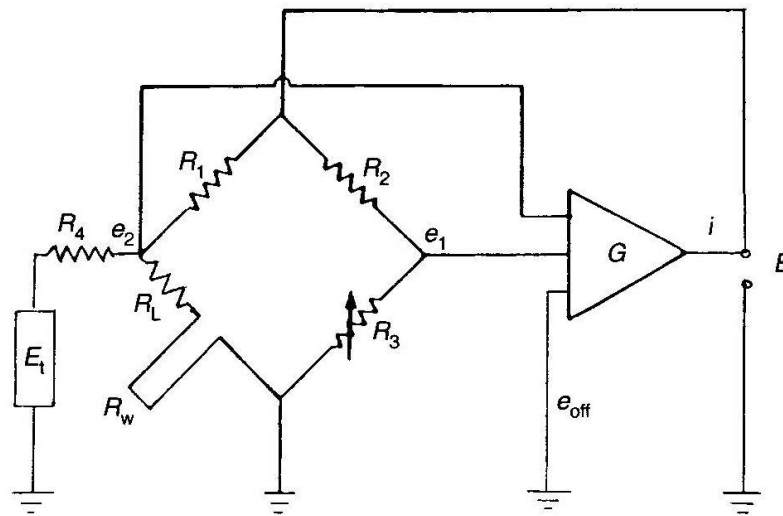
Zkratka Constant Temperature Anemometer vychází z principu použití tohoto anemometru, kdy se drátky zahřívají na určitou (konstantní) teplotu. Je jednou z nejvíce využívaných metod měření, především kvůli vysokofrekvenční odezvě, odolnosti vůči vyhoření při náhlém zastavení nebo zmenšení proudu tekutiny a jejich kompatibilitou s různými druhy nalepovacích filmů (HFA). Jedná se o přístroj, který se využívá pro měření rychlosti v tekutinách, zejména pro měření turbulentních fluktuací rychlosti proudění. Anemometr konvekčně přenáší teplo ze zahřívané sondy do tekutiny okolo, přičemž přestup tepla závisí především na rychlosti tekutiny. Díky použití velmi tenkých drátkových čidel, které jsou v tekutině, a elektronice se zpětnovazební smyčkou, je možné měřit fluktuace rychlosti malého měřítka turbulence a vysokých frekvencí. [7]

Pro nastavení přezhavení se musí nadefinovat pracovní teplota snímače, se kterou chceme pracovat. Odpor přezhavení (dekádový odpor) v pravé větvi můstku je nastaven tak, že v okamžiku, kdy se můstek přepne do režimu operace, bude mít snímač požadovanou pracovní teplotu. [7]

Kalibrace nachází vztah mezi výstupem CTA a rychlostí proudění prostřednictvím toho, že je sonda vystavena sérii známých rychlostí U , a během toho registruje výstupní napětí E . Křivka proložená body E a U představuje přenosovou funkci, která se využívá pro převod dat z napětí na rychlost. Kalibraci lze provést speciálním kalibrátorem, nebo také v aerodynamickém tunelu za současného použití např. Pitotovy sondy jako reference. Při kalibraci je potřeba zaznamenávat i teplotu, jelikož se teplota mezi kalibrací a měřením může měnit. Pokud se tak děje, je nutné korigovat CTA data za změny teploty. [7]

Na Obr. 2.2 je drátek s odporem R_w připojený na jednu z větví Wheatsonova můstku a je zahříván elektrickým proudem. Servo zesilovač udržuje můstek

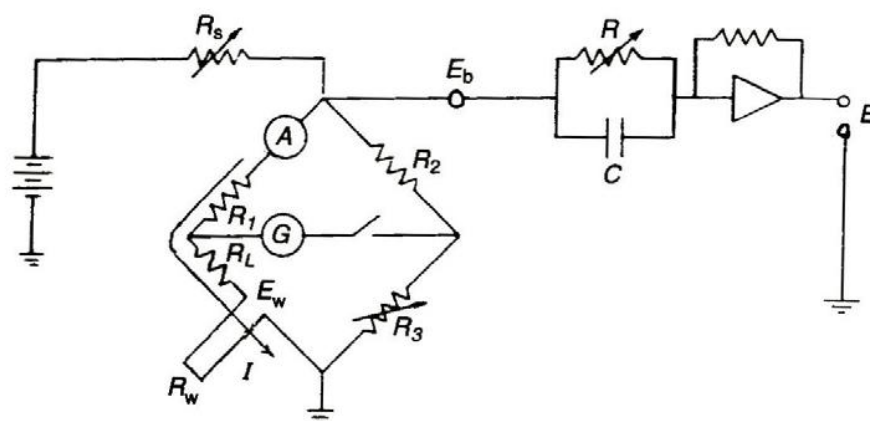
v rovnováze tak, aby odpor, a tím zároveň teplota, byla konstantní, nezávislá na ochlazování tekutinou.



Obr. 2.2 – Wheatsonův můstek pro CTA [2]

2.3 CCA

Principem Constant Current Anemometry a rozdílem oproti CTA je, že proud proudící senzorem je udržován konstantní. Jak již z názvu plyne, přístroj se kalibruje na konstantní teplotu a používá se v režimu konstantního proudu. To je jednou z jeho nevýhod, jelikož při konstantním proudu může být drátek zničen, pokud bude rychlost proudění velmi malá. Používá se především na měření teploty. [2]

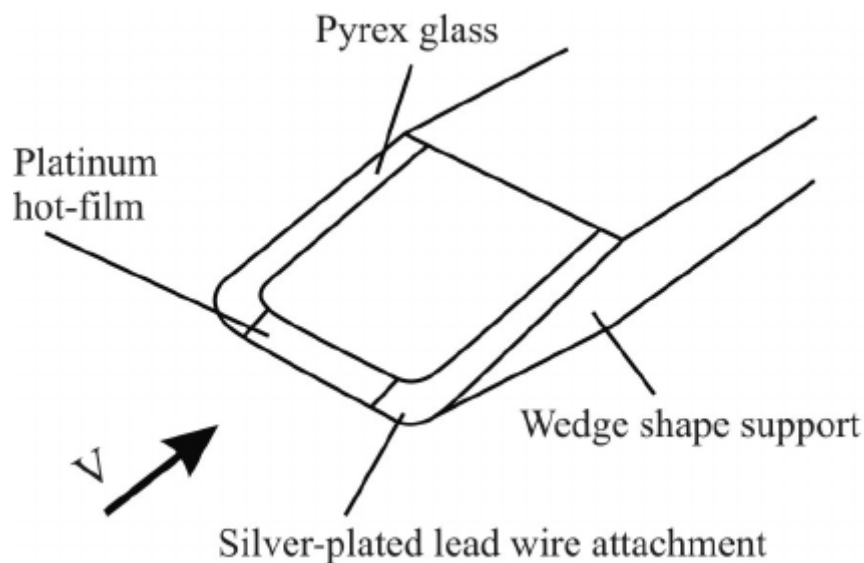


Obr. 2.3 – Wheatsonův můstek pro CCA [2]

2.4 HFA

Hot Film Anemometry je druhem HWA využívající jako sensor vodivý film, který může být uložený v keramickém nebo křemenovém podkladu. Nejčastěji se používá křemíková tyč potažená platinovým filmem, viz. Obr. 2.4. V porovnání se základní HWA, kde je jen drátek, má tento sensor výhody především v tom, že je méně náchylný na zachytávání nečistot na povrchu sondy a lépe se čistí. Jeho dvojitá struktura dělá frekvenční charakteristiku více komplexní. Díky stálosti se tento typ sensorů používá na mnoho měření, které by byly jinak velmi obtížné měřit s více náchylnými a méně stabilními horkými dráty. [2]

Filmy mohou být různě umístěny, buď jako sonda umístěná v proudu tekutiny, nebo umístěn přímo na povrchu, na který proud směřuje. Jsou i různé úpravy a varianty těchto sond, například Glue-on film sondy, které jsou zapuštěné a sensor je uložen na fólii. Je připojen k pozlaceným elektrodovým oblastem. Využívá se zejména pro měření přechodových bodů a v pro nás zajímavých bodech se lepí přímo na povrch stěny.



Obr. 2.4 – HFA sensor [9]

2.5 Metody měření přestupu tepla

Pro přestup tepla se dají využít i další metody, především v závislosti na způsobu měření, možnosti provedení, velikosti měřené oblasti a podmínkách pro měření, vhodnosti, a nakonec finanční náročnosti. Mnoho měřících zařízení funguje

na zachycování infračervené radiace, která není okem viditelná. Ta vzniká při rozkmitu molekul, které mají teplotu větší než absolutní nula, čím větší teplota, tím větší rozkmit a větší emisivita infračerveného záření. Infračervené světlo, které se používá na měření, se dá soustředit, odrazit nebo absorbovat jako normální světelný paprsek. Například v infračervených teploměrech se nejvíce používají spojné čočky, které usměrní infračervené světlo z jednoho objektu na detektor termočlánu. Termočlánek se pak zahřívá v závislosti na velikosti infračerveného záření. Teplo se přeměňuje na elektrický proud a posílá se do detektoru, který podle toho určuje, jaká je teplota toho, na co je teploměr zaměřen. [16]

2.5.1 Filmové sensory

Používají se na měření přestupu tepla, kde každý sensor funguje jako snímač termočlánu. Tento typ sensorů pracuje na základě Fourierova zákona, kde měříme rozdíl teplot napříč známou tloušťkou materiálu, jehož konstanta konduktivity je také známa, a poté můžeme dopočítat tepelný tok \dot{Q} . Nejčastěji se jedná o 2 sensory vedle sebe, které mají různou tloušťku keramické izolace, na kterou směřuje tepelný tok. Sensory nepotřebují žádné speciální zapojení nebo úpravu signálu. Odečítání se provádí připojením sensoru k jakémukoli přímo odčítajícího stejnosměrného mikrovoltmetru nebo zapisovače. Připevňuje se přímo na povrch, který může být jak rovný, tak zakřivený, a pro efektivní odečet používá styčné spoje s velmi nízkým profilem. Nosič je polyamidový film, který je spojen pomocí laminace PFA. Čidlo má také integrovaný termočlánek pro diskrétní měření teploty potřebné k popisu tepelného toku. [8]



Obr. 2.5.1 – Tenko-filmový sensor (HFS) [11]

2.5.2 Sublimace naftalenu

Sublimace naftalenu se ukázala jako jedna z dalších excelentních metod pro zjišťování součinitele přestupu tepla. Tato metoda funguje na lokálním přestupu hmoty, kdy se hodnoty přestupu zjišťují z pozorování časových intervalů nutných pro úplnou sublimaci tenké vrstvy naftalenu z testované oblasti. Ve většině případů se používají vzduchové potrubí, skrz které lze vidět dovnitř. Díky podobnosti rovnic pro přestup tepla a hmoty se mohou aplikovat výsledky z přestupu hmoty do procesů přestupu tepla. Analogií těchto dvou veličin na základě geometrické podobnosti se došlo ke vztahu mezi Sherwoodovým a Nusseltovým číslem:

$$Nu = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^{1/4} Sh, \quad (2.6.1)$$

kde Sherwoodovo číslo popisuje proces přestupu hmoty a Nusseltovo přestupu tepla. Pro výpočet je však nutno znát několik dalších veličin, například difúzní koeficient, naftalenovou výparnost v závislosti na tlaku, hustotu naftalenu na přenosné ploše a další. [12,13]

Z výzkumů v aplikaci chlazení elektroniky bylo zjištěno, že přenos hmoty může být nastaven s lepšími okrajovými podmínkami a výsledky jsou přesnější než u některých jiných metod. Jednou z dalších výhod je, že radiace a ztráty kondukcí se nemusí připočítávat ke konečným výsledkům součinitele přestupu tepla. [12,13]

2.5.3 Infračervená termografie

Infračervená termografie je dalším ze způsobů měření teploty, zejména na místech, které jsou špatně přístupné, pokud se daný objekt pohybuje, nebo pokud nechceme měřením objekt poškodit. Infračervené detektory zachycují tepelné záření v infračervené oblasti spektra vycházející z pozorovaného objektu a převádějí ho na tepelnou hodnotu. Detektory infračerveného záření mohou být kvantové nebo termální. Liší se v tom, že kvantové přímo převádí fotony na elektrický výstup (fotoelektrický jev), kdežto termální měří teplotní růst v detektoru způsobený dopadajícím tepelným zářením. Zařízení mají velmi rychlou odezvu a jsou rozestaveny v poli tak, aby bylo možné mít dvoudimenzionální obrázek teplotních měření. [10]

Při postupu výpočtu přestupu tepla se používají termokamery pro vyhodnocování povrchové teploty a měření teploty pomocí jednoho či více termočlánků. V experimentech, kde je impaktní proudění vzduchu na vyhřívanou stěnu,

se mění odpovídající Reynoldsovo číslo a vzdálenost zdroje od stěny, aby se prozkoumal jejich vliv na měřený přenos. [15]

2.6 Metodika vyhodnocování součinitele přestupu tepla

Při měření pomocí termoanemometrie jsou surová data získána ve formě napětí měřeného na Wheatsonově můstku. Jelikož pro měření budeme používat nalepovací sondu, je třeba znát rovnici základní tepelné bilance elementu nalepovací sondy:

$$d\dot{Q}_J = d\dot{Q}_{conv} + d\dot{Q}_{cond} + d\dot{Q}_{rad} + d\dot{Q}_{ac} ,$$

kde $d\dot{Q}_J$ je teplo generované v elementu sondy, $d\dot{Q}_{conv}$ je teplo co se přeneso konvekcí do okolního prostředí, $d\dot{Q}_{cond}$ teplo odvedené do stěny (teplo odvedené ze sondy se zanedbává vzhledem k jejím rozměrům), $d\dot{Q}_{rad}$ teplo přenesené do okolí radiací (můžeme ho díky nízkému rozdílu teplot zanedbat), $d\dot{Q}_{ac}$ je akumulované teplo v sondě.[14]

Použité rovnice 2.7 až 2.13 jsou převzaté a upravené z [14].

\dot{Q}_J podle vztahu pro Joulovo teplo:

$$\dot{Q}_J = R_w \cdot I^2 , \quad (2.7)$$

kde I (A) je proud procházející sondou a R_w (Ω) je odpor sondy. I lze určit ze zapojení Wheatsonova můstku v režimu CT, viz. Obr. 2.3:

$$I = \frac{E}{R_L + R_w + R_1} . \quad (2.8)$$

Teplo přenesené konvekcí do okolí lze stanovit s ohledem na stanovení odporů v termoanemometru, tj. celkového odporu, složeného z odporu vedení a sondy R_L a R_w , a odporu Wheatsonova můstku R_1 jako:

$$\dot{Q}_{conv} = E^2 \cdot \frac{R_w}{(R_L + R_w + R_1)^2} . \quad (2.9)$$

Pro izolování vlivu syntetizovaného proudu je třeba od sebe odečíst stavy, kdy je generátor syntetizovaného proudu aktivní a kdy není sonda ochlazována proudem tekutiny:

$$\dot{Q}_{diss} = (E_{SJ}^2 - E_0^2) \cdot \frac{R_w}{(R_L + R_w + R_1)^2} , \quad (2.10)$$

kde E_{SJ} (V) je napětí naměřené na drátku sondy, když tryska pracuje, a E_0 (V) napětí, když sonda nepracuje.

Tepelný tok ($W \cdot m^{-2}$) se poté z tepelného výkonu vypočte jako:

$$q_{diss} = \frac{Q_{diss}}{1,5 \cdot A_{sensor}}, \quad (2.11)$$

kde A představuje plochu sondy a její 1,5 násobek představuje tzv. efektivní teplosměnnou plochu drátku. Hodnota 1,5 představuje kompenzaci teplosměnné plochy s ohledem na vedení tepla do zbytku sondy a materiálu stěny. [14]

Pro vypočtení Nusseltova čísla je použit vztah:

$$Nu = \frac{(q_{diss} + q_{cond}) \cdot D}{k_{air} \cdot (T_w - T_a)}, \quad (2.12)$$

kde q_{cond} ($W \cdot m^{-2}$) je tepelný tok do zahříváné stěny nebo desky, průměr výstupního otvoru kontinuální trysky D (m), k_{air} ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) je střední hodnota tepelné vodivosti vzduchu v mezní vrstvě. Součinitel přestupu tepla lze vyjádřit jako:

$$\alpha = \frac{q_{diss} + q_{cond}}{T_w - T_a}. \quad (2.13)$$

Ve vztazích (2.12) a (2.13) je ve jmenovateli teplota tekutiny T_a , což je teplota vzduchu, který je nasáván do akčního členu v případě SJ (syntetizovaný proud) a následně z něj vyfukován. V tomto případě systém pracuje pouze se vzduchem, který má stejnou teplotu jako okolí. [14]

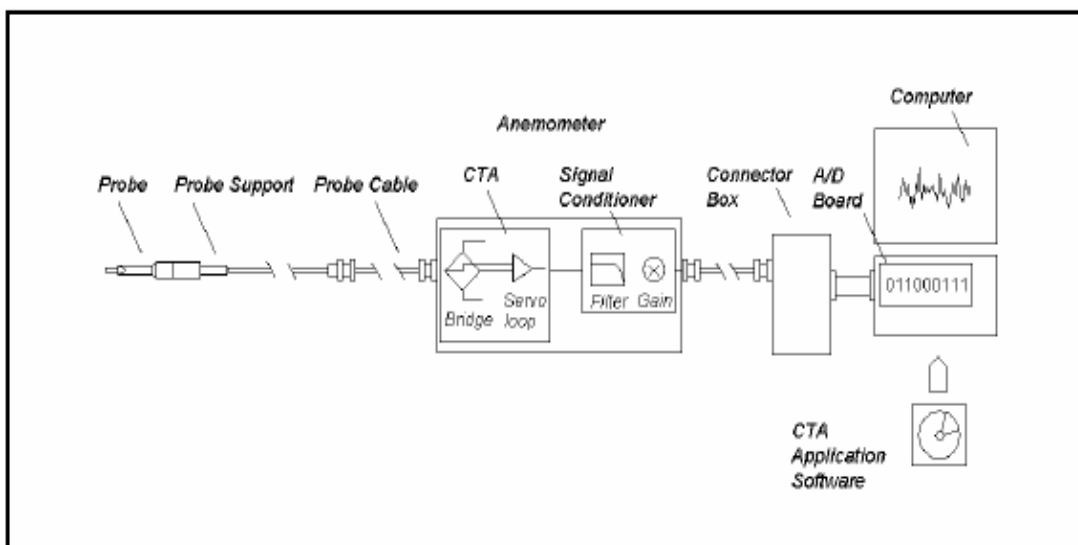
Při kontinuálním proudění vychází z trysky stlačený vzduch, který může mít rozdílnou teplotu, než je teplota okolí. To je nutné vzít v úvahu při měření a následném vyhodnocování dat. [14]

3 Rozbor úlohy a navrhnutí experimentu

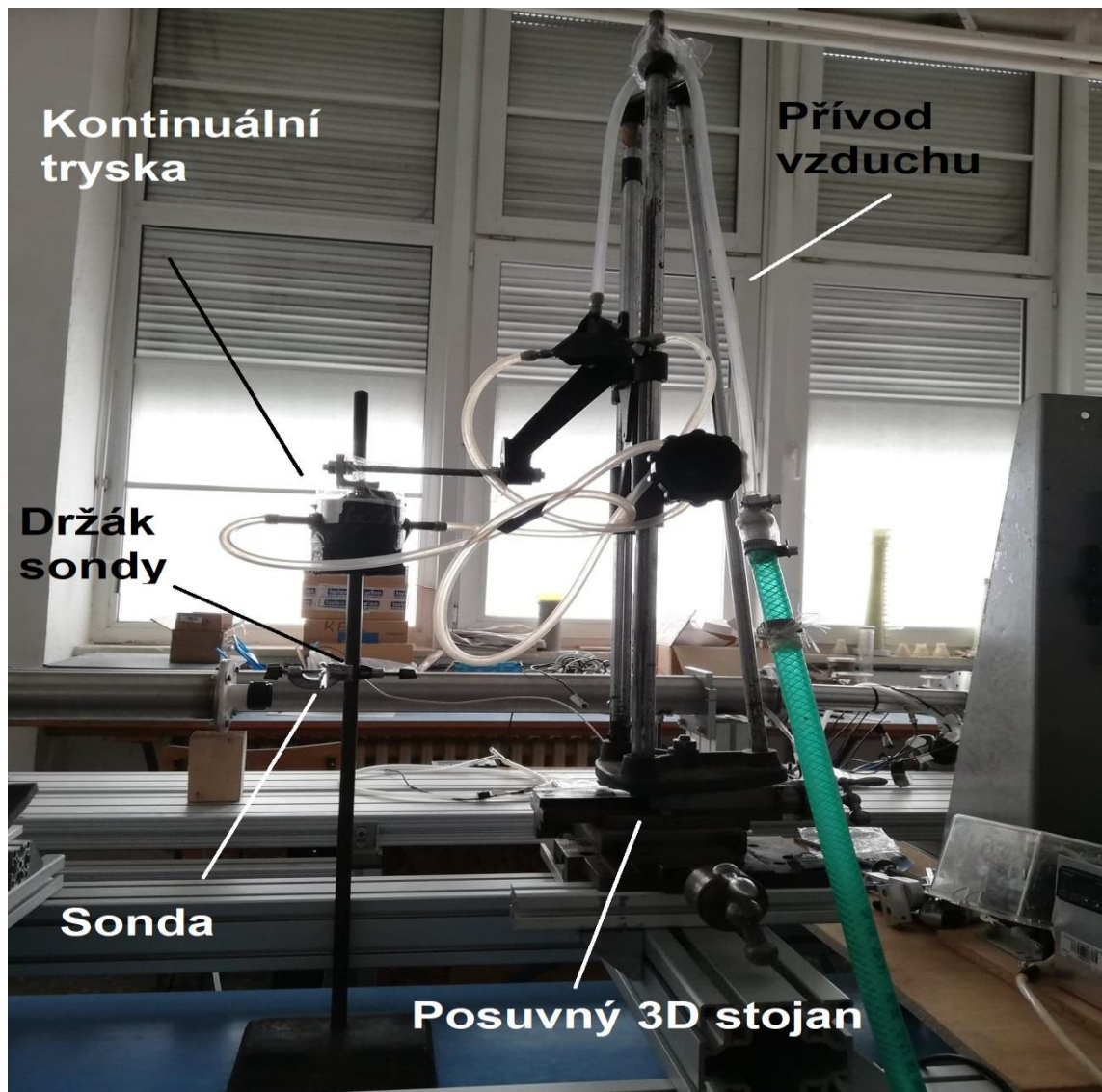
V následujících kapitolách je popsáno, jak probíhalo měření rychlosti a popis měřící aparatury. Pro měření součinitele přestupu tepla je zde popsáno experimentální zařízení a postup měření, ze kterého jsem obdržel naměřené hodnoty.

3.1 Měření rychlosti

Měření rychlosti v našem experimentu probíhalo na experimentálním zařízení, které bylo sestaveno v laboratoři KEZ. Obvod nutný pro uskutečnění měření rychlosti byl sestaven z drátkové sondy a držáku sondy, do kterého byla sonda zasunuta. Dále pak chemického stojanu, železných posunovatelných profilů a stojanu, ke kterému je přidělena tryska s přívodem vzduchu s možností nastavitelného 3D pohybu. Přístroje pro regulaci tlaku tekutiny při kalibraci zařízení, přijímače signálu, zařízení nastavení sondy a přehráti, kabely na propojení přístrojů, A/D převodníku a počítače s programem na měření dat. Konfigurace systému je na Obr. 3.1. Na Obr. 3.2 je celá sestava experimentu na měření rychlosti i s kalibračním zařízením.



Obr. 3.1 – Kompletní měřící systém [7]



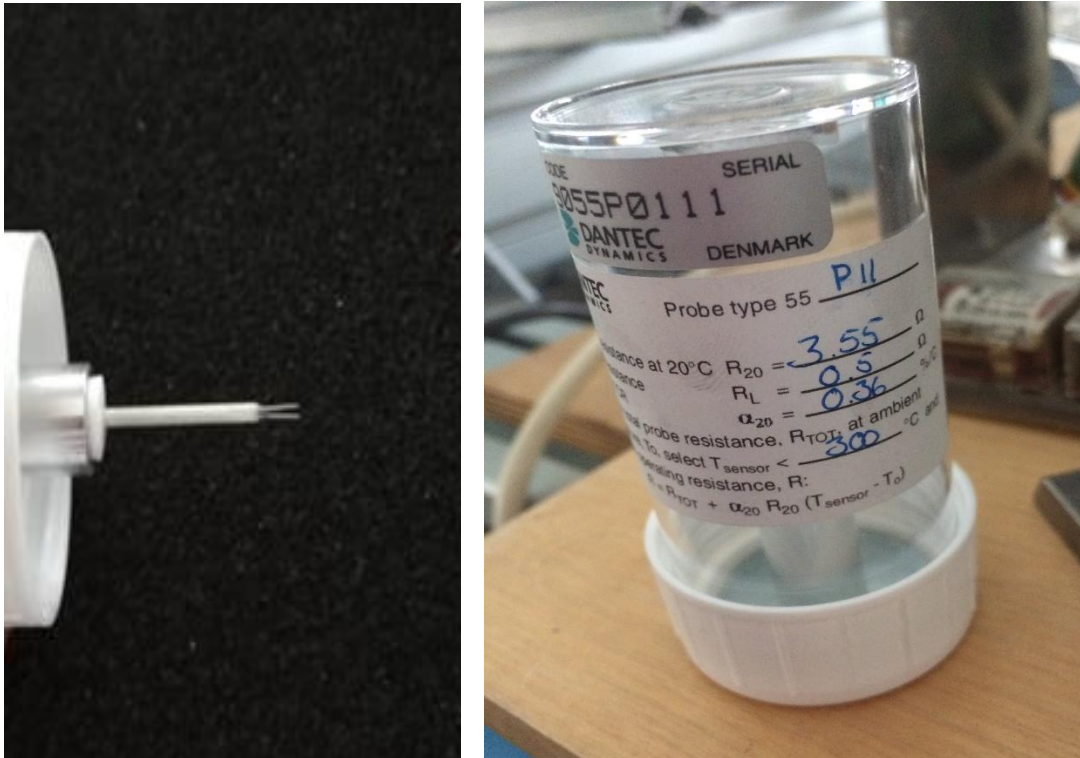
Obr. 3.2 – Sestava experimentu na měření rychlosti

3.1.1 Rozbor úlohy

Pro měření rychlosti bylo potřeba nejdříve sestavit experimentální zařízení. Po jeho sestavení byla vybrána 1D drátková sonda 55P11 od firmy Dantec. Na kalibračním zařízení byla sonda kalibrována a poté připevněna do chemického držáku pod trysku. Dále jsme zvolili, v jakých směrech a souřadnicích budeme měření provádět a posouvat trysku. Nejprve se posouvala tryska ve směru $y = 150$ mm s krokem 5 mm. Dále se prováděla měření ve směru osy x , kde byla prováděna měření pro fixované výšky nad sondou $y = 50$ mm a 100 mm symetricky rozdělené od bodu, kde sonda byla přímo pod tryskou s krokem 1 mm. Celkový rozsah měření v ose x byl 40 mm, tryska byla přímo nad sondou na souřadnici $x = 20$ mm.

3.1.2 Popis sensoru

Pro měření CTA jsme použili jednodrátkovou sondu 55P11, viz. Obr. 3.1.2.



Obr. 3.1.2 – Drátková sonda 55P11

Pro výpočty a měření jsou na obalu sondy uvedeny její vlastnosti. Pro náš konkrétní případ:

- Odpor sensoru při 20 °C – $R_{20} = 3,55 \Omega$
- Odpor vedení - $R_L = 0,5 \Omega$
- Koeficient tepelného odporu – $\alpha_{20} = 0,36\% / C$

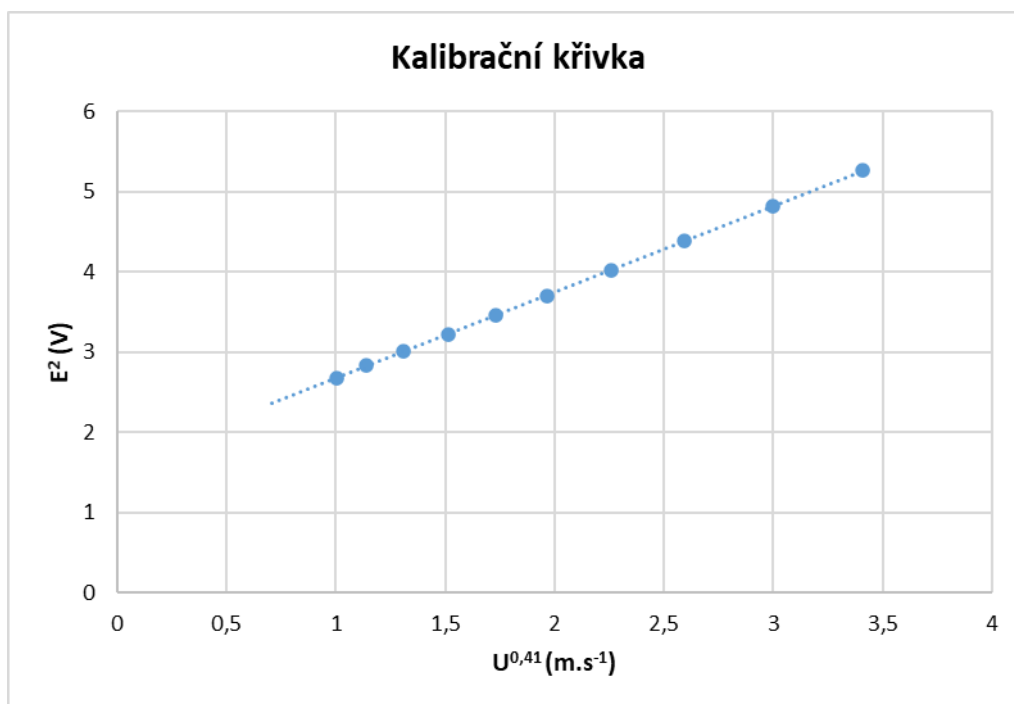
Pomocí programu změříme celkový odpor sondy R_{TOT} při dané teplotě, T_0 , poté T_{sensor} pro náš případ je menší než 300 °C a z těchto parametrů se spočte celkový provozní odpor pomocí rovnice uvedené na sondě, viz. rovnice 3.1.2.

$$R = R_{TOT} + \alpha_{20} \cdot R_{20} \cdot (T_{sensor} - T_0) \quad (3.1.2)$$

3.1.3 Kalibrace

Na kalibrování sondy 55P11 byl použit kalibrační přístroj rychlosti Dantec. Před měřením byla sonda nakalibrována a z naměřených dat kalibrace byl poté v programu vybrán polynom pro proložení hodnot. Na Obr. 3.1.3 je kalibrační

křivka, ve které je vidět závislost rychlosti na napětí. Při nastavení byl zvolen rychlostní rozptyl od 1-20 m.s⁻¹ a 10 měřících iterací. Při kalibraci byl tlak p v místnosti zhruba 97,4 KPa a teplota 25,5 °C.



Obr. 3.1.3 – Kalibrační křivka pro měření rychlosti, Kingův zákon

Z grafu je patrné, že se zvyšující se rychlostí stoupá napětí. Podle kalibrační křivky jsme pak dále mohli pracovat s napětími a převádět je na rychlost v jednotlivých bodech.

3.1.4 Výpočet rychlosti proudění

Pro výpočet rychlosti se může použít vzorec z přenosové funkce:

$$U = C_0 + C_1 \cdot E_{corr} + C_2 \cdot E_{corr}^2 + C_3 \cdot E_{corr}^3 + C_4 \cdot E_{corr}^4 .$$

Z tohoto vzorce se poté analyzuje kalibrační křivka, kterou jsem volil jako polynom třetího stupně. V průběhu výpočtu se ukázalo, že pro toto měření je však vhodnější z hlediska přesnosti Kingův zákon:

$$E^2 = A + B \cdot U^n , \tag{3.1.4}$$

kde A , B a n jsou kalibrační konstanty, přičemž n se volí z intervalu 0,4 až 0,5.

Tuto rovnici jsem použil pro všechny výpočty rychlosti. Jako výstup měření jsem obdržel hodnoty napětí v čase s měnící se polohou trysky. Toto napětí jsem pomocí Kingova zákona mohl převést na rychlost.

Následně byla ze vztahu 3.1.5 vypočtena střední rychlosti každého z úseků:

$$U_{mean} = \frac{1}{N} \cdot \sum_1^N U_i, \quad (3.1.5)$$

kde N je počet vzorků a U_i ($m \cdot s^{-1}$) je rychlost v jednotlivých bodech měření.

Směrodatná odchylka se vypočte jako:

$$U_{rms} = \left(\frac{1}{N-1}\right) \cdot \sum_1^N (U_i - U_{mean})^2)^{0,5}. \quad (3.1.6)$$

Když budeme znát obě tyto hodnoty, tak můžeme v jednotlivých intervalech spočítat intenzitu turbulence z rovnice:

$$T_u = \frac{U_{rms}}{U_{mean}}. \quad (3.1.7)$$

Výše uvedené vztahy 3.1.5 až 3.1.7 jsou převzaté z [7].

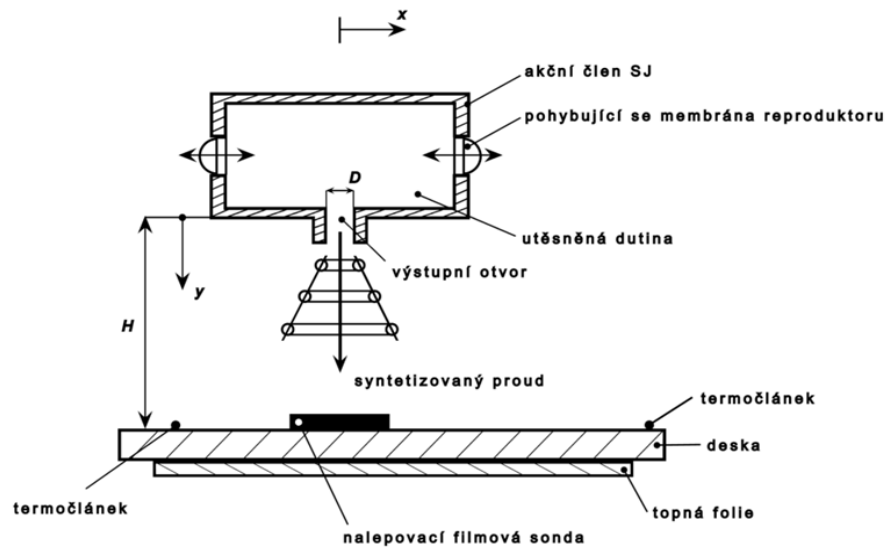
3.2 Měření součinitele přestupu tepla

Měření součinitele přestupu tepla bylo měřeno na experimentálním zařízení, ze kterého jsem obdržel data z měření, a neúčastnil se přímo ani na realizaci zařízení.

3.2.1 Rozbor úlohy

Zdrojem vzduchu byl syntetizovaný proud vycházející z dutiny a průměru $D = 10mm$, který byl vygenerován reproduktorem Monacor SP 60/4 pomocí dvou membrán pracujících ve fázi. Membrány reproduktoru mají průměr $D_d = 75mm$. Proud vzduchu dopadal na hliníkovou desku o rozměrech $350 \times 260 mm$ umístěnou ve vzdálenosti H od výstupního otvoru akčního členu. Hliníková deska je namontována nepohyblivě, naopak SJ je uchycen v traverzovacím zařízení s možností pohybu ve všech osách. Deska byla vyhřívána topnou fólií s rozměry $130 \times 130 mm$, která byla nalepena na její spodní straně. Teplota zahřívání desky se udržuje na stejné teplotě jako je teplota drátku sondy, což zajišťuje systém termočlánků napojených na PID regulátor.

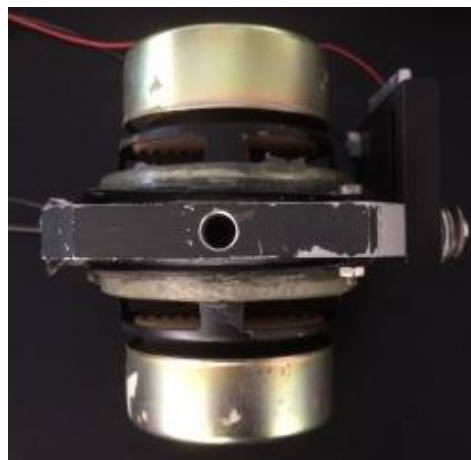
Ten zapíná a vypíná napájení topné fólie. Aby se neovlivnily termočlánky proudem vzduchu z akčního členu, jsou umístěny na desce viz. Obr. 3.2.1 [14]



Obr. 3.2.1 – Schématické uspořádání experimentu se SJ [14]

Reproduktory jsou napájeny sinusovým signálem o příkonu 3W. Pracovní frekvence akčního členu je 74 Hz. [14]

„Pro experimenty, kdy je impaktní proud tvořen prouděním z kontinuální trysky kruhového průřezu, byla použita tryska viz. Obr. 3.2.2 s následujícími rozměry: průměr vstupního otvoru $D_{V0} = 4 \text{ mm}$, vnitřní průměr $D_T = 50 \text{ mm}$ a vnitřní výška trysky $H_T = 50 \text{ mm}$. Požadovaný konstantní průtok vzduchu (rychlost proudění na výstupu z otvoru) je zajištěn zdrojem tlakového vzduchu se systémem regulačních ventilů.“ [14]



Obr. 3.2.2 – Tryska SJ [16]

3.2.2 Popis sondy

Na měření součinitele přestupu tepla byla použita nalepovací filmová sonda 55R47 od firmy Dantec viz. Obr. 3.2.3. Sonda byla umístěna přímo na povrchu hliníkové desky.



Obr. 3.2.3 – Drátková sonda 55R47 [14]

Experimenty byly prováděny se vzorkovací frekvencí 10 kHz a počtu vzorků 32768. Kalibrace sondy byla provedena v rozsahu $(0,5-30) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

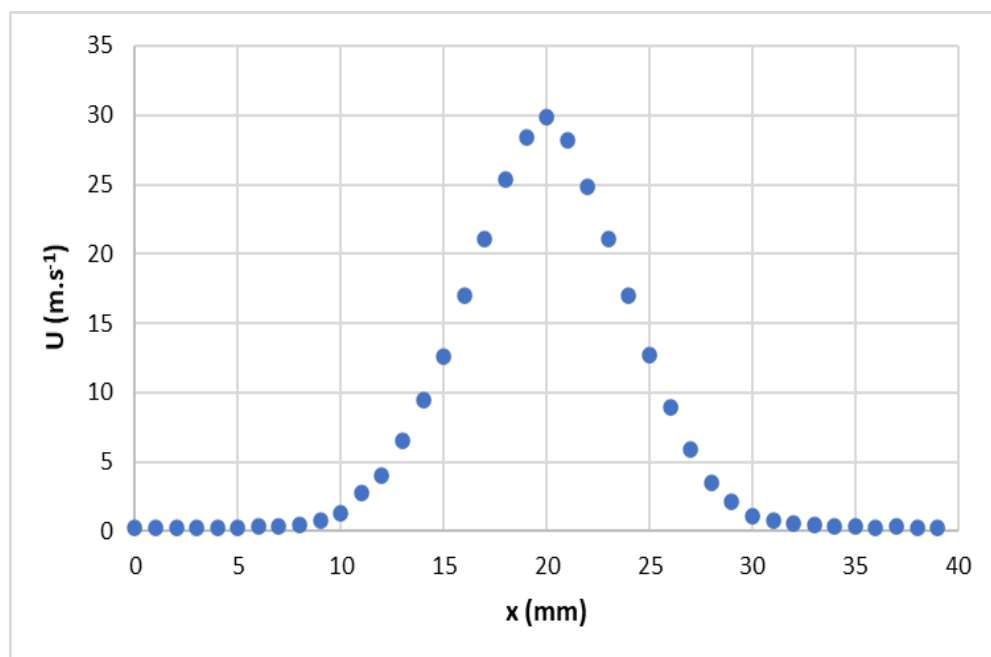
4 Výsledky experimentů

Výsledky experimentů rychlosti a vyhodnocení součinitele přestupu tepla jsou prezentovány graficky. V jednotlivých grafech jsou popsány závislosti vypočtených veličin a v popisu grafu o jaké měření se jednalo.

4.1 Měření rychlosti

Měření rychlosti bylo prováděno ve dvou intervalech, kdy rozsah v ose x (vodorovná osa) je vždy stejný a v ose y (svislá osa) jsou vzdálenosti od trysky 50 mm a 100 mm. Zdrojem vzduchu byla kontinuální tryska. Pro oba intervaly bylo měření provedeno se vzorkovací frekvencí 5000 kHz a počtu vzorků 8192.

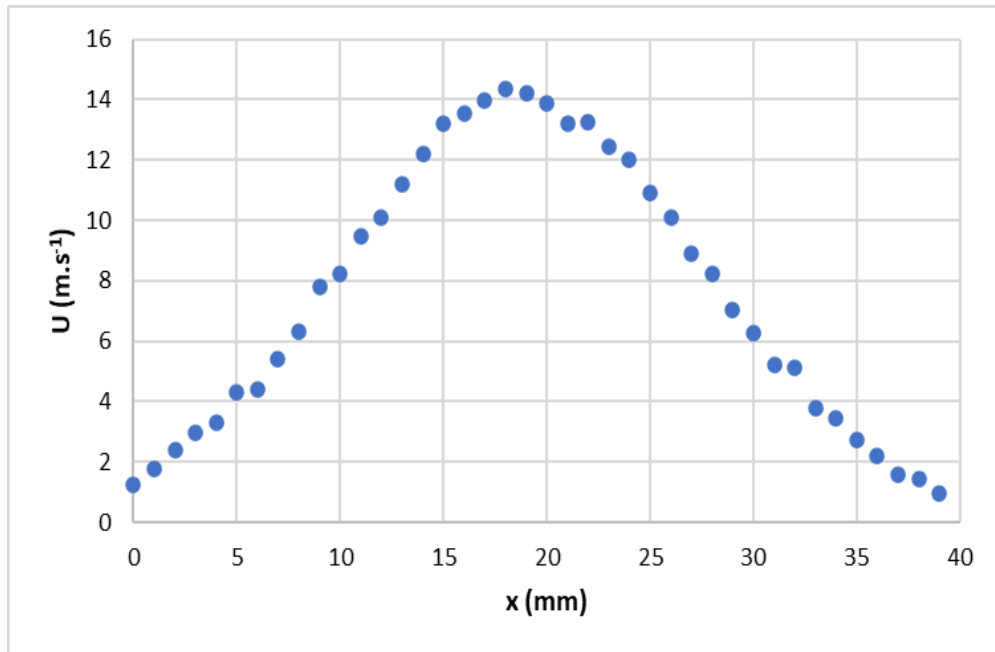
V grafu 4.1 je vyjádřena závislost rychlosti proudění U na vzdálenosti x . První měření bylo provedeno ve výšce nad tryskou $y = 50 \text{ mm}$. Z grafu je zřejmé, že čím více se přibližujeme tryskou přímo nad sondu, tím více se zvětšuje rychlost. Pro všech 40 iterací se počítala střední rychlost, standartní odchylka a intenzita turbulence.



Graf 4.1 – závislost rychlosti na vzdálenosti od trysky $y=50 \text{ mm}$

Měření jsme začínali v bodě 0 tak, aby byl interval pro měření souměrný na obě strany od středu intervalu, který se nacházel přímo pod tryskou. Na Obr. 4.2,

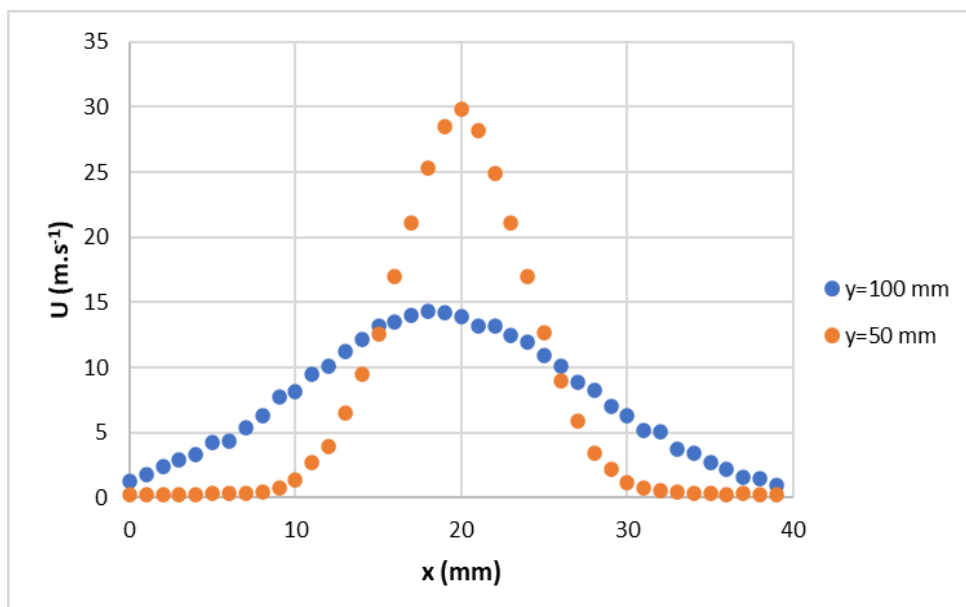
kde je vzdálenost od osy $y = 100 \text{ mm}$ je vidět, že křivka nestoupá a neklesá tak strmě jako na Obr. 4.1.



Graf 4.2 – závislost rychlosti na vzdálenosti od trysky $y=100 \text{ mm}$

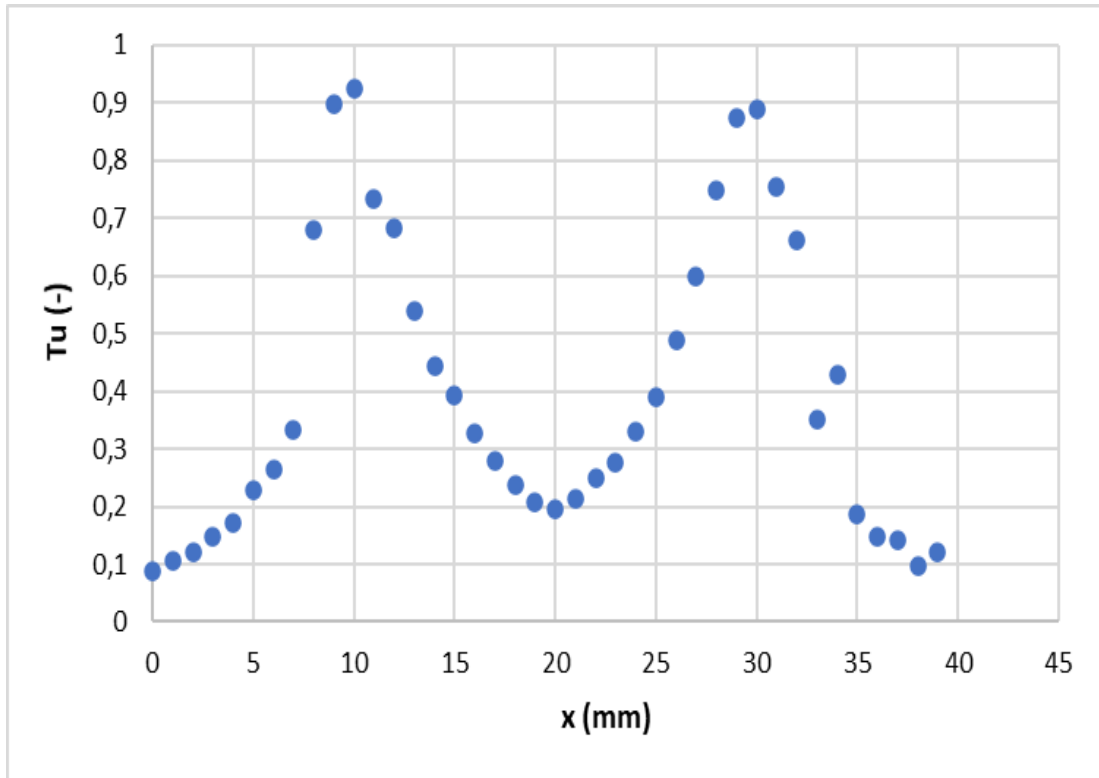
Pokud porovnáme grafy 4.1 a 4.2 mezi sebou, je vidět, že stoupání křivky je lineárnější při větších vzdálenostech od trysky a průběh křivky se mění pomaleji v závislosti na ose x .

V grafu 4.3 je porovnání rychlostí v závislosti na souřadnici x pro obě vzdálenosti od trysky.

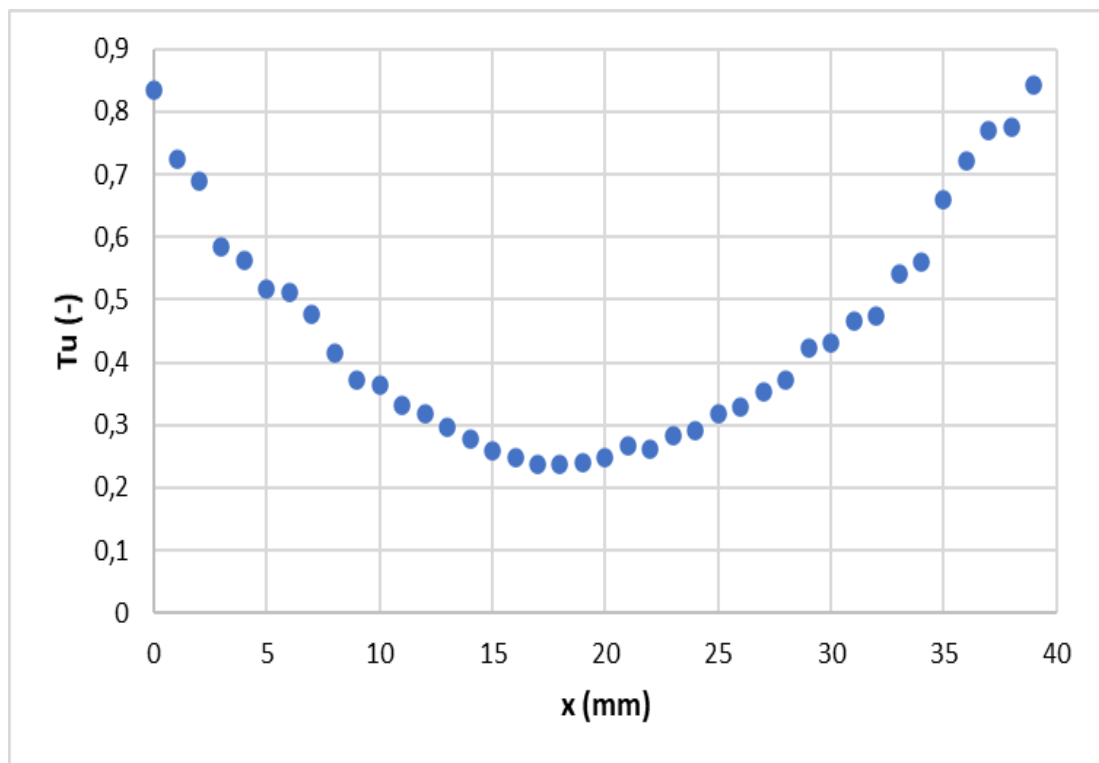


Graf 4.3 – porovnání rychlosti na vzdálenosti pro obě výšky měření

Z vypočtených parametrů a standardní odchylky jsme poté mohli spočítat intenzitu turbulence pro obě měření, ze kterých poté vznikly grafy 4.4 a 4.5.



Graf 4.4 – intenzita turbulence v závislosti na poloze pro $y=50$ mm



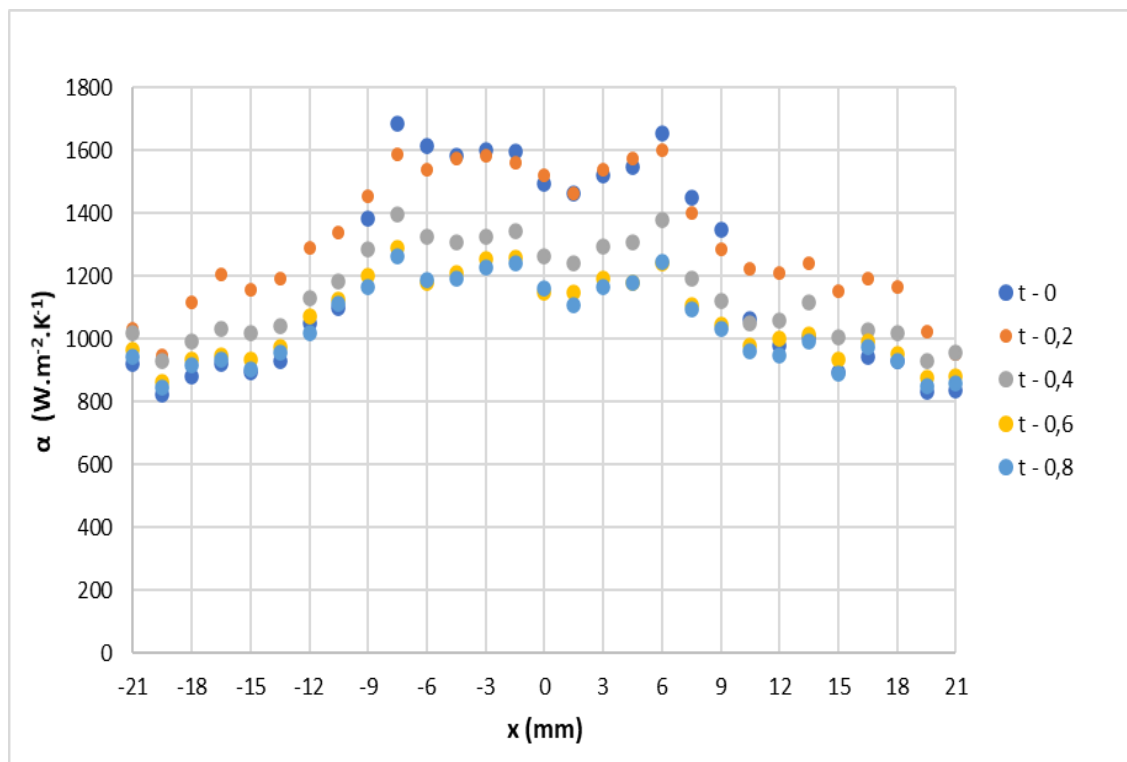
Graf 4.5 – intenzita turbulence v závislosti na poloze pro $y=100$ mm

4.2 Výpočet součinitele přestupu tepla

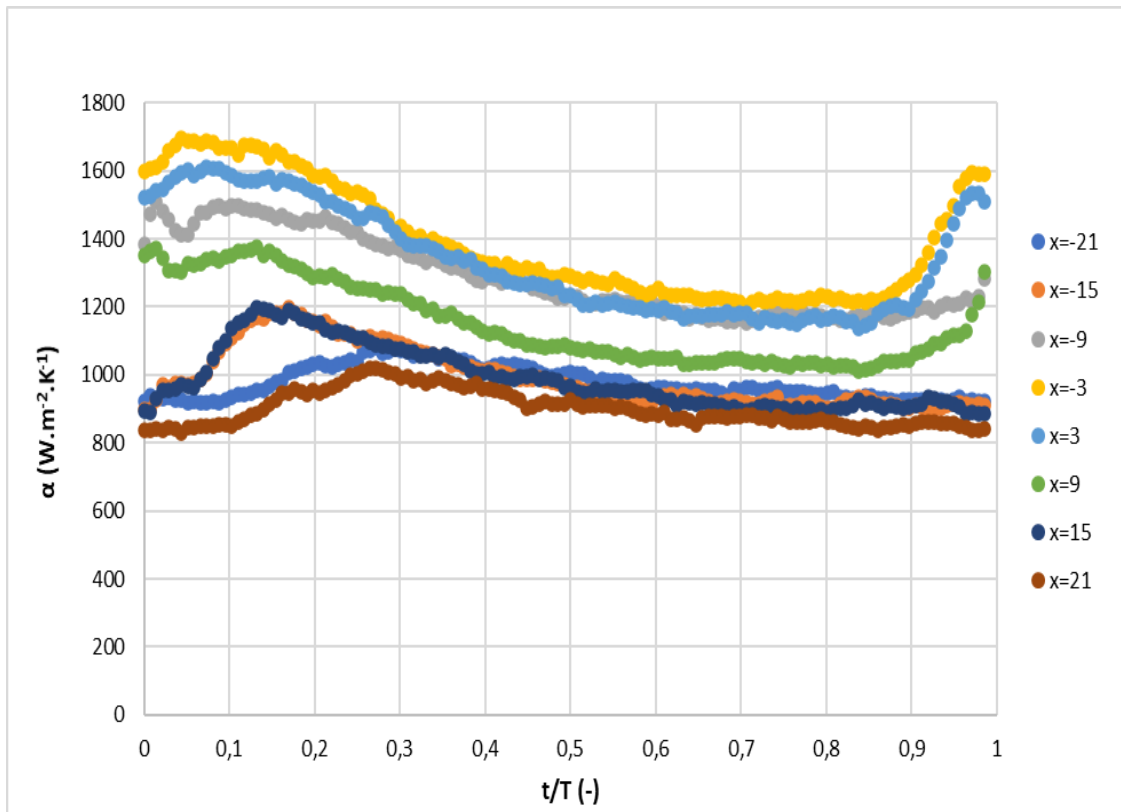
Pro výpočet součinitele přestupu tepla byla provedena tři měření pro různé vzdálenosti trysky nad sondou, $y = 10\text{ mm}$, 20 mm a 50 mm , a jedno měření bez trysky, kdy zdrojem proudění vzduchu byl syntetický proud. Měření probíhalo při přehřátí $0,03$. Měření bez trysky zahrnuje q_{cond} z rovnice 2.12 v E_0 , a proto ho ve výpočtech Nusseltova čísla uvažujeme jako nulové.

Na začátku jsem měl v časovém intervalu naměřené hodnoty napětí, ze kterých jsem díky známým hodnotám odporů, plochy sensoru a dalších veličin známých z měření nebo z údajů od výrobce spočítali Q_{diss} . Dále poté q , Nu a nakonec součinitel přestupu tepla α .

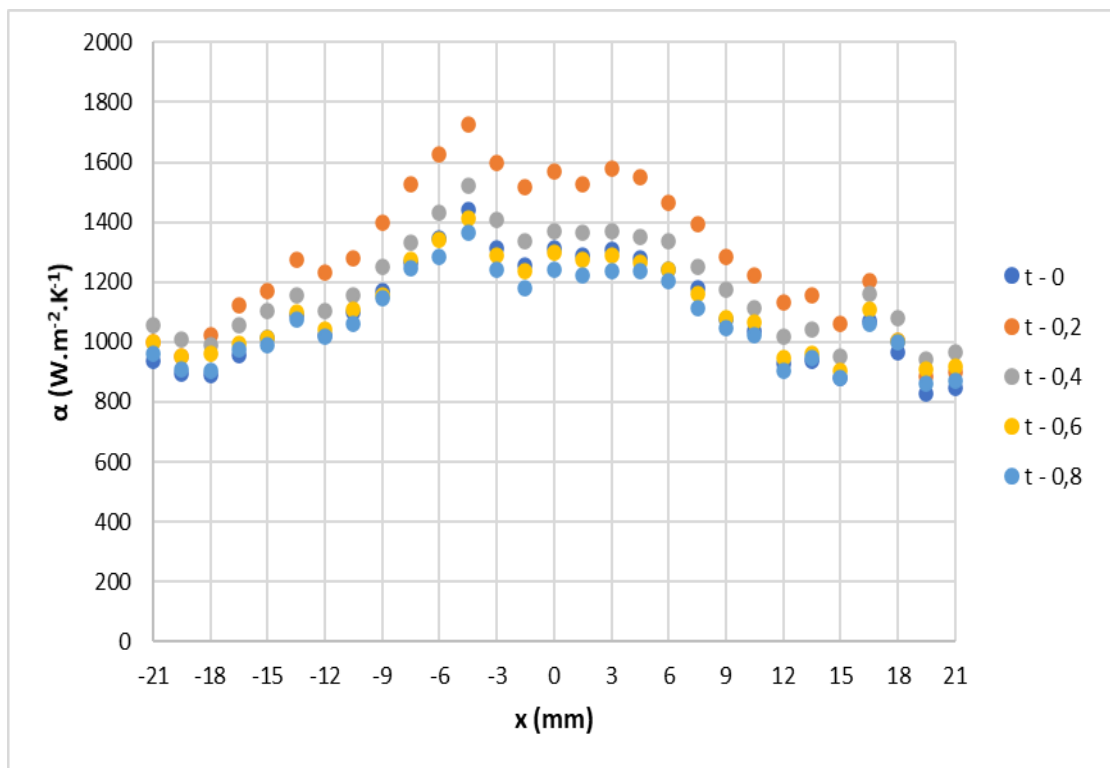
V následujících grafech 4.6 až 4.11 je vyjádřen součinitel přestupu tepla v závislosti na souřadnici x a na bezrozměrném čase pro jednotlivá měření.



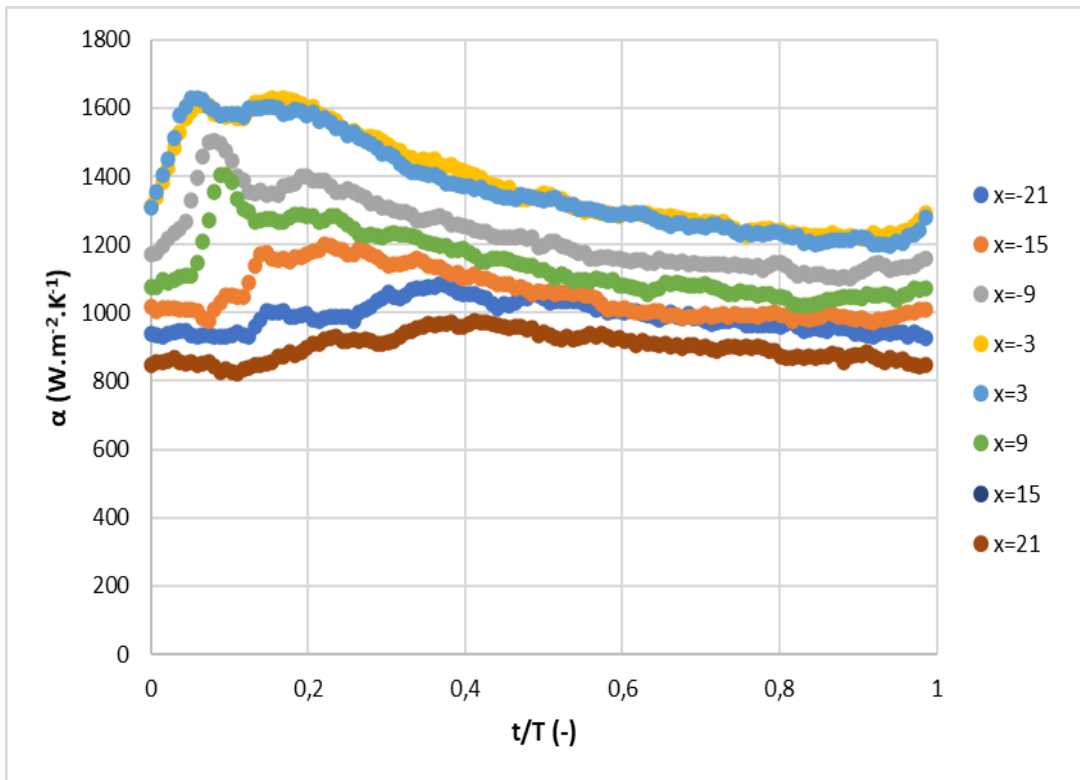
Graf 4.6 – součinitel přestupu tepla v závislosti na poloze pro $y=10\text{ mm}$



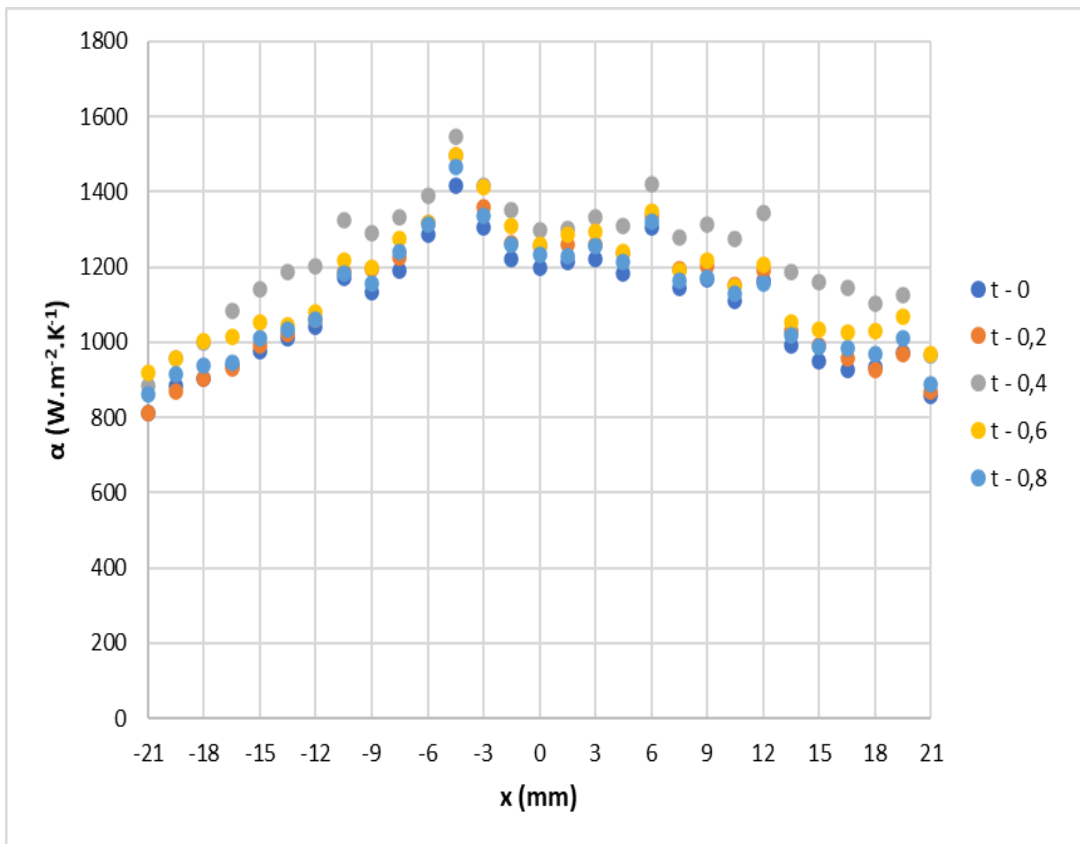
Graf 4.7 – součinitel přestupu tepla v závislosti na bezrozměrném čase pro $y=10$ mm



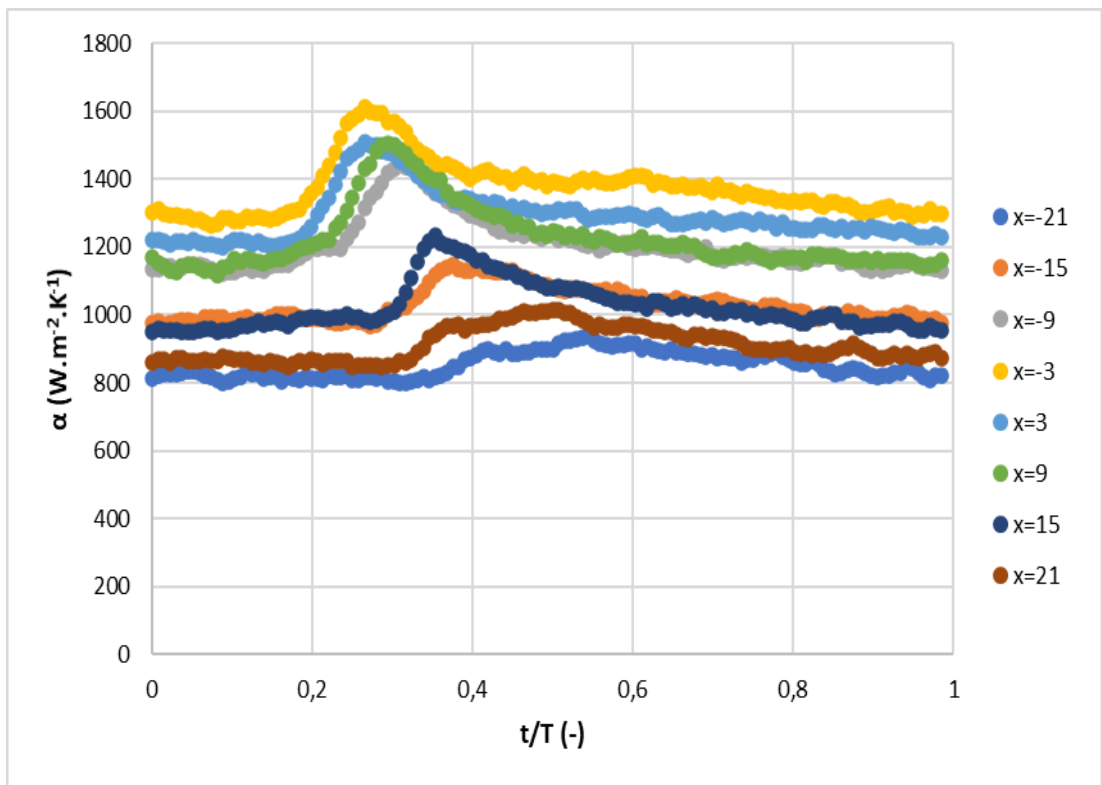
Graf 4.8 – součinitel přestupu tepla v závislosti na poloze pro $y=20$ mm



Graf 4.9 – součinitel přestupu tepla v závislosti na bezrozměrném čase pro $y=20$ mm



Graf 4.10 – součinitel přestupu tepla v závislosti na poloze pro $y=50$ mm



Graf 4.11 – součinitel přestupu tepla v závislosti na bezrozměrném čase pro $y=50$ mm

Závěr

V bakalářské práci jsem provedl rešerši prací, které se zabývají metodami měření součinitele přestupu tepla a anemometrickými metodami, především CTA z důvodů jejího použití v praktické části práce. Dále jsou v teoretické části zmíněny další z metod měření součinitele přestupu tepla.

Pro navrhnutí experimentu jsem v laboratoři sestavil experimentální zařízení na měření rychlosti a stanovil algoritmus, podle kterého se odvíjelo vyhodnocování experimentu, které je popsáno v kapitole 3.1.4 – Výpočet rychlosti proudění. Vyhodnocení součinitele přestupu tepla bylo provedeno dle rovnic v kapitole 2.6 – Metodika vyhodnocování přestupu tepla. Na přímém měření jsem se neúčastnil, avšak v kapitole 3.2 je popsáno, jak měření v laboratoři probíhalo.

Výsledky obou měření byla surová data ze softwaru StreamWare, ze kterých poté byly pomocí algoritmů vypočteny požadované hodnoty a následně zpracovány do grafických výstupů, které byly výsledkem bakalářské práce.

Bibliografie

- [1] John Wiley & Sons, Incropera, DeWitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 3. vydání, New York, 1990.
- [2] H. BRUNN. *Hot-wire anemometry: principles and signal analysis*. Oxford University press, 1995.
- [3] CHOPRA, Mehak. *Hot Wire Anemometry and Fluid Flow Measurement* [online]. Indian Institute of Technology Delhi [cit. 2020-07-10].
- [4] [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/constant-temperature-anemometry-cta/measurement-principles-of-cta/>
- [5] JAHODA, M. *Hydromechanické procesy obtékání těles* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://adoc.tips/hydromechanicke-procesy-obtekani-tles.html>
- [6] JENSEN, K. D. Flow measurements. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 2004, **26**(4) [cit. 2020-07-14]. DOI: 10.1590/S1678-58782004000400006. ISSN 1678-5878.
- [7] M. KOZUBOVÁ, P. FABIÁN a J. KUNDYS. *Měření žárovým anemometrem*. DANTEC Dynamics, 2004.
- [8] [online]. [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: http://www.newportus.com/ppt/HFS.html?fbclid=IwAR2G_Jm0bgfMgn5WUPaVA8BBJH4tfd8boaP8t9ma7y2w55QiNgS6mBswDA
- [9] KOROBIIICHUK, Igor, Olena BEZVESILNA, Andrii ILCHENKO, Valentina SHADURA, Michał NOWICKI a Roman SZEWCZYK. *A Mathematical Model of the Thermo-Anemometric Flowmeter. Sensors* [online]. 2015, 15(9), 22899-22913 [cit. 2020-07-14]. DOI: 10.3390/s150922899. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/9/22899>

- [10] MOREIRA Tiago Augusto, Alex Roger Almeida COLMANETTI a Cristiano Bigonha TIBIRIÇÁ. *Heat transfer coefcient: a review of measurement techniques. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 27. 5. 2019 [cit. 2020-07-05].
- [11] [online]. [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: https://www.omegaeng.cz/pptst_eng/HFS-3_HFS-4.html
- [12] SCHMIDT, Roger R. *Use of Naphthalene Sublimation Technique for Obtaining Accurate Heat Transfer Coefficients in Electronic Cooling Applications* [online]. August 1, 2001 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://www.electronics-cooling.com/2001/08/use-of-naphthalene-sublimation-technique-for-obtaining-accurate-heat-transfer-coefficients-in-electronic-cooling-applications/>
- [13] KELLEHER, M.D., R.K. SHAH, K.R. SREENIVASAN a Y. YOSHI. *Experimental Heat Transfer, Fluid Dynamics and Thermodynamics* [online]. 1993 [cit. 2020-07-05].
- [14] P. DANČOVÁ, *Experimentální metody v úlohách neizotermního proudění*. Habilitační práce, TUL, 2018.
- [15] SIMIONESCU, Stefan-Mugur, Umrhan DUZEL, Claudia ESPOSITO, Zdenek ILICH a Corneliu BALAN. *Heat transfer coefficient measurements using infrared thermography technique*. 2015, 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) [online]. IEEE, 2015, 2015, 591-596 [cit. 2020-07-14]. DOI: 10.1109/ATEE.2015.7133875. ISBN 978-1-4799-7514-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7133875/>
- [16] ISAIAH, David. *How Do Infrared Thermometers Work?* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://sciencing.com/infrared-thermometers-work-4965130.html>