

Ověření správnosti měření součinitele přestupu tepla

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Zdeněk Vébr

Vedoucí práce:

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
Katedra energetických zařízení





Zadání bakalářské práce

Ověření správnosti měření součinitele přestupu tepla

Jméno a příjmení: **Zdeněk Vébr**
Osobní číslo: S17000139
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávací katedra: Katedra energetických zařízení
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

Množství technologií je dnes závislých na konvektivním ohřevu. Existuje několik metod pro měření součinitele přestupu tepla. Cílem práce je navrhnout experiment, který bude sloužit k ověření správnosti měření při použití jedné z metod. Pro práci bude nutné osvojení si základů měření rychlosti a přestupu tepla termoanemometrickými metodami.

Práce by měla odpovídat následující struktuře:

- 1) Rešerše prací, které se zabývají zvolenou problematikou.
- 2) Rozbor úlohy, návrh experimentů.
- 3) Provedení a vyhodnocení experimentů.
- 4) Analýza a diskuse výsledků.

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

cca 50 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí práce:

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce:

1. listopadu 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

30. dubna 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

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

V Liberci dne 1. listopadu 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.

23. června 2021

Zdeněk Vébr

Ověření správnosti měření součinitele přestupu tepla

Anotace

Bakalářská práce se zabývá měřením součinitele přestupu tepla při obtékání rotačního válce s příčným tokem vzduchu. Účelem vlastního výzkumu je provést měření metodou termoanemometrie v režimu konstantní teploty (CTA) při různých součinitelích přehřátí pomocí standardní jednodrátkové sondy.

Klíčová slova: CTA, drátková sonda, součinitel přestupu tepla, termoanemometrie

Verification of the correctness of the heat transfer coefficient measurement

Annotation

The bachelor thesis deals with the measurement of the heat transfer coefficient during going around of a rotating cylinder with a lateral air flow. The aim of this research is to make a measuring with a method of a hot wire anemometry in mode of constant temperature in different coefficients of an overheat according to a standard single-sensor wire probe.

Keywords: CTA, wire probe, heat transfer coefficient, hot wire anemometry

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval doc. Ing. Petře Dančové, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce, množství cenných rad, doporučení a zároveň za velmi ochotný a lidský přístup. Děkuji také prof. Ing. Tomáši Vítovi, Ph.D. za věcné rady při konzultacích a za čas, který mi během tvorby této práce věnoval. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, blízkým a přátelům za podporu po celou dobu studia.

Obsah

Seznam vybraných symbolů a zkratek.....	9
1. Úvod.....	12
2. Teoretická část	13
2.1. Tepelná konvekce.....	13
2.1.1. Volná konvekce	13
2.1.2. Nucená konvekce.....	13
2.2. Součinitel přestupu tepla	13
2.3. Teorie podobnosti.....	14
2.4. Termoanemometrie	16
2.4.1. Anemometrie s konstantní teplotou – CTA.....	17
2.4.2. Anemometrie s konstantním proudem – CCA	18
2.4.3. Anemometrické sondy	19
2.4.4. Drátkové sondy.....	19
2.4.5. Součinitel přehřátí sondy	20
2.4.6. Filmové sondy	20
2.4.7. Kalibrace sond	20
2.4.8. Výhody termoanemometrie	21
2.4.9. Nevýhody termoanemometrie	21
2.4.10. Určení směru proudění	21
2.5. Nejistoty měření	22
2.5.1. Celková nejistota měření	22
2.5.2. Vliv anemometru	23
2.5.3. Kalibrace.....	23
2.5.4. Linearizace	23
2.5.5. Rozlišení A/D převodníku.....	23

2.5.6.	Nejistota polohy sondy	24
2.5.7.	Změna teploty drátku.....	24
2.5.8.	Vliv teploty na hustotu vzduchu.....	24
2.5.9.	Vliv tlaku na hustotu vzduchu.....	24
2.5.10.	Změna složení vzduchu, vliv vlhkosti	25
3.	Rozbor úlohy a metody řešení	26
3.1.	Experimentální zařízení.....	26
3.2.	Rozbor úlohy	27
3.3.	Popis sondy	27
3.4.	Kalibrace termočlánku	28
3.5.	Data získaná měřením	28
3.6.	Zpracování naměřených dat	29
3.7.	Postup obecného výpočtu.....	30
3.8.	Výpočet nejistot měření	31
4.	Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze.....	34
4.1.	Měření součinitele přestupu tepla	34
4.2.	Výpočet Nusseltova čísla	35
4.3.	Porovnání Nusseltových čísel	38
4.4.	Materiálové vlastnosti	39
5.	Závěr	42
	Seznam použité literatury	43

Seznam vybraných symbolů a zkratek

Seznam symbolů

A, B, C, D	(1)	kalibrační konstanty
A_{SENSOR}	(m^2)	plocha, průřez drátku sondy
a	(1)	součinitel přehřátí
a_t	($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	teplotní vodivost (termální difuzivita)
c_p	($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	izobarická měrná tepelná kapacita
d_{SENSOR}	(m)	průměr drátku sondy
d_u	(m)	určující rozměr
E	(V)	elektrické napětí
E_{SENSOR}	(V)	elektrické napětí naměřené na drátku
g	($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	tíhové zrychlení
h	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	součinitel přestupu tepla
I	(A)	elektrický proud
k_{SENSOR}	($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	tepelná vodivost materiálu drátku
l	(m)	délka, po které dochází k vedení tepla
l_{SENSOR}	(m)	délka drátku sondy
n	(1)	exponent Kingova vztahu (rovnice (2.4.9))
\dot{Q}_J	(W)	tepelný tok (odvozený z Joulova tepla)
\dot{q}	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	hustota tepelného toku
R	(Ω)	elektrický odpor
R_0	(Ω)	elektrický odpor senzoru při teplotě T_0

R_{BRIDGE}	(Ω)	elektrický odpor horní větve CTA můstku (Obr. 3.6)
R_{DEC}	(Ω)	elektrický dekadový odpor
R_{SENSOR}	(Ω)	elektrický odpor drátku sondy
R_{TOT}	(Ω)	elektrický odpor sondy (včetně vedení) při teplotě T_0
T_0	($^{\circ}\text{C}$)	referenční teplota
T_f	($^{\circ}\text{C}$)	filmová teplota (rovnice (3.7.2))
T_{AMBIENT}	($^{\circ}\text{C}$)	teplota okolní tekutiny
T_{tekutiny}	($^{\circ}\text{C}$)	teplota tekutiny
T_{SENSOR}	($^{\circ}\text{C}$)	teplota drátku sondy
$T_{\text{stěny}}$	($^{\circ}\text{C}$)	teplota stěny
t	(s)	charakteristický čas
U	($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	rychlost proudění pohybující se tekutiny
w	($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	rychlost

Řecké symboly

γ	(K^{-1})	izobarický součinitel objemové roztažnosti
λ	($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	tepelná vodivost
μ	($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	dynamická viskozita
ν	($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	kinematická viskozita
ρ	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	hustota
χ_{SENSOR}	($\Omega \cdot \text{m}$)	měrný odpor materiálu drátku

Seznam zkratek

CT	konstantní teplota (z AJ constant temperature)
CCA	anemometrie za konstantního proudu (z AJ constant current anemometry)
CTA	anemometrie za konstantní teploty (z AJ constant temperature anemometry)
Fo	Fourierovo číslo
Gr	Grashofovo číslo
Nu	Nusseltovo číslo
Pr	Prandtlovo číslo
Re	Reynoldsovo číslo

1. Úvod

V současné době je čím dál více technologií závislých na konvektivním přenosu tepla. Tohoto jevu se využívá především při různých průmyslových aplikacích k ohřívání, chlazení či sušení. Konvektivní přenos tepla neboli konvekce ve své podstatě znamená přenos tepla prouděním a dělí se na nucenou konvekci a přirozenou, také označovanou jako volnou. Mezi oběma druhy jsou určité rozdíly, které jsou v této práci dále rozvedeny. Kolik tepla se při konvekci předá určuje součinitel přestupu tepla.

Cílem této bakalářské práce je s použitím jedné z termoanemometrických metod navrhnout experiment, který bude sloužit pro měření tohoto součinitele. Přímé měření však není zcela možné a součástí navrhnutí experimentu je vytvoření algoritmu pro jeho vyhodnocení z naměřených dat. Ze znalosti součinitele přestupu tepla pak vypočítat přenos tepla konvekcí, který určuje Nusseltovo číslo, a to porovnat s vybranou obecnou korelační rovnicí. Výsledkem pak jsou grafy závislosti součinitele přestupu tepla na rychlosti, Nusseltova čísla na rychlosti a pro pochopení vývoje Nusseltova čísla v laminární mezní vrstvě také na Reynoldsově čísle. Součástí práce je mimo jiné i výpočet nejistot měření a prozkoumání vlivu filmové teploty na výpočet kritériálních čísel.

Prací s podobnou problematikou se již dříve zabývali Scholten a Murray. Ve své práci [1] měřili v režimu s konstantní teplotou CTA prostřednictvím nalepovací filmové sondy upevněné na vyhřívaném válci hodnotu tepelného toku při nízké úrovni turbulence. Zjistili, že díky promíchávání tekutiny uvnitř válce je velikost fluktuace v zadní části o dost vyšší než v přední části.

Beasley a Figliola v [2] zkoumali vliv konstrukce sondy na její tepelné vlastnosti a odezvu. Vytvořili numerický model, který sloužil ke stanovení teplotního rozložení a tepelného toku pro různé geometrie a materiály sondy. Data získávali ze snímače umístěném v izotermické stěně udržovaném na teplotě stěny. Prokázali vliv konstrukce sondy na citlivost a tepelnou odezvu a že správným výběrem potahových materiálů a návrhem geometrie se tepelná odezva může přiblížit ideálnímu teoretickému minimu.

2. Teoretická část

2.1. Tepelná konvekce

Sdílení tepla konvekcí je mechanismus, při kterém na rozhraní pohybujícího se média (obvykle tekutiny) a stojícího média (obvykle pevné látky) dochází k výměně tepla. K této výměně ale nedochází pouze konvekcí, nýbrž díky změně charakteru tepelného toku v blízkosti stěny, viz Obr. 2.2, také kondukcí (přenos vedením). Konvekci rozlišujeme podle způsobu, jakým vzniká pohyb, na konvekci volnou (v literatuře uváděnou také jako přirozenou, z AJ free nebo natural convection) a nucenou (forced convection). Obecně může volné proudění nastávat současně s prouděním nuceným. Pak platí, že čím menší je rychlost nuceného proudění tím větší je podíl přirozené konvekce.

2.1.1. Volná konvekce

Volná (přirozená) konvekce probíhá samovolně pouze díky teplotnímu rozdílu tekutiny a pevné látky. Pro porozumění je potřeba si uvědomit, že hustota tekutiny klesá s nárůstem teploty. Jako příklad si lze představit vodorovnou desku, na kterou působí vzduch o nižší teplotě, než je teplota desky. Vzduch se u stěny ohřívá a vlivem snížení hustoty začne stoupat a uvolňovat místo studenějšímu vzduchu, čímž dochází k proudění, které odebírá teplo z desky.

2.1.2. Nucená konvekce

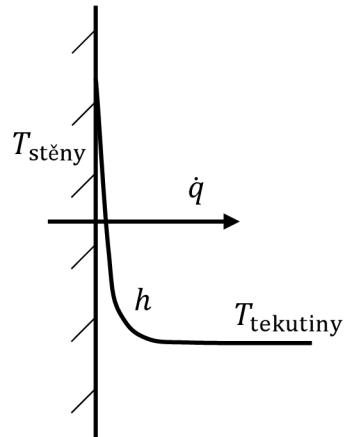
Nuceným pohybem kapaliny nazýváme proudění, které je vyvolané nějakým externím zdrojem energie. Takovým zdrojem může být vítr, čerpadlo, kompresor nebo ventilátor apod. Přenos tepla je mnohem více intenzivní než u konvekce volné, protože dopadající částice vzduchu, které se u desky ohřívají, jsou mnohem rychleji unášeny pryč a současně jsou rychleji nahrazovány studenějšími. Charakter nucené konvekce závisí na fyzikálních vlastnostech tekutiny, na rychlosti proudění a teplotě tekutiny.

2.2. Součinitel přestupu tepla

Pro určení přestupu tepla a součinitele přestupu tepla se nejčastěji používá Newtonův ochlazovací zákon:

$$\dot{q} = h (T_{\text{tekutiny}} - T_{\text{stěny}}) \quad (2.2)$$

kde \dot{q} je hustota tepelného toku, T_{tekutiny} je teplota tekutiny, $T_{\text{stěny}}$ je teplota stěny. Součinitel přestupu tepla h určuje intenzitu výměny tepla při styku tekutiny s povrchem stěny. V jednodušších případech se určuje na základě podobnostních čísel případně pomocí experimentálních metod. [3]



Obr. 2.2 Přestup tepla v blízkosti stěny

2.3. Teorie podobnosti

Součinitel přestupu tepla závisí na mnoha proměnných např. na rychlosti proudění, kinematické viskozitě, hustotě, typu konvekce, teplotní vodivosti, rozměrech obtékané plochy a dalších. Rovnice, která by umožnila výpočet, musí obsahovat všechny tyto fyzikální a geometrické vlivy. Takovou univerzální rovnici není pro všechny podmínky přestupu tepla možné sestavit. Proto byla určena obecná kriteriální rovnice sdílení tepla konvekcí. [3] Tedy dle [4]:

$$\text{Nu} = f(\text{Fo}, \text{Re}, \text{Gr}, \text{Pr}) \quad (2.3.1)$$

Tuto rovnici je možné v některých případech dále zjednodušovat. Např. pokud se jedná o ustálené proudění, odpadá číslo Fourierovo (Fo), při nucené konvekci zase Grashofovo číslo (Gr):

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (2.3.2)$$

V případě volné konvekce naopak odpadá Reynoldsovo číslo (Re):

$$\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr}) \quad (2.3.3)$$

Kritériální rovnice tvoří kritéria neboli podobnostní čísla, která charakterizují geometrické, mechanické a tepelné podobnosti náležitých jevů. Jedním z čísel popisujícím mechanickou podobnost je číslo Reynoldsovo vyjadřující poměr setrvačných sil k silám vazkým:

$$\text{Re} = \frac{w d_u}{\nu} \quad (2.3.4)$$

kde w je rychlost proudění, d_u je určující rozměr a ν kinematická viskozita.

Dalším kritériem mechanické podobnosti je Grashofovo, které srovnává velikost vztlakových a vazkých sil:

$$\text{Gr} = \frac{\gamma g d_u^3}{\nu^2} \Delta t \quad (2.3.5)$$

kde γ je izobarický součinitel objemové roztažnosti, g tíhové zrychlení a Δt je rozdíl mezi teplotou stěny a teplotou tekutiny.

Zbývá čísla jsou kritérii tepelné podobnosti, z nichž Fourierovo číslo určuje rychlost šíření tepla v tělese:

$$\text{Fo} = \frac{a_t t}{l^2} \quad (2.3.6)$$

kde a_t je teplotní vodivost, t je charakteristický čas a l je délka, po které dochází k vedení tepla.

Prandtlovo kritérium popisuje fyzikální vlastnosti tekutiny při konvektivním a difuzním přenosu tepla:

$$\text{Pr} = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda} \quad (2.3.7)$$

kde ρ je hustota, c_p je izobarická měrná tepelná kapacita a λ je součinitel tepelné vodivosti.

Poslední Nusseltovo číslo:

$$\text{Nu} = \frac{h d_u}{\lambda} \quad (2.3.8)$$

definované jako poměr rychlosti přenosu tepla přes rozhraní (tj. rychlost konvektivního přenosu) a rychlosti konduktivního přenosu, představuje přenos tepla konvekcí. [5]

2.4. Termoanemometrie

Termoanemometrie využívá žhavený drátek nebo film k měření proměnlivých veličin, vyskytujících se nejenom při turbulentním proudění jako je rychlost nebo teplota včetně jejich flukтуаční složky. [6] Metoda funguje na principu konvektivního přenosu tepla z vyhřívajícího tělesa (sondy) umístěné v proudu tekutiny. Množství přeneseného tepla z drátku závisí především na rychlosti proudící tekutiny, teplotě drátku a fyzikálních vlastnostech tekutiny. Sonda je obvykle tvořena wolframovým drátkem ohříváným průchodem elektrického proudu tzv. Joulovým teplem, které pro element drátku dx lze definovat dle Joulova zákona ve tvaru [7]:

$$d\dot{Q}_J = \frac{I^2 \cdot \chi_{\text{SENSOR}}}{A_{\text{SENSOR}}} dx \quad (2.4.1)$$

kde I je elektrický proud, χ_{SENSOR} je měrný odpor drátku a A_{SENSOR} je průřez drátku.

Celkový tepelný tok $d\dot{Q}_J$ generovaný v elementu sondy lze vyjádřit také pomocí základní tepelné bilance elementu sondy:

$$d\dot{Q}_J = d\dot{Q}_{\text{conv}} + d\dot{Q}_{\text{cond}} + d\dot{Q}_{\text{rad}} + d\dot{Q}_{\text{ac}} \quad (2.4.2)$$

kde $d\dot{Q}_{\text{conv}}$ je tepelný tok přenesený konvekcí do okolí, $d\dot{Q}_{\text{cond}}$ tepelný tok přenesený kondukcí do držáku, $d\dot{Q}_{\text{rad}}$ tepelný tok vyzářený do okolí a $d\dot{Q}_{\text{ac}}$ je akumulovaný tepelný tok. Ve většině případů je vyzářený tepelný tok a akumulovaný tepelný tok velice malý a zanedbatelný.

Tepelný tok přenesený konvekcí do proudícího media definuje Newtonův zákon [8]:

$$d\dot{Q}_{\text{conv}} = \pi d_{\text{SENSOR}} h (T_{\text{SENSOR}} - T_{\text{AMBIENT}}) dx \quad (2.4.3)$$

kde d_{SENSOR} je průměr drátku, h je součinitel přestupu tepla, T_{SENSOR} je teplota drátku a T_{AMBIENT} je teplota okolní tekutiny vyfukované z trysky.

Tepelný tok přenesený kondukcí má tvar:

$$d\dot{Q}_{\text{cond}} = -k_{\text{SENSOR}} A_{\text{SENSOR}} \frac{\partial^2 T_{\text{SENSOR}}}{\partial x^2} dx \quad (2.4.4)$$

kde k_{SENSOR} je tepelná vodivost materiálu drátku při teplotě T_{SENSOR} . Při představě nekonečně dlouhého drátku lze definovat poměrně jednoduchý vztah pro přenos tepla, jelikož lze ignorovat ztráty odvedené z drátku do držáku [7]. Tedy:

$$l^2 R_{\text{SENSOR}} = \pi d_{\text{SENSOR}} l_{\text{SENSOR}} h(T_{\text{SENSOR}} - T_{\text{AMBIENT}}) \quad (2.4.5)$$

Použitím vhodné substituce a s platností Ohmova zákona přejde vztah do tvaru:

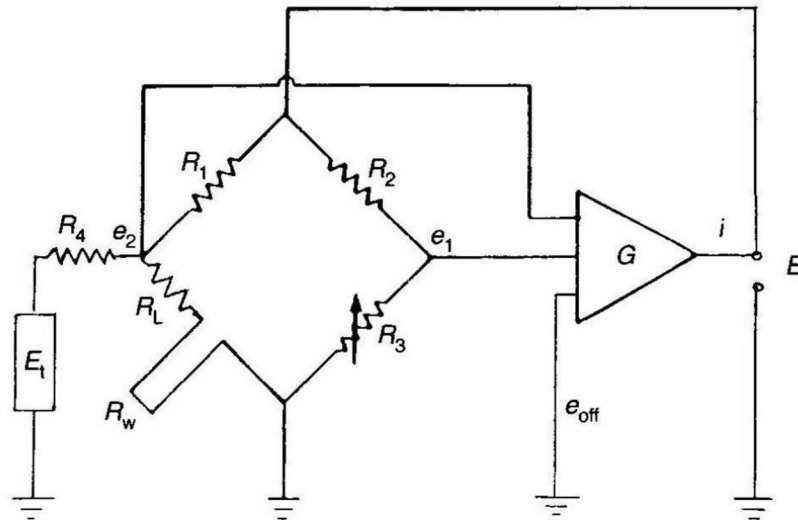
$$\frac{E_{\text{SENSOR}}^2}{R_{\text{SENSOR}}} = (A + BU^n)(T_{\text{SENSOR}} - T_{\text{AMBIENT}}) \quad (2.4.6)$$

kde A, B jsou kalibrační konstanty a n je exponent kalibračního vztahu [9].

Existují dva základní režimy nastavení pro měření prostřednictvím termoanemometrie. Režim s konstantní teplotou CT (constant temperature) a režim s konstantním proudem CC (constant current).

2.4.1. Anemometrie s konstantní teplotou – CTA

Anemometrie s konstantní teplotou drátku sondy CTA (z AJ Constant Temperature Anemometry) je jednou z neúčinnějších a nejspolehlivějších metod pro měření rychlosti. Hlavním rysem režimu je Wheatsonův můstek, viz Obr. 2.4.1, tj. elektrický obvod se zpětnovazebnou smyčkou, který udržuje konstantní teplotu na drátku sondy při měnících se podmínkách přenosu tepla v důsledku kolísající rychlosti. [10] Změna rychlosti proudící tekutiny změní teplotu na drátku sondy, čímž dojde ke změně odporu. Změna odporu způsobí nerovnováhu na můstku, jenž je vedena do operačního zesilovače, který upraví napájecí proud a tím udržuje konstantní teplotu na drátku. Režim je vhodný pro měření rychlosti. [7]



Obr. 2.4.1 Schéma zapojení režimu CTA [7]

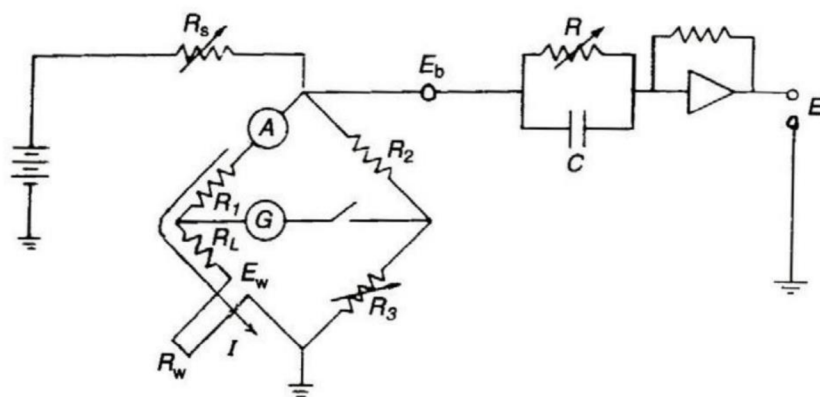
2.4.2. Anemometrie s konstantním proudem – CCA

Režim CCA (z AJ Constant Current Anemometry) díky obvodu se zpětnovazebnou smyčkou, viz Obr. 2.4.2, udržuje v drátku sondy konstantní proud. Konstantní proud vede ke konstantnímu tepelnému toku. Jakákoli změna rychlosti proudění ovlivní přenos tepla, čímž dojde ke změně elektrického odporu na drátku sondy.

Z Ohmova zákona:

$$E = I \cdot R \quad (2.4.7)$$

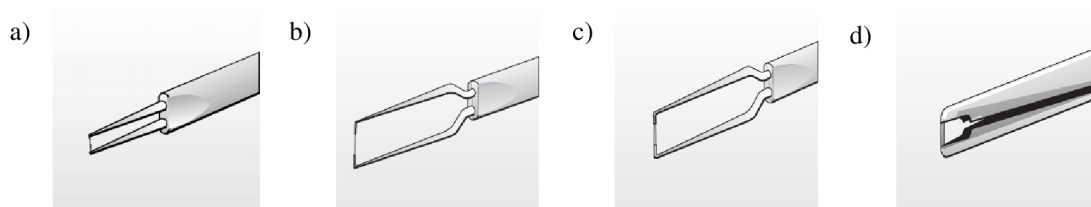
kde E je napětí, I je proud a R je odpor, plyne, že se změnou odporu se změní i napětí. Změnu napětí detekuje galvanometr, který je součástí Whetstonova můstku. [7] Výhodou termoanemometrie je schopnost detekovat a sledovat rychlé fluktuace rychlosti. Při zapojení v režimu CCA, pokud změny rychlosti proběhnou velmi rychle, bude odezva senzoru kvůli své vlastní tepelné setrvačnosti zaostávat za skutečnou změnou rychlosti. Proto se tento režim využívá hlavně při měření teploty a teplotních změn proudící tekutiny. [11]



Obr. 2.4.2 Schéma zapojení režimu CCA [7]

2.4.3. Anemometrické sondy

Pro měření jsou k dispozici čtyři základní typy sond: miniaturní drátkové (Miniature wires), zlacené drátkové (Gold-plated wires), vláknové filmové nebo filmové sondy (Fibre-film or Film sensor). Drátkové sondy tvoří odporový drátek, který funguje jako senzor. Sondy mají až tři drátky, přičemž počet drátků určuje, kolik složek vektoru rychlosti proudění se dá měřit. Senzory reagují jak na velikost, tak na směr vektoru rychlosti, ale informaci o obou lze získat pouze, když jsou dva nebo více senzorů umístěny pod různými úhly k vektoru rychlosti proudění. [12]



Obr. 2.4.3 základní typy anemometrických sond

(a) miniaturní, (b) zlacená, (c) vláknová filmová, (d) filmová sonda [12]

2.4.4. Drátkové sondy

Miniaturní drátkové sondy tvoří odporový drátek o průměru $5\ \mu\text{m}$ a délce $1,25\ \text{mm}$, vyráběný z povlakovaného wolframu. Drátek je natažený mezi dvěma hroty, přičemž celá délka drátku funguje jako senzor. Sondy se dají snadno opravit a ze všech typů jsou nejlevnější. Používají se pro většinu měření proudění s nízkou intenzitou turbulence. [13]

Drátek zlacených sond je vyráběný z wolframu potažený tenkou vrstvou platiny. Drátek je dlouhý $3\ \text{mm}$ s aktivní délkou čidla $1,25\ \text{mm}$, konce drátku jsou potažené vrstvou

mědi a zlata. Účelem této vrstvy je snížit množství tepla rozptýleného hroty a přesně definovat snímací délku. Sondy jsou určeny pro měření ve vysoko-turbulentních proudech. [14]

2.4.5. Součinitel přehřátí sondy

Důležitým parametrem drátkové sondy je teplota senzoru, protože ovlivňuje jak životnost sondy, tak její citlivost na změny rychlosti a teploty okolí. Teplotu senzoru definuje součinitel přehřátí sondy a . [15] Je definován jako poměr odporů dle vztahu:

$$a = \frac{R_{\text{SENSOR}} - R_0}{R_0} \quad (2.4.8)$$

kde R_{SENSOR} odpor senzoru při provozní teplotě a R_0 odpor senzoru při referenční teplotě T_0 (měřeno v režimu „stand-by“). [12]

2.4.6. Filmové sondy

Filmové sondy se používají pro měření v kapalinách při nízkých a středních rychlostech a v plynech. Jsou podstatně odolnější než drátkové sondy a méně citlivé na znečištění. Senzory tvoří tenký niklový film nanesený na křemenném podkladu. Podklad má tvar aerodynamicky tvarovaných těles, klínů nebo kuželů. [16]

Senzory vláknových sond jsou válcová tenkovrstvá křemenná vlákna o průměru 70 μm , 3 mm dlouhá, pokrytá tenkým niklovým filmem. Lze je použít jako náhradu za drátkové sondy v kapalinách nebo v plynových aplikacích, kde jsou zapotřebí robustnější sondy. Jsou podstatně odolnější než drátkové sondy a méně citlivé na znečištění. [17]

2.4.7. Kalibrace sond

Jedním z nejdůležitějších aspektů termoanemometrie je přesná interpretace signálu anemometru. Účelem kalibrace je co nejpřesnější stanovení vztahu mezi výstupním napětím anemometru a uvažovanou fyzikální vlastností (obvykle rychlostí). [18] Kalibruje se ve speciálním kalibrátoru nebo v aerodynamickém tunelu, kdy je sonda vystavena řadě proudění o známé rychlosti U , při kterých se zaznamenává napětí na sondě E . Prostřednictvím kalibračních vztahů se nezpracovaná kalibrační data (U, E) proloží křivkou a vypočítají se kalibrační konstanty (A, B, C, \dots) . [19]

Pro kalibraci se nejčastěji používají následující vztahy dle [9]:

$$\text{Kingův zákon} \quad E^2 = A + BU^n \quad (2.4.9)$$

$$\text{Rozšířený Kingův zákon} \quad E^2 = A + BU^{0,5} + CU \quad (2.4.10)$$

$$\text{Proložení polynomicke křivky} \quad U = A + BE^2 + C(E^2)^2 + D(E^2)^3 + \dots \quad (2.4.11)$$

$$\text{Proložení polynomicke křivky} \quad U = AE^0 + BE^2 + CE^3 + DE^4 + \dots NE^N \quad (2.4.12)$$

Kingův zákon úzce souvisí s velikostí Re – Reynoldsova čísla, podle něhož se také stanovuje velikost exponentu n . King určil velikost exponentu $n = 0,5$, později však Collins s Williamsem prokázali, že pro nižší hodnoty Reynoldsova čísla lépe odpovídá hodnota exponentu $n = 0,45$. Exponent byl dále upravován a pokládá se za proměnný parametr. Pro drátkové sondy o průměru drátku $5 \mu\text{m}$ je hodnota exponentu v rozmezí $n = 0,4 \div 0,45$. [9]

2.4.8. Výhody termoanemometrie

Termoanemometrie má mnoho výhod jednou z nich je cena, která je v porovnání s ostatními konkurenčními metodami poměrně nízká. Dalšími výhodami jsou vysoká frekvenční odezva, snadné použití a malé rozměry sond. Kromě toho také vynikající citlivost při nízké rychlosti, dobré prostorové rozlišení a výstupní signál ve formě rozdílu napětí pro pohodlnou analýzu dat. Celkově vzato se jedná o jeden z nejflexibilnějších nástrojů dostupných pro výzkum v mechanice tekutin. [15]

2.4.9. Nevýhody termoanemometrie

Hlavní nevýhodou je přítomnost sondy přímo v proudící tekutině, která může značně ovlivnit měření. Další nevýhody souvisí s nastavením součinitele přehřátí sondy. Při měření ve vodě může docházet vlivem nastavení příliš vysokého poměru přehřátí k varu kapaliny a tím k tvorbě bublinek na drátku sondy. Tyto bublinky znemožňují přestup tepla a výrazně ovlivňují měření. [7]

2.4.10. Určení směru proudění

Měřením rychlosti, užitím termoanemometrie, lze získat hodnotu rychlosti pouze jako absolutní hodnotu, tzn., že naměřené hodnoty jsou vždy kladné. Ovšem v případech,

kdy dochází ke změně směru proudění např. při měření v blízkosti stěny, kde může docházet ke zpětným vírům, nebo v případě proudění typu Synthetic Jet, který se skládá z nasávání a vyfukování tekutiny z trysky, musejí být určeny rychlosti, odpovídající směru, kterým se tekutina pohybuje. Pro jednotlivé typy proudění se tyto situace upravují pomocí vlastních algoritmů. [9]

2.5. Nejistoty měření

Při jakémkoli měření není možné zcela dosáhnout dokonale přesných výsledků, díky přítomnosti negativních vlivů. Tyto vlivy vedou k odchylce mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Proto se v praxi setkáváme s pojmem nejistota měření, jenž vymezuje interval, ve kterém se očekává přítomnost skutečné měřené hodnoty.

Nejistoty měření jsme zpracovali podle postupu uvedeného v [12].

2.5.1. Celková nejistota měření

Celková nejistota měření U_{tot} kombinuje příspěvky dílčích nejistot $u(y_i)$ z každé jednotlivé vstupní proměnné x_i při dané úrovni spolehlivosti, z čehož plyne vztah $y_i = f(x_i)$, který říká, že vstupní veličina y_i je funkcí vstupních veličin x_i . Relativní standardní nejistotu stanovíme jako:

$$u(y_i) = \frac{1}{y_i} \cdot S \cdot \left(\frac{\Delta x_i}{k_i} \right) \quad (3.8.1)$$

kde k_i je faktor pokrytí a S je faktor citlivosti pro který platí vztah:

$$S = \frac{\partial y_i}{\partial x_i} \quad (3.8.2)$$

Při použití Gaussova rozdělení se požadované úrovně spolehlivosti dosáhne vynásobením standardní nejistoty koeficientem pokrytí $k = 2$. Celková rozšířená nejistota pak je:

$$U_{\text{tot}} = 2 \cdot \sqrt{\sum u(y_i)^2} \quad (3.8.3)$$

2.5.2. Vliv anemometru

Anemometry mají obecně velmi dobrý signál s nízkou hodnotou šumu a nejistota vyvolaná těmito faktory je v porovnání s jinými zdroji chyb nepodstatná.

2.5.3. Kalibrace

Kalibrace samotná, ať už je prováděna jakkoli, představuje hlavní zdroj nejistot. Nejistota je stochastická (náhodná) s normálním rozdělením a vzniká díky nepřesnému měření tlaku. Standardní relativní nejistotu lze určit dle vztahu:

$$U_{\text{cal}} = \frac{1}{100} \cdot STDV(U_{\text{calibrator}}(\%)) \quad (3.8.4)$$

Přičemž platí:

$$STDV(U_{\text{calibrator}}(\%)) = \pm a(\%) + b_{\text{cal}}(m/s) \quad (3.8.5)$$

2.5.4. Linearizace

Nejistota způsobená linearizací vychází z chyb vzniklých při prokládání kalibračních bodů křivkou. Lze ji vyjádřit vztahem:

$$U_{\text{lin}} = \frac{1}{100} \cdot STDV(\Delta U_{\text{lin}}(\%)) \quad (3.8.6)$$

kde $STDV(\Delta U_{\text{lin}}(\%))$ je standardní odchylka chyb přizpůsobení křivky v kalibračních bodech.

2.5.5. Rozlišení A/D převodníku

V případě A/D převodníku se jedná o náhodnou nejistotu s čtvercovým rozdělením a lze ji vyjádřit jako:

$$U_{\text{res}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{E_{\text{AD}}}{2^n} \cdot \frac{\partial U}{\partial E} \quad (3.8.7)$$

kde E_{AD} je vstupní rozsah desky A / D převodníku, n je jeho rozlišení v bitech, U rychlost a $\partial U / \partial E$ je faktor citlivosti inverzní kalibrační křivky.

2.5.6. Nejistota polohy sondy

Nejistota souvisí s odlišnou polohou sondy při kalibraci a experimentu. Standardně lze nejistotu vypočítat ze vztahu:

$$U_{\text{pos}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (1 - \cos \theta) \quad (3.8.8)$$

kde θ je úhel změny sklonu sondy.

2.5.7. Změna teploty drátku

Proměnlivost teploty od kalibrace po experiment přináší do experimentu systematické chyby. Tato nejistota se dá eliminovat pomocí teplotní úpravy. Bez teplotní úpravy přispívá jako stochastická nejistota s obdélníkovým rozložením a je dána vztahem:

$$U_{\text{temp}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{\Delta T}{T_{\text{SENSOR}} - T_0} \cdot \left(\frac{A}{B} \cdot U^{-0,5} + 1 \right)^{0,5} \quad (3.8.9)$$

kde T_{SENSOR} je teplota senzoru, T_0 referenční teplota okolí a ΔT je rozdíl mezi referenční teplotou okolí a teplotou během měření.

2.5.8. Vliv teploty na hustotu vzduchu

Teplota vzduchu má přímý vliv na hustotu, která se s rostoucí teplotou snižuje. Vzniklá nejistota je pak stochastická s pravoúhlým rozložením a určí se jako:

$$U_{\rho,T} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta T}{273} \quad (3.8.10)$$

2.5.9. Vliv tlaku na hustotu vzduchu

Také změna okolního tlaku ovlivňuje hustotu a tím i vypočítanou rychlost. Přispívá jako stochastická nejistota s obdélníkovým rozdělením s následující relativní standardní nejistotou:

$$U_{\rho,P} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{P_0}{P_0 + \Delta P} \right) \quad (3.8.11)$$

kde P_0 je referenční atmosférický tlak a ΔP je rozdíl mezi referenčním a skutečným tlakem.

2.5.10. Změna složení vzduchu, vliv vlhkosti

Složení vzduchu se během experimentu téměř nemění, měnit se však může vlhkost, jež ovlivňuje přenos tepla. Změna vlhkosti vede ke stochastické nejistotě s obdélníkovým rozdělením, které má relativní standardní příspěvek:

$$U_{\text{hum}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{U} \frac{\partial U}{\partial P_{\text{wv}}} \cdot \Delta P_{\text{wv}} \quad (3.8.12)$$

kde ΔP_{wv} je změna tlaku vodní páry.

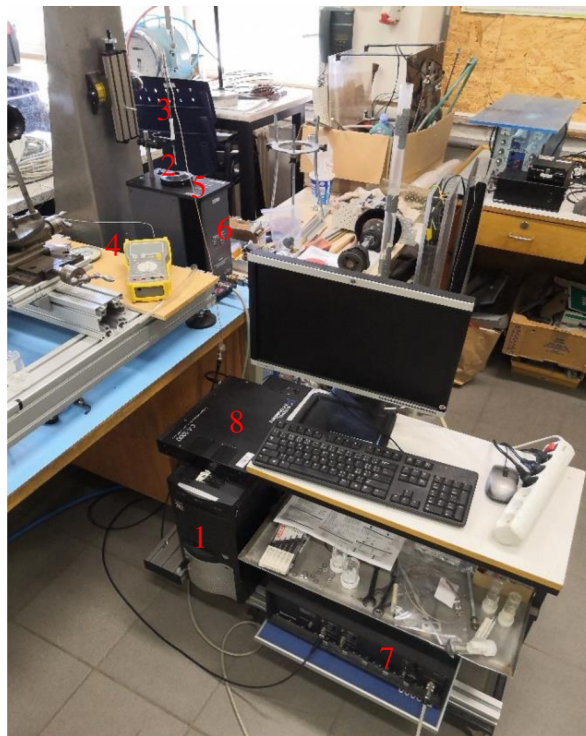
Vliv na přenos tepla je velmi malý a při změně ΔP_{wv} o 1 *kPa* platí:

$$\frac{\partial U}{\partial P_{\text{wv}}} \approx 0,01 \cdot U \quad (3.8.13)$$

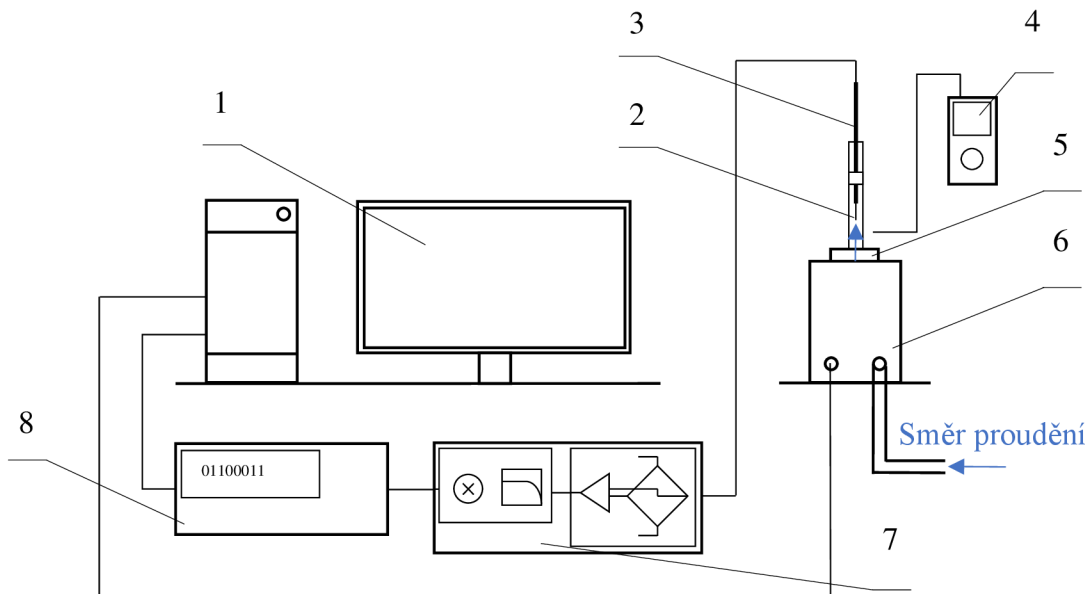
3. Rozbor úlohy a metody řešení

3.1. Experimentální zařízení

Měření popsané v této práci bylo provedeno na termoanemometru zapojeném v režimu konstantní teploty (CTA), který se nachází v laboratoři katedry energetických zařízení. Experiment je zobrazen na Obr. 3.1.1, jeho schéma pak na Obr. 3.1.2. Skládá se z počítače (1) s měřícím softwarem StreamWare, ve kterém se nastavuje anemometr a další měřicí parametry. Dále z drátkové sondy (2) a držáku sondy (3), v němž je sonda zasunuta. Sonda je pomocí propojovacích kabelů zapojena do CTA modulu anemometru s označením 90C10 (7) od firmy Dantec. Data z anemometru jsou ve formě spojitého (analogového) signálu, se kterými moderní počítače nedokáží pracovat a je tak potřeba je převést na signál diskretní (digitální). K tomu slouží A/D převodník (8), jenž anemometr propojuje s počítačem. Počítač je dále spojen s kalibračním zařízením (6) regulujícím hodnotu tlaku tekutiny. Do kalibračního zařízení je pomocí hadic přiváděn suchý vzduch z kompresoru, který je následně vyfukován tryskou kalibrátoru (5). Teplota vzduchu z trysky se může měnit a pro přesné určení této teploty je součástí experimentu také termočlánek (4), který tuto teplotu měří.



Obr. 3.1.1 Experimentální zařízení



Obr. 3.1.2 Schéma experimentálního zařízení

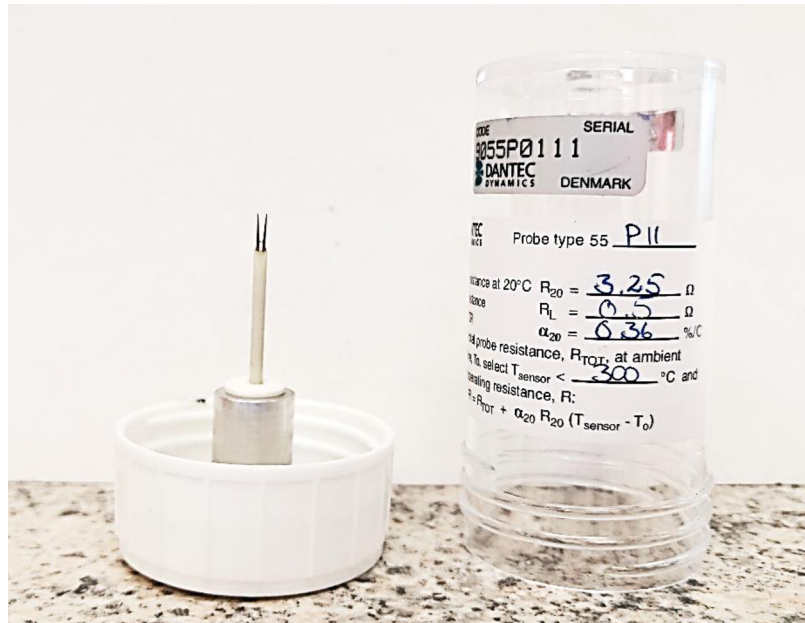
3.2. Rozbor úlohy

Na počátku bylo potřeba správně sestavit experimentální zařízení. Po jeho sestavení jsme vybrali sondu pro experiment. Použili jsme přímou jednodrátkovou sondu typ 55P11 od firmy Dantec. Sondu jsme zasunuli do držáku sondy, který jsme následně připevnili nad trysku kalibračního zařízení. V našem experimentu nebyla sonda kalibrována, jelikož jsme primárně neměřili rychlost proudění vzduchu z trysky, ale hodnoty měnících se odporů v obvodu. Kalibrační zařízení tak sloužilo pouze pro vyfukování vzduchu z kalibrační trysky. Velikost odporů v obvodu byla nastavena v závislosti na součiniteli přehřátí, jehož hodnotu jsme předem definovali v měřícím softwaru StreamWare na počítači. Konkrétně jsme naše měření prováděli pro pět rozdílných součinitelů přehřátí od hodnoty 0,4 do hodnoty 0,8 s krokem 0,1. Pro tyto hodnoty přehřátí jsme dále prostřednictvím kalibračního cyklu změřili napětí na sondě v závislosti na rychlosti vzduchu z trysky kalibrátoru pro rozmezí rychlostí (1 až 40) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro přesné definování experimentu bylo nutné přesně změřit teplotu vzduchu z trysky, na což jsme použili externí předem zkalibrovaný termočlánek.

3.3. Popis sondy

Pro měření v režimu CTA jsme použili sondu Dantec typ 55P11, viz Obr. 3.3. Jedná se o přímou miniaturní jednodrátkovou sondu, jejíž drátek je tvořen z wolframu o délce

1,25 mm s průměrem 5 μm . Sonda má předem stanovenou řadu parametrů, které jsou uvedeny na obalu. V našem případě:



Obr. 3.3 Sonda 55P11

Odpor senzoru při teplotě 20 °C	$R_{20} = 3,25 \Omega$
Odpor vedení	$R_L = 0,5 \Omega$
Koeficient tepelného odporu	$\alpha_{20} = 0,36 \% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Maximální pracovní teplota senzoru	$T_{\text{SENSOR}} < 300 \text{ }^\circ\text{C}$

3.4. Kalibrace termočlánku

Pro správné a přesné měření je důležité správně zkalibrovat měřící zařízení. Každý teplotní senzor je nepatrně odlišný a účelem kalibrace je tyto rozdíly eliminovat. K provedení kalibrace je nutné zařízení, které udržuje stabilní teplotu prostředí, aby se obě zařízení mohla přizpůsobit teplotnímu bodu. V našem případě jsme termočlánek kalibrovali prostřednictvím kalibrační pece Jofra ATC – 650 B (z AJ Advance Temperature Calibrator), která celý kalibrační cyklus řídila automaticky pomocí integrované řídicí jednotky.

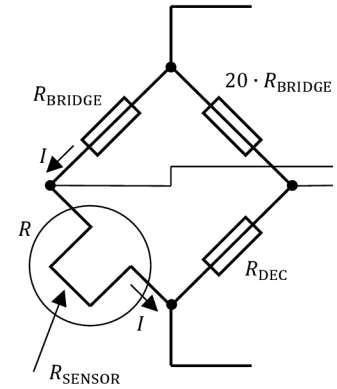
3.5. Data získaná měřením

Na našem experimentálním zařízení nelze součinitel přestupu tepla změřit, vzhledem k jeho závislosti na spoustě proměnných. Lze jej však vypočítat prostřednictvím dat

obdržených z měření, postupem popsaným v další podkapitole. Pro konkrétní součinitel přehřátí jsme měřením obdrželi hodnoty odporů potřebné pro výpočet. Tedy velikosti R_{DEC} dekádového odporu, R_{TOT} totálního odporu při referenční teplotě T_0 a odporu senzoru R_0 při referenční teplotě T_0 . Dále pak R_{CABLE} odpor kabelů a podpory, který ovšem pro všechna měření zůstal neměnný.

3.6. Zpracování naměřených dat

Cílem bylo z naměřených dat určit Nusseltovo číslo a součinitel přestupu tepla. Při výpočtu součinitele přestupu tepla jsme vycházeli ze vztahu (2.4.1) pro Joulovo teplo a rovnice základní tepelné bilance elementu sondy (2.4.2). V rovnici základní tepelné bilance jsme zanedbávali tepelný tok odvedený kondukcí, tepelný tok odvedený radiací a tepelný tok akumulovaný na sondě, jelikož hodnoty těchto tepelných toků jsou řádově menší a na výsledek nemají zásadní vliv. Po spojení těchto vztahů a dosazení vztahu pro výpočet tepelného toku odvedeného konvekcí (2.4.3) jsme dostali vztah (2.4.5). Z tohoto vztahu jsme následně vyjádřili součinitel přestupu tepla h ve tvaru:



Obr. 3.6 Wheatstoneův můstek v režimu CT

$$h = \frac{I^2 R_{\text{SENSOR}}}{\pi d_{\text{SENSOR}} l_{\text{SENSOR}} (T_{\text{SENSOR}} - T_{\text{AMBIENT}})} \quad (3.6.1)$$

kde I je proud procházející sondou, R_{SENSOR} je odpor senzoru, d_{SENSOR} je průměr drátku sondy, l_{SENSOR} je délka drátku sondy, T_{SENSOR} je teplota senzoru. Ve jmenovateli nadále vystupuje teplota T_{AMBIENT} , tj. teplota okolního vzduchu vyfukovaného tryskou, kterou jsme v našem experimentu měřili pomocí termočlánu. Proud I procházející sondou jsme určili ze zapojení Wheatstonova můstku v režimu CT (Obr. 3.5) jako:

$$I = \frac{E}{R + R_{\text{BRIDGE}}} \quad (3.6.2)$$

kde E je naměřené napětí na drátku sondy, R je celkový odpor spodní větve Wheatstonova můstku a R_{BRIDGE} trvale nastavený odpor horní větve na hodnotě 20Ω . Ze znalostí parametřů sondy a z naměřených dat jsme určili celkový odpor spodní větve R , jehož vztah pro výpočet je uveden na obalu sondy. Tedy:

$$R = R_{\text{TOT}} + \alpha_{20} R_{20} (T_{\text{SENSOR}} - T_0) \quad (3.6.3)$$

kde R_{TOT} je odpor sondy včetně vedení při referenční teplotě T_0 , α_{20} koeficient tepelného odporu a R_{20} je odpor sondy při teplotě 20 °C. Teplotní rozdíl $T_{\text{SENSOR}} - T_0$ jsme stanovili pomocí vztahu dle [12]:

$$T_{\text{SENSOR}} - T_0 = \frac{a}{\alpha_{20}} \quad (3.6.4)$$

kde a je součinitel přehřátí sondy. Z tohoto vztahu jsme pak jednoduchou úpravou určili teplotu senzoru jako:

$$T_{\text{SENSOR}} = \frac{a}{\alpha_{20}} + T_0 \quad (3.6.5)$$

Ze zapojení Wheatstonova můstku v režimu CT viz Obr. 3.6 je patrný vztah (3.6.5), který může sloužit jako kontrola správnosti výpočtu.

$$\frac{R_{\text{DEC}}}{20} = R \quad (3.6.6)$$

kde R_{DEC} je dekádový odpor. Poslední neznámou vyskytující se ve vztahu (3.6.1), kterou je nutné vypočítat je odpor senzoru R_{SENSOR} . Ten jsme vypočetli pomocí vztahu (2.4.8), který jsme upravili do následující podoby:

$$R_{\text{SENSOR}} = R_0 (a + 1) \quad (3.6.7)$$

kde R_0 je odpor senzoru při referenční teplotě T_0 . Pomocí výše uvedených vztahů jsme následně vypočítali součinitel přestupu tepla při konvekčním přenosu a pomocí vztahu (2.3.8) pak Nusseltovo číslo.

3.7. Postup obecného výpočtu

Výpočet spočívá v určení Nu – Nusseltova čísla z obecné kriteriální rovnice ze vztahu (2.3.1), která v našem případě ustáleného proudění při nucené konvekci přejde do vztahu (2.3.2). Tomuto stavu a našemu experimentu velmi slušně odpovídá Churchill–Bernsteinova rovnice:

$$\overline{Nu} = 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad (3.7.1)$$

platnost rovnice je pro $Pr Re \geq 0,2$

Tato rovnice nese název po Stuart W. Churchillovi a M. Bernsteinovi, kteří tuto rovnici představili ve své práci „*A Correlating Equation for Forced Convection From Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Crossflow*“ z roku 1977 [20]. Jak název práce napovídá, jedná se o rovnici pro výpočet Nusseltova čísla pro válec s příčným tokem tekutiny při nucené konvekci. V rovnici vzhledem ke konvektivnímu přenosu při nucené konvekci vystupuje Reynoldsovo číslo (Re) a Prandtlovo číslo (Pr), která jsme vypočítali ze vztahů (2.3.4) a (2.3.7). Vztahy použité pro výpočet Re a Pr se skládají z materiálových vlastností jako je např. tepelná vodivost vzduchu λ , kinematická viskozita ν atd. Všechny tyto vlastnosti jsou závislé na filmové teplotě T_f , která se vypočte pomocí vztahu:

$$T_f = \frac{T_{\text{SENSOR}} + T_{\text{AMBIENT}}}{2} \quad (3.7.2)$$

kde T_{SENSOR} je teplota senzoru a T_{AMBIENT} je teplota okolního vzduchu vycházejícího z trysky. Všechny hodnoty materiálových vlastností jsme vyhledávali v tabulkách [21].

3.8. Výpočet nejistot měření

Tak jako v praxi nenalezneme žádnou měřicí metodu, žádný měřicí proces, jenž by se neobešel bez negativních vlivů způsobujících nejistoty měření, tak i v našem experimentu některé negativní vlivy působí. Veškeré tyto negativní vlivy, působící při měření v CT režimu jsou popsány v kapitole 2.5, ze které jsme pomocí vztahů v kapitole uvedených spočítali jednotlivé negativní vlivy a celkovou relativní nejistotu. Přehled nejistot podílejících se procentuálním dílem na celkové nejistotě je uveden v tabulce 3.8. Tabulku jsme zpracovali pro hodnoty součinitele přehřátí $\alpha = 0,4$ a pro rozsah rychlostí $w = (1 \text{ až } 40) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

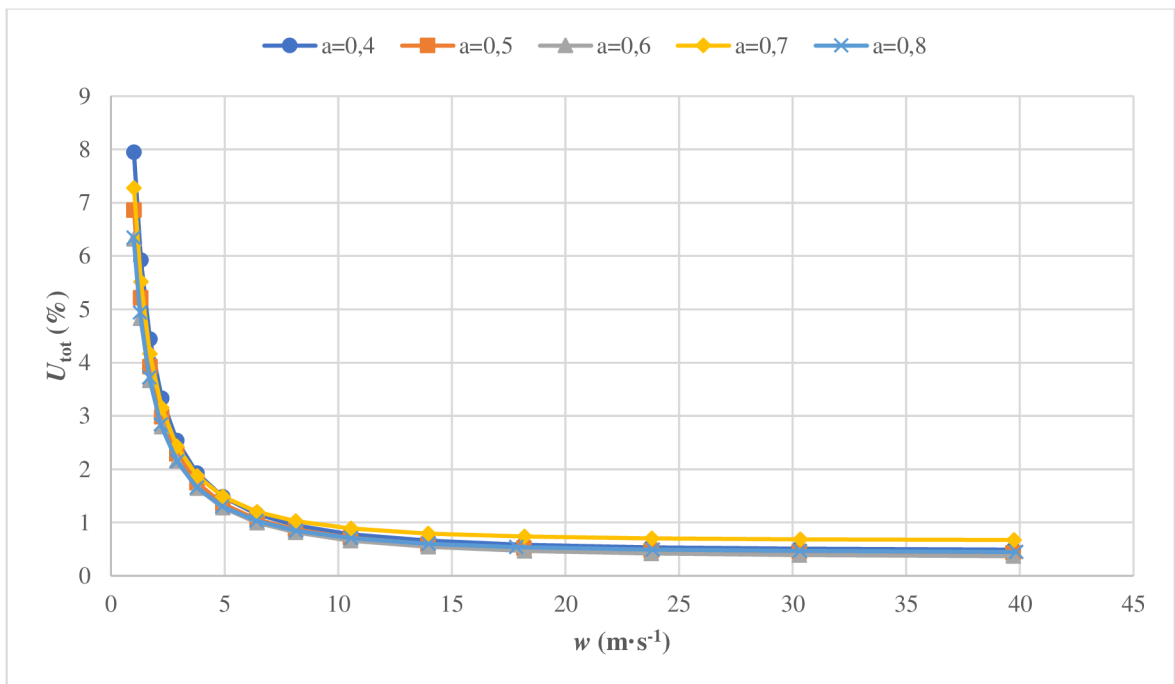
V našem experimentu je celková relativní nejistota poměrně nízká, což je zapříčiněno zanedbáním některých dílčích nejistot. Hlavní zanedbanou nejistotou je nejistota od kalibrace, která má ve většině případů na celkové nejistotě největší podíl. Na celkové

nejistotě se neprojeví ani nejistota od linearizace, jelikož vychází z kalibrace a je s ní úzce spojena. Vzhledem k tomu, že jsme sondu během experimentu nepřesouvali, tak jsme ve výpočtu zanedbali také nejistotu polohy sondy. Poslední nejistotou, která se na celkové nejistotě nepodílí, je vzhledem k rychlosti provedení našeho experimentu nejistota způsobená vlivem vlhkosti na směs vzduchu.

Tab. 3.8 Výpočet relativní nejistoty pro součinitel přehřátí 0,4 a rychlost (1 až 40) $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

w ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	U_{cal} (%)	U_{lin} (%)	U_{res} (%)	U_{pos} (%)	U_{temp} (%)	$U_{\rho,T}$ (%)	$U_{\rho,P}$ (%)	U_{hum} (%)	U_{tot} (%)
1,01	0	0	2,86	0	2,74	0,23	0,006	0	7,95
1,32	0	0	2,19	0	1,97	0,23	0,006	0	5,92
1,71	0	0	1,68	0	1,42	0,23	0,006	0	4,44
2,24	0	0	1,29	0	1,02	0,23	0,006	0	3,33
2,89	0	0	0,99	0	0,75	0,23	0,006	0	2,54
3,78	0	0	0,76	0	0,53	0,23	0,006	0	1,92
4,91	0	0	0,58	0	0,39	0,23	0,006	0	1,48
6,42	0	0	0,42	0	0,28	0,23	0,006	0	1,16
8,12	0	0	0,35	0	0,21	0,23	0,006	0	0,95
10,53	0	0	0,27	0	0,15	0,23	0,006	0	0,78
13,98	0	0	0,20	0	0,11	0,23	0,006	0	0,66
18,16	0	0	0,15	0	0,08	0,23	0,006	0	0,58
23,74	0	0	0,12	0	0,05	0,23	0,006	0	0,53
30,27	0	0	0,09	0	0,04	0,23	0,006	0	0,51
39,70	0	0	0,07	0	0,03	0,23	0,006	0	0,49

Z tabulky a z grafu viz Obr. 3.8.1 je zřejmé, že při nízkých rychlostech je celková relativní nejistota největší. Ovšem se zvyšováním rychlosti dochází v této oblasti k velmi rychlému poklesu celkové nejistoty. Pak se již hodnota nejistoty zmenšuje pouze minimálně. Dále je z grafu patrné že součinitel přehřátí a nemá na nejistotu žádný vliv.



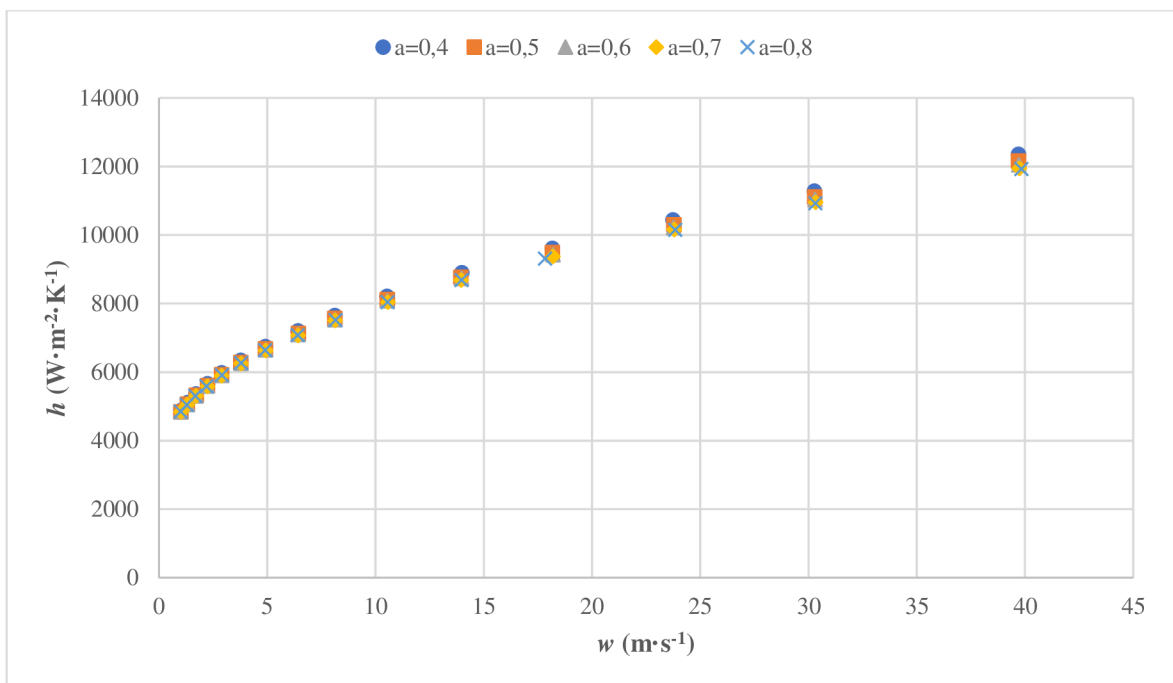
Obr. 3.8 Grafická závislost celkové relativní nejistoty na rychlosti

4. Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze

Výsledkem měření jsou data získaná z měřicího softwaru StreamWare, která jsme exportovali do programu Microsoft Excel, kde jsme provedli náležité výpočty a vytvořili grafy. Vzhledem k vysokému počtu naměřených dat a výpočtů zde nejsou tato data prezentována, ale jsou zde zaznamenány pouze jejich grafické závislosti, které lépe popisují výsledky našeho experimentu.

4.1. Měření součinitele přestupu tepla

Měření součinitele přestupu tepla jsme prováděli pro pět hodnot součinitele přehřátí $a = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ a pro 15 rychlostí v intervalu $w = (1 \text{ až } 40) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V grafu Obr. 4.1 je znázorněna závislost součinitele přestupu tepla h na rychlosti proudícího vzduchu w . Je zde možné pozorovat, že součinitel přehřátí nemá na hodnotu součinitele přestupu tepla výrazný vliv. Z grafu je také patrný postupný nárůst součinitele přestupu tepla, společně se zvyšující se rychlostí proudícího vzduchu. Vlivem intenzivnější výměny dopadajících částic, jež jsou na drátku sondy ohřívány a následně nahrazovány studenějšími, dochází ke zvyšování součinitele přestupu tepla společně s rychlostí.

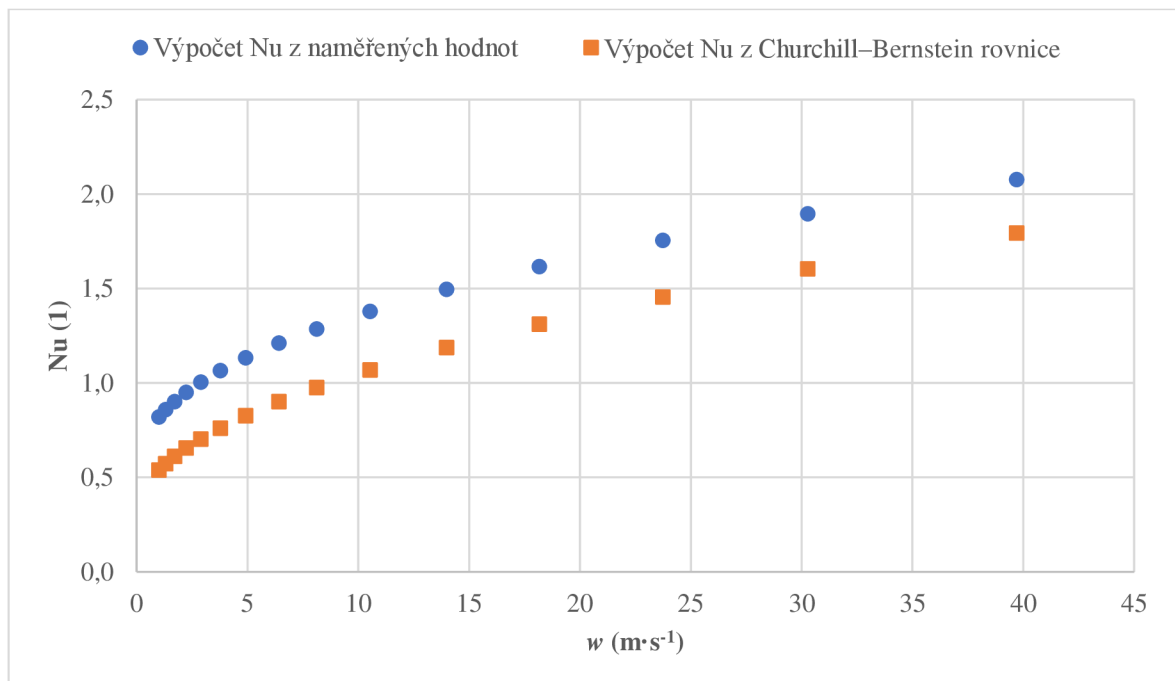


Obr. 4.1 Grafická závislost součinitele přestupu tepla na rychlosti proudění

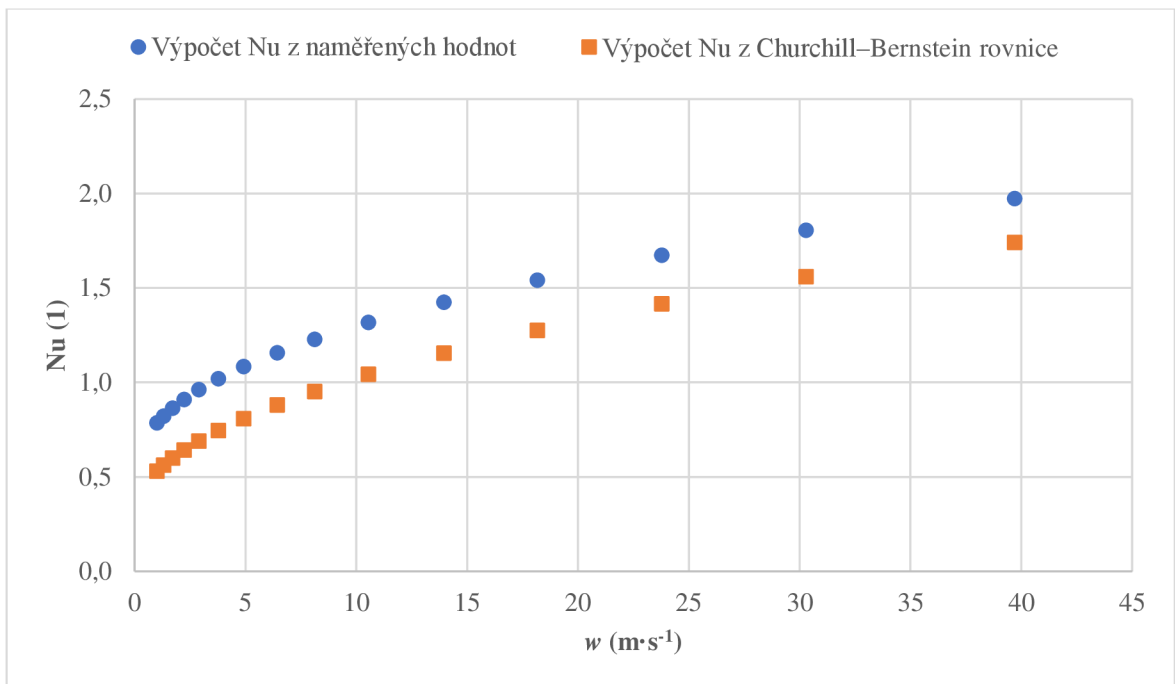
Bod kolem rychlosti $\pm 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro součinitel přehřátí $a = 0,8$, je mírně posunut doleva od ostatních, což je zapříčiněno iterací (nastavením) rychlosti prováděné měřícím softwarem.

4.2. Výpočet Nusseltova čísla

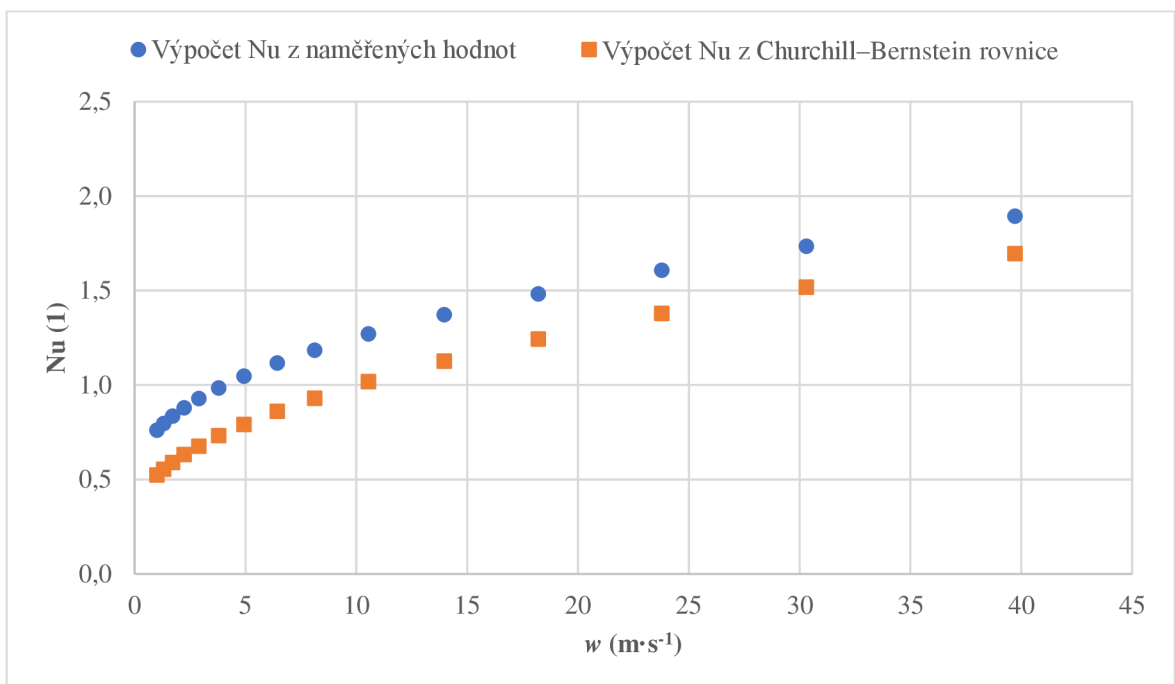
Nusseltovo číslo jsme vypočítali prostřednictvím dvou různých metod. Jednak z dat, která jsme získali měřením a dále pomocí obecné rovnice od Churchill–Bernsteina. Na následujících grafech Obr. 4.2.1 až 4.2.5 došlo k porovnání obou použitých metod výpočtu, při stejných rychlostech. Ve všech grafech je vidět stejný styl stoupání obou křivek, které jsou od sebe navzájem posunuté o nějakou odchylku. V prvním grafu (viz Obr. 4.2.1) dosahuje největší odchylka lehce přes 15 %, s postupným zvyšováním součinitele přehřátí se však odchylka více zmenšuje a v posledním grafu Obr. 4.2.5 se hodnota odchylky pohybuje kolem 11 %. Tato odchylka je způsobena několika faktory. Zásadním faktorem je, že Churchill–Bernsteinova rovnice přímo neodpovídá našemu experimentu, ale slouží pouze pro odhad Nusseltových čísel. Dalším faktorem ovlivňujícím odchylku byl způsob našeho měření, který probíhal pro nízké hodnoty Re , kde měření začíná ovlivňovat vliv volné konvekce.



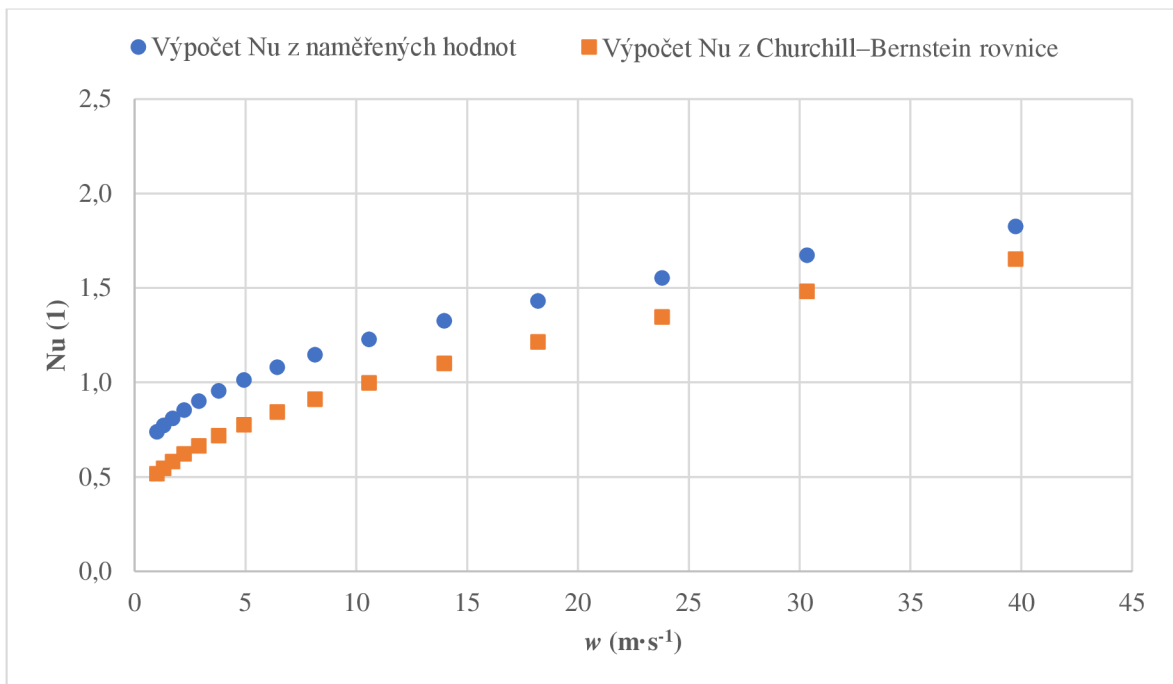
Obr. 4.2.1 Grafická závislost Nusseltova čísla na rychlosti proudění pro $a = 0,4$



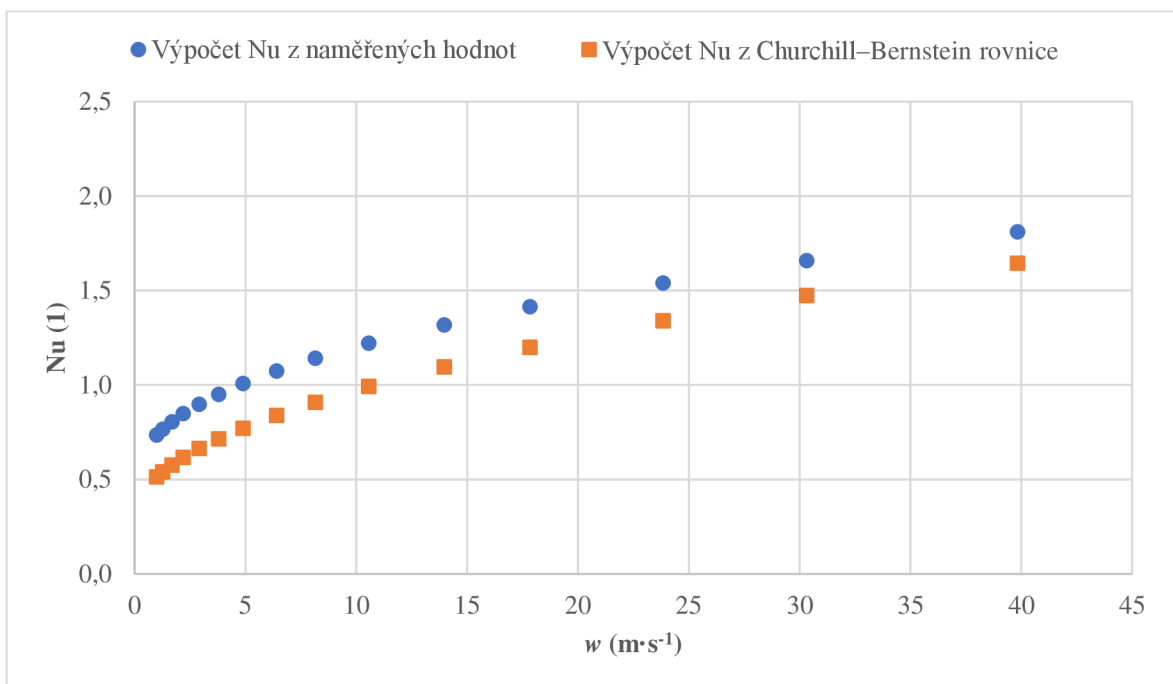
Obr. 4.2.2 Grafická závislost Nusseltova čísla na rychlosti proudění pro $\alpha = 0,5$



Obr. 4.2.3 Grafická závislost Nusseltova čísla na rychlosti proudění pro $\alpha = 0,6$



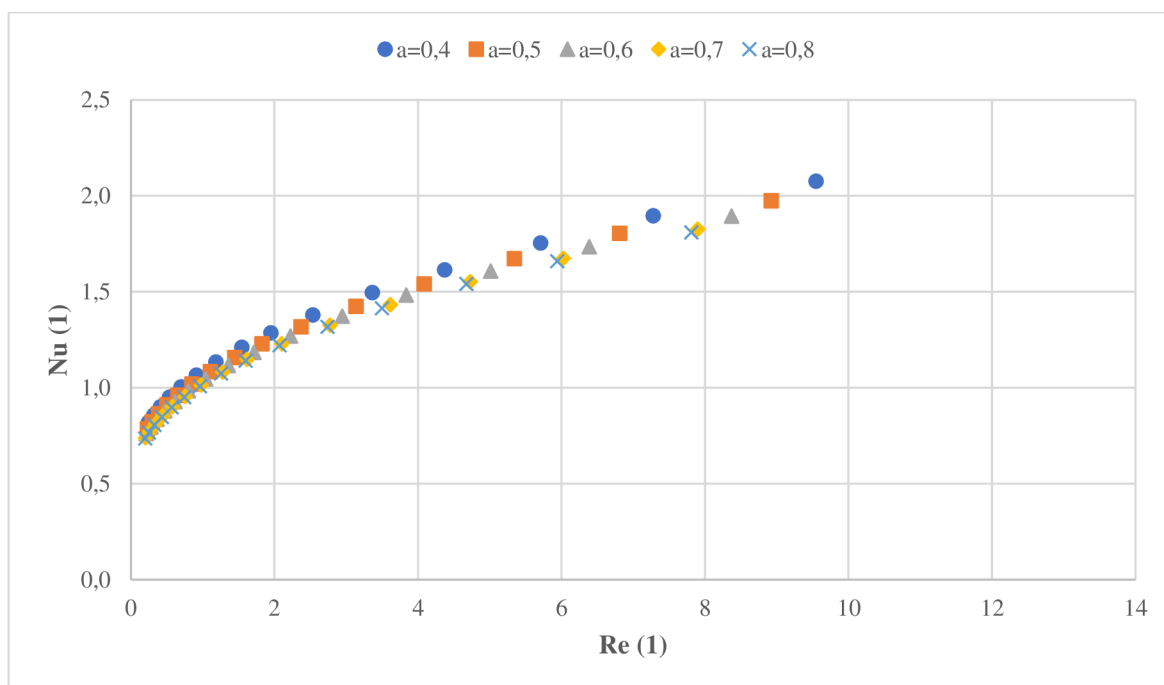
Obr. 4.2.4 Grafická závislost Nusseltova čísla na rychlosti proudění pro $\alpha = 0,7$



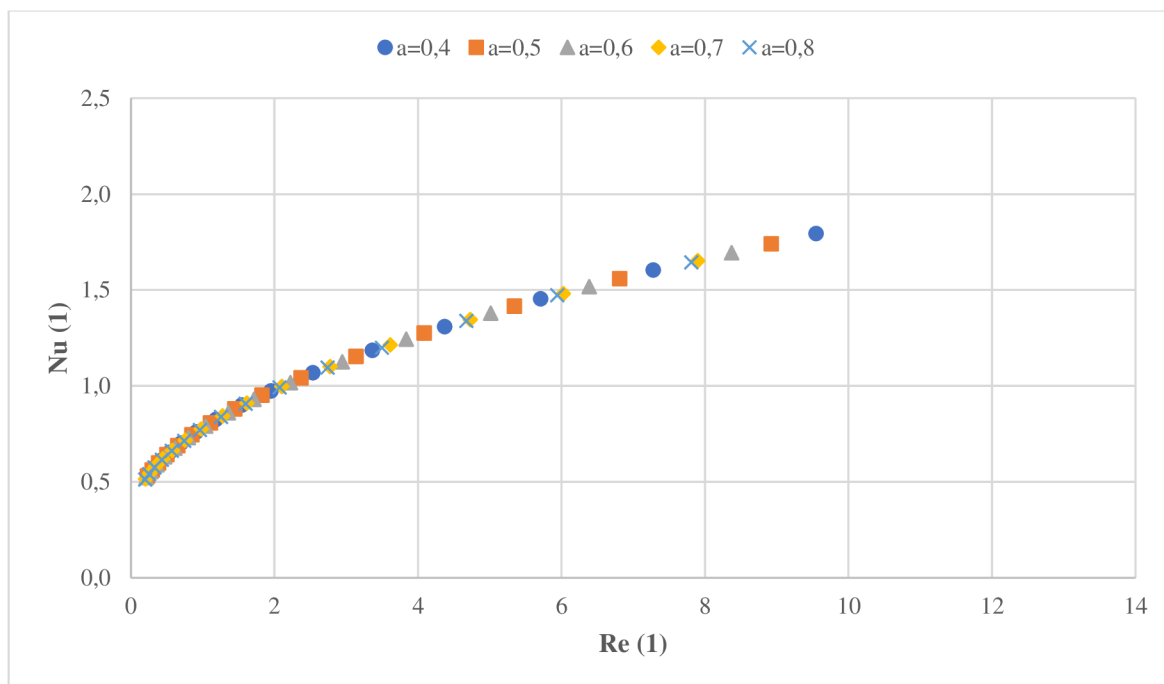
Obr. 4.2.5 Grafická závislost Nusseltova čísla na rychlosti proudění pro $\alpha = 0,8$

4.3. Porovnání Nusseltových čísel

V grafu na Obr. 4.1, je patrná určitá nezávislost na součiniteli přehřátí a , to ovšem při výpočtu Nusseltova a Reynoldsova čísla již neplatí a součinitel přehřátí zde hraje svoji roli. Ve své podstatě součinitel přehřátí definuje velikost teploty senzoru T_{SENSOR} . Čím vyšší je součinitel přehřátí, tím vyšší je i teplota senzoru. Prostřednictvím teploty senzoru se dále počítá filmová teplota T_f dle vztahu 3.7.2. Ze vztahu vyplývá, že se zvyšující se teplotou senzoru roste i filmová teplota. Filmová teplota je zcela určující parametr při výpočtu Nusseltova a Reynoldsova čísla, jelikož zásadním způsobem ovlivňuje hodnoty materiálových vlastností, které se vyskytují ve jmenovatelných vztazích pro výpočet Re a Nu . Konkrétně se jedná o tepelnou vodivost λ a ν kinematickou viskozitu, přičemž obě tyto hodnoty se s teplotou postupně zvyšují. Na obou grafech 4.3.1 a 4.3.2 lze pozorovat, že nejvyšších hodnot Nusseltova čísla dosahuje díky výskytu materiálových vlastností ve jmenovatelných výpočetních vztazích právě nejnižší měřený součinitel $a = 0,4$. Na oba grafy pro výpočet Nusseltova čísla jsme použili jiný výpočetní model. Zatímco první graf 4.3.1 jsme vytvořili na základě dat, která jsme získali měřením, druhý graf 4.3.2 jsme získali výpočtem Churchill–Bernsteinovy rovnice. Hodnoty Reynoldsova čísla zůstaly pro oba grafy neměnné.



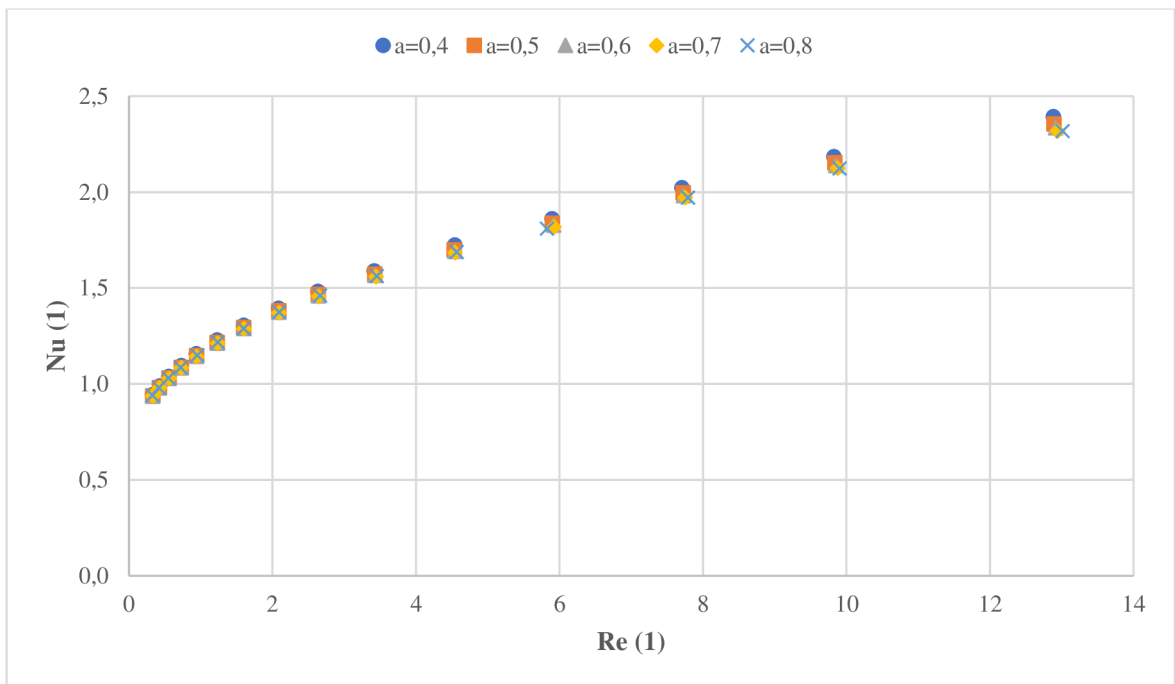
Obr. 4.3.1 Grafická závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově pro T_f , data získaná měřením



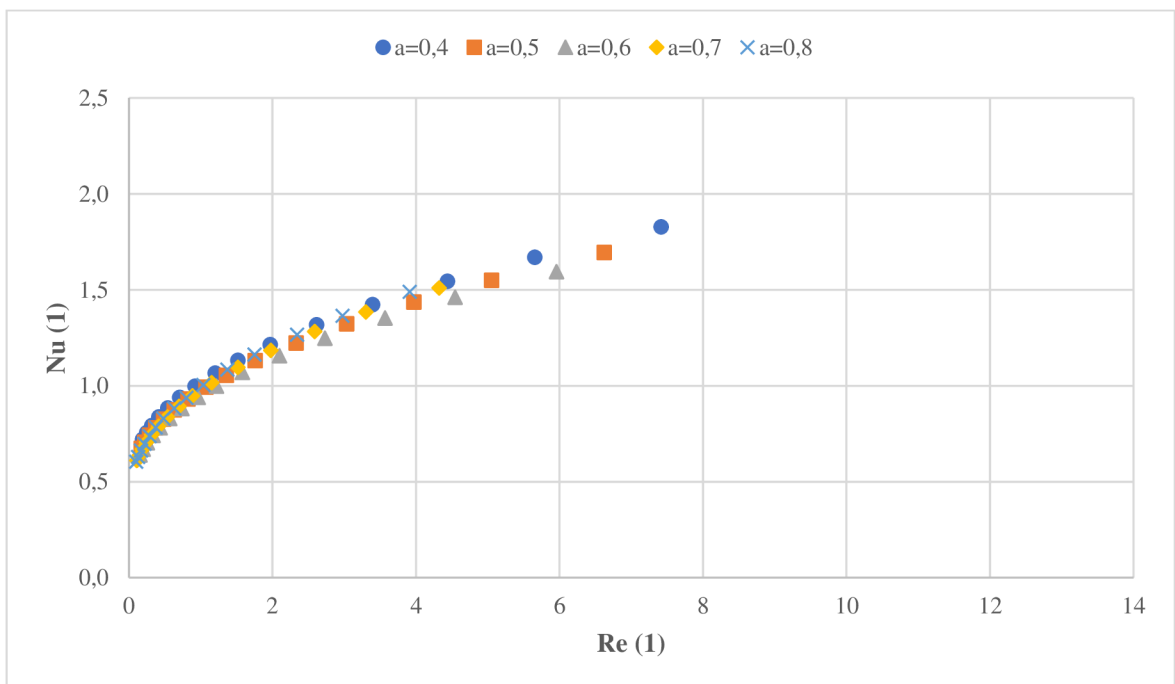
Obr. 4.3.2 Grafická závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově pro T_f , data získaná výpočtem Churchill–Bernsteinovy rovnice

4.4. Materiálové vlastnosti

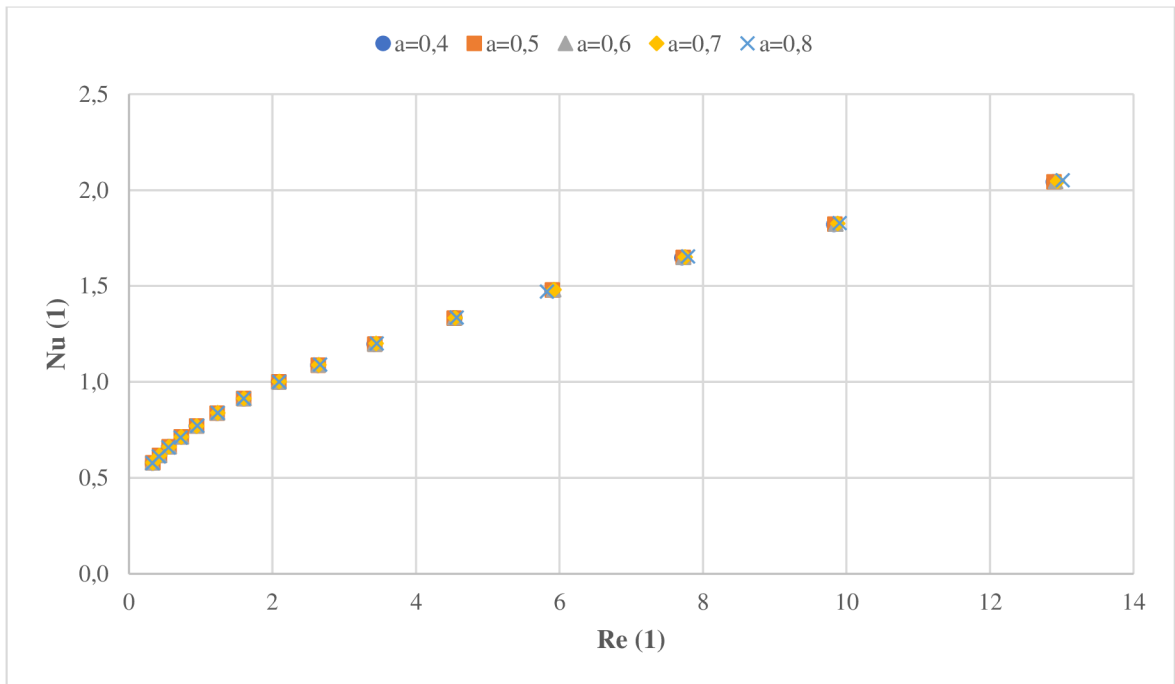
V návaznosti na předchozí kapitolu byly vytvořeny grafy 4.4.1 až 4.4.4, za účelem porovnání vlivu teploty na materiálové vlastnosti. V tomto případě nebyla pro určení materiálových vlastností vzduchu použita filmová teplota, ale teplota okolního vzduchu z trysky T_{AMBIENT} a T_{SENSOR} teplota senzoru. Z grafů je zřejmé, že při použití jiné teploty pro určení materiálových vlastností, než je filmová teplota, dochází ke značnému rozdílu. Teplota okolního vzduchu z trysky T_{AMBIENT} je relativně nízká ve srovnání s filmovou teplotou. Dosahuje hodnot v rozmezí od 22 °C do 23 °C a její určení je zcela nezávislé na hodnotě součinitele přehřátí. Nižší teplota vede k menším hodnotám materiálových vlastností a vzhledem k výskytu materiálových vlastností ve jmenovatelích výpočetních vztahů, dosahují hodnoty Nusseltova a Reynoldsova čísla vyšších hodnot. V případě teploty senzoru lze pozorovat zcela opačný případ, kdy teplota senzoru je o dost vyšší než určující teplota a v grafu je patrný pokles hodnot. Za zmínku stojí i to, že při teplotě senzoru dosahuje odchylka mezi oběma metodami výpočtu nejnižších hodnot. K vidění jsou zde čtyři grafy, přičemž první dva jsou pro výpočet Nusseltova čísla prostřednictvím naměřených dat a další dva grafy 4.4.3 a 4.4.4 Churchill–Bernsteinovou rovnicí.



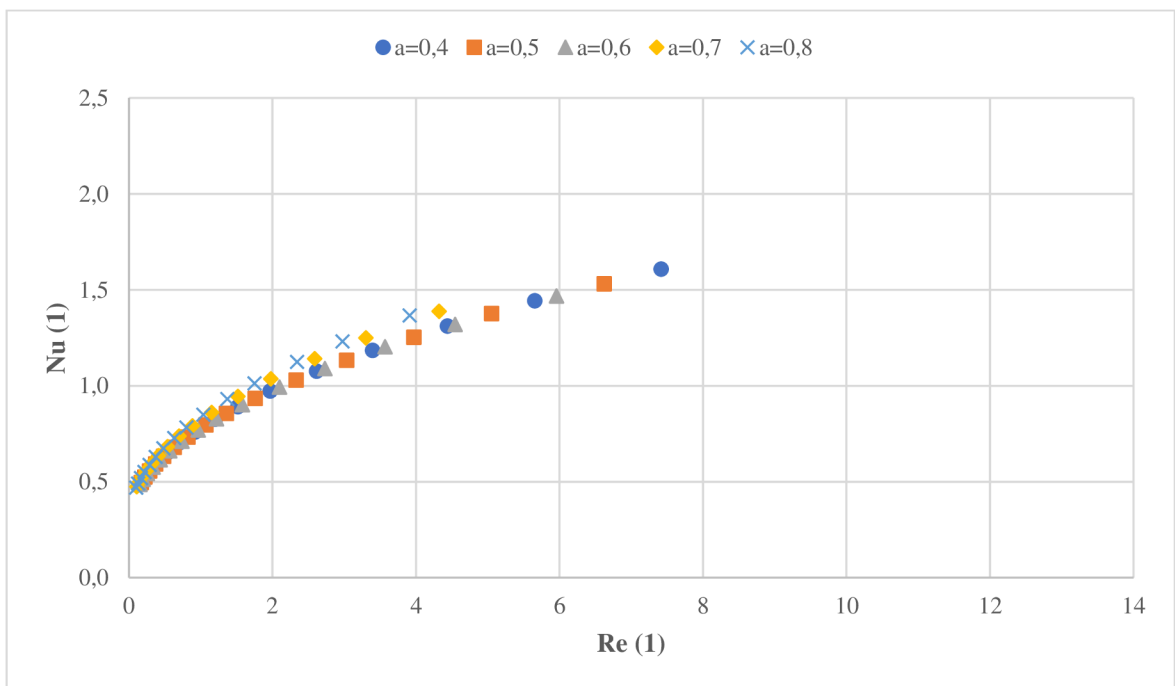
Obr. 4.4.1 Grafická závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově pro T_{AMBIENT} , data získaná měřením



Obr. 4.4.2 Grafická závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově pro T_{SENSOR} , data získaná měřením



Obr. 4.4.3 Grafická závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově pro T_{AMBIENT} , data získaná výpočtem Churchill–Bernsteinovy rovnice



Obr. 4.4.4 Grafická závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově pro T_{SENSOR} , data získaná výpočtem Churchill–Bernsteinovy rovnice

5. Závěr

V této práci jsme zkoumali a experimentálně měřili součinitel přestupu tepla při obtékání rotačního válce. Hodnoty součinitele přestupu tepla jsme určili na základě navrženého experimentu, který se odehrával prostřednictvím metody CTA a spočíval v nastavení odporů v obvodu a měření napětí na drátku sondy pro rychlosti proudícího vzduchu v rozmezí od (1 do 40) $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, při měnících se součinitelích přehřátí. Pro vyhodnocování součinitele přestupu tepla z naměřených dat jsme vytvořili algoritmus, jenž je popsán v kapitole 3.6. Jako válec v experimentu sloužil drátek jednodrátkové sondy 55P11 od společnosti Dantec, který byl příčně obtékán proudem vzduchu z trysky. Výsledky poukazují na skutečnost, že součinitel přehřátí má na součinitel přestupu tepla velmi malý vliv, ne-li žádný. Současně korespondují s teorií nucené konvekce tím, že součinitel přestupu tepla postupně narůstá společně s rychlostí. Lze tedy konstatovat, že velikost součinitele přestupu tepla při konvektivním přenosu není závislá na teplotě zahřívaného tělesa, ale na rychlosti, jakou na těleso proudí tekutina.

Pro porovnání výsledků jsme použili obecnou korelační rovnici od Churchill–Bernsteina. Při prvním měření a porovnání jsme odhalili odchylku mezi oběma metodami, jejíž maximální hodnota dosahovala 15 %. Dalším měření jsme však zjistili, že se zvyšujícím se součinitelem přehřátí se odchylka stále zmenšuje.

Součástí experimentu je také prozkoumání vlivu filmové teploty na výsledky Nusseltova a Reynoldsova čísla. Prokázali jsme, že při použití jiné teploty pro určení materiálových vlastností je vliv na výpočet opravdu velký a výsledky se značně liší.

Předpokládané směry dalšího výzkumu

Jako další směry budoucího výzkumu mohou být např. proměření součinitele přestupu tepla ve vyšším spektru součinitelů přehřátí a hodnot rychlosti, určení součinitele přestupu tepla na zahřívané desce či válci s pomocí nalepovacích termoanemometrických sond, popř. použití sond od jiného výrobce či sond založených na jiném principu měření (např. sondy greenTEG).

Seznam použité literatury

- [1] SCHOLTEN, J.W. a D.B. MURRAY. Unsteady heat transfer and velocity of a cylinder in cross flow—I. Low freestream turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 1998, **41**(10), 1139-1148 [cit. 2021-05-29]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/S0017-9310(97)00250-0
- [2] BEASLEY, Donald a Richard FIGLIOLA. A generalised analysis of a local heat flux probe. *Journal of Physics E: Scientific Instruments* [online]. 1988, **21**(3), 316-322 [cit. 2021-06-12]. ISSN 00223735. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/0022-3735/21/3/016>
- [3] MACHÁČKOVÁ, Adéla. *Sdílení tepla a proudění: učební text*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2576-2.
- [4] MICHEJEV, Michail Aleksandrovič. *Základy sdílení tepla*. 1. vyd. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952. Knižnice energetického průmyslu.
- [5] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02933-6.
- [6] COMTE-BELLOT, G. Hot-Wire Anemometry. *Annual Review of Fluid Mechanics* [online]. 1976, **8**(1), 209-231 [cit. 2021-02-24]. ISSN 0066-4189. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.fl.08.010176.001233
- [7] BRUUN, H.H. *Hot-Wire Anemometry: principles and Signal Analysis*. 2 ed. Oxford: Oxford University Press/, 1996. ISBN 0-19-856342-6.
- [8] DANČOVÁ, Petra. *Experimentální metody v úlohách neizotermního proudění*. 2018. Habilitační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [9] DANČOVÁ, Petra. *Studie proudění typu Synthetic jet*. 2006. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Tomáš Vít Ph.D.
- [10] TSINOBER, A. Hot Wire Anemometry. TABELING, P. a O. CARDOSO, ed., P. TABELING, O. CARDOSO. *Turbulence* [online]. Boston, MA: Springer US, 1994, s. 31-38 [cit. 2021-02-24]. NATO ASI Series. ISBN 978-1-4613-6106-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4615-2586-8_6
- [11] *Hot Wire Measurements* [online]. [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.coursehero.com/file/27592807/AE547-9-Hotwire-sonpdf/>

- [12] JØRGENSEN, Finn. *How to measure turbulence with hot-wire anemometers* [online]. Dantec Dynamics A/S, 2001 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://web.iitd.ac.in/~pmvs/courses/mel705/hotwire2.pdf>
- [13] Miniature Wire. *DANTEC DYNAMICS* [online]. [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/components/hot-wire-and-hot-film-probes/single-sensor-probes/miniature-wire/>
- [14] Gold-plated Wire. *DANTEC DYNAMICS* [online]. [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/components/hot-wire-and-hot-film-probes/triple-sensor-probes/gold-plated-wire/>
- [15] LOMAS, Charles G. *Fundamentals of hot wire anemometry*. New York: Cambridge University Press, 1986. ISBN 0521303400.
- [16] Film. *DANTEC DYNAMICS* [online]. [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/components/hot-wire-and-hot-film-probes/single-sensor-probes/film/>
- [17] Fiber-film. *DANTEC DYNAMICS* [online]. [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/components/hot-wire-and-hot-film-probes/single-sensor-probes/fiber-film/>
- [18] BRUUN, H, M KHAN, H AL-KAYIEM a A FARDAD. Velocity calibration relationships for hot-wire anemometry. *Journal of Physics E: Scientific Instruments* [online]. 1988, **21**(2), 225-232 [cit. 2021-03-04]. ISSN 0022-3735. Dostupné z: doi:10.1088/0022-3735/21/2/020
- [19] KUNDYS, Jan, Petr FABIÁN a Milada KOZUBKOVÁ. *Měření žárovým anemometrem*. VŠB TU Ostrava, fakulta strojní, 2004.
- [20] CHURCHILL, S. a M. BERNSTEIN. A Correlating Equation for Forced Convection From Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Crossflow. *Journal of Heat Transfer* [online]. 1977, **99**(2), 300-306 [cit. 2021-05-21]. ISSN 0022-1481. Dostupné z: doi:10.1115/1.3450685
- [21] PETŘÍKOVÁ, Markéta a Pavel KRYŠTŮFEK. *Tabulky a diagramy pro termodynamiku*. Vydání šesté. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-80-7494-272-3.