



Měření součinitele přestupu tepla při impaktním proudění

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Martin Šimko**
Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Šimko**
Osobní číslo: **S15000336**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**
Název tématu: **Měření součinitele přestupu tepla při impaktním proudění**
Zadávací katedra: **Katedra energetických zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Množství technologií je dnes závislých na konvektivním ohřevu. Jednou z nejintenzivnějších metod ohřevu je využití impaktního proudu tekutiny. Cílem práce je provést měření součinitele přestupu tepla na stávajícím experimentálním zařízení. Součástí práce budou dle dohody i simulace sledovaných procesů.

Práce by měla odpovídat následující struktuře:

1. Rešerše prací, které se zabývají zvolenou problematikou.
2. Rozbor úlohy, návrh experimentů.
3. Sestavení experimentálního zařízení, provedení experimentů.
4. Příprava modelu pro simulaci děje použitím FVM.
5. Numerická simulace ohřevu impaktním proudem.
6. Porovnání výsledků experimentů a numerických simulací. Diskuse výsledků.

Rozsah grafických prací: **15**
Rozsah pracovní zprávy: **45 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:


- [1] LIENHARD, J. H., LIENHARD, J. H., *A Heat Transfer Textbook*. Phlogiston Press, MIT, 2005.
- [2] RIEGER, F., ŠESTÁK, J., *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. ČVUT, Praha, 1996.
- [3] Ansys Fluent, *FLUENT 6.3 User's Guide*.
- [4] BRUUN, H. H., *Hot-wire anemometry: principles and signal analysis*. Oxford University Press, 1995.
- [5] Katedra energetických zařízení, *Technické zprávy*. TUL, Liberec, 2012-2014.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.**
Katedra energetických zařízení
Konzultant diplomové práce: **Ing. Petra Dančová, Ph.D.**
Katedra energetických zařízení

Datum zadání diplomové práce: **1. února 2017**
Termín odevzdání diplomové práce: **1. května 2018**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. února 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

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

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

27. 4. 2018

Podpis:



Anotace

Diplomová práce se zabývá experimentálním určením součinitele přestupu tepla na zahřívání desce způsobené impaktním prouděním. Měření bylo provedeno ve vzduchu s použitím syntetizovaného a kontinuálního proudu. Pro měření rychlostního pole a součinitele přestupu tepla je použita metoda termoanemometrie v režimu CT.

Experimenty jsou porovnány s výsledky numerických simulací provedených v komerčním software Ansys Fluent v. 18.2.

Klíčová slova: součinitel přestupu tepla, syntetizovaný proud, CFD simulace, experiment

Annotation

The diploma thesis deals with the experimental determination of the heat transfer coefficient on a heated plate caused by the impacted flow. Experiments were performed in air using synthetic and continuous jets. For measuring the velocity field and the heat transfer coefficient, the thermoanemometry method in the CT mode is used.

The experiments are compared with the results of numerical simulations performed in the commercial software Ansys Fluent v. 18.2.

Keywords: heat transfer coefficient, synthetic jet, CFD simulation, experiment

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat rodině za podporu po celou dobu studia. Dále děkuji vedoucímu práce Doc. Ing. Tomáši Vítovi, Ph.D. a konzultantce Ing. Petře Dančové, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady a konzultaci při tvorbě diplomové práce.

Tato diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu č. 16-16596S Grantové agentury ČR a v rámci projektu SGS 21135.

Obsah

1	Úvod.....	10
1.1	Historie	10
1.2	Syntetizovaný proud.....	11
1.3	Cíle diplomové práce.....	13
2	Teoretická část	14
2.1	Charakteristiky syntetizovaného proudu	14
2.2	CTA anemometr	14
2.3	HWA (Hot-Wire Anemometry).....	16
2.4	HFA (Glue-On Hot-Film Anemometry).....	17
3	Sestavení experimentu a měření	20
3.1	Sestavení experimentu.....	20
3.2	Kalibrace.....	21
3.3	Postup měření	22
4	Výsledky měření z experimentu	26
4.1	Syntetizovaný proud.....	26
4.2	Kontinuální proud.....	33
5	Tvorba a nastavení simulace.....	36
5.1	Sestavení simulace.....	36
5.2	Tvorba a velikost sítě.....	38
5.3	Nastavení modelu a výpočet úlohy.....	39
5.4	Úprava geometrie a sítě	41
6	Výsledky simulace.....	43
6.1	Kontinuální proud.....	43
6.2	Syntetizovaný proud.....	46
7	Porovnání experimentů a numerických simulací.....	49
7.1	Kontinuální proud.....	49

7.2	Syntetizovaný proud	50
8	Závěr	53
9	Bibliografie	54
10	Přílohy	56

Veličiny

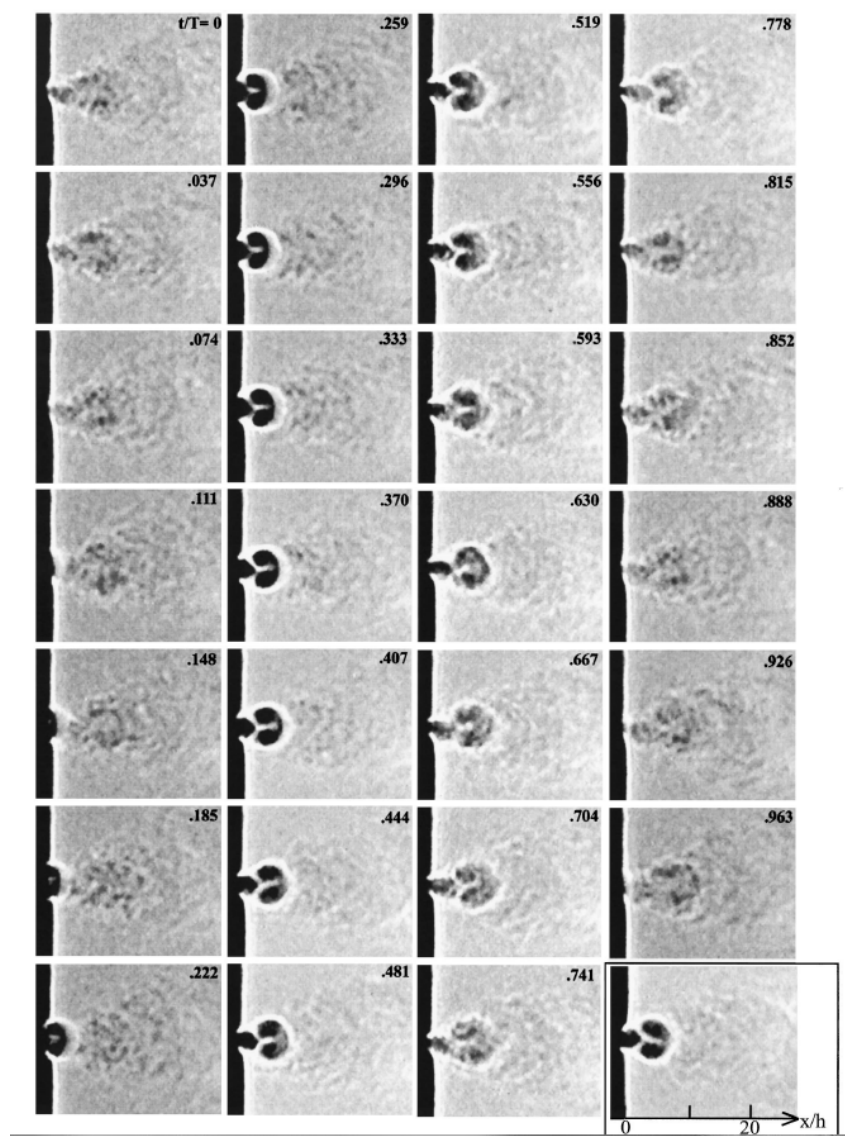
A, B, C, D	(1)	Konstanty
b	(m)	Šířka měřené zóny
c_p	(J·kg ⁻¹ K ⁻¹)	Měrná tepelná kapacita
c_∞	(mol·m ⁻³)	Molární koncentrace v elektrolytu
d	(m)	Průměr výstupního otvoru akčního členu
d_d	(m)	Průměr drátku sondy
E_w	(V)	Úbytek napětí na můstku
f	(Hz)	Frekvence
F	(C·mol ⁻¹)	Faradayova konstanta
h	(W·m ² K ⁻¹)	Součinitel přestupu tepla
I	(A)	Elektrický proud
l_d	(m)	Délka drátku sondy
L_0	(m)	Ekvivalentní délka sloupce vytlačené tekutiny
n	(1)	Exponent
\dot{Q}	(W)	Tepelný tok
R_d	(Ω)	Elektrický odpor drátku sondy
R_w	(Ω)	Elektrický odpor filmové sondy
S	(m ²)	Plocha měřené zóny
S_d	(mm ²)	Průřez drátku
t	(s)	Čas
Δt	(K)	Rozdíl teplot
T	(s)	Perioda
T_d	(K)	Teplota drátku (sondy)

T_t	(K)	Teplota okolní tekutiny
U_d	(V)	Elektrické napětí drátku sondy
V	($m \cdot s^{-1}$)	Rychlost proudění
z	(1)	počet elektronu vstupující do reakce
α_0	(K^{-1})	Teplotní součinitel elektrického odporu
ν	($m^2 s^{-1}$)	Kinematická viskozita
ρ	($kg \cdot m^{-3}$)	Hustota
ρ_E	($\Omega \cdot m$)	Měrný elektrický odpor
Pr	(1)	Prandtlovo číslo
Re	(1)	Reynoldsovo číslo
Sc	(1)	Schmidtovo číslo
St	(1)	Strouhalovo číslo

1 Úvod

1.1 Historie

Syntetizovanými proudy podrobněji popsány v kapitole 1.2 se zabývali např. Smith a Glezer ve své práci [1], kdy se zaměřili na vznik a proměření syntetizovaného proudu. Pro znázornění proudu použili Schlierovu metodu (viz obr. 1.1), a pro měření rychlosti syntetizovaného proudu v jednotlivých bodech využili metodu termoanemometrie v režimu konstantní teploty (CT). Ta umožnila změření rychlosti v průběhu jednoho pulzu.



Obr. 1.1: Znázornění vývoje syntetizovaného proudu Schlierovou metodou [1]

Součinitel přestupu tepla (heat transfer coefficient, HTC) měřili Scholten a Murray v [2]. V této práci sice nepoužili přímo syntetizované proudy, ale zabývali se právě měřením součinitele přestupu tepla způsobeného turbulentním prouděním. Pro měření HTC u syntetizovaného proudu se dají použít metody pro měření turbulentního proudění, protože syntetizovaný proud spadá do kategorie turbulentních proudů. Součinitel přestupu tepla měřili při různém úhlu dopadajícího proudu, viz [2]. Ve svých dalších pracích se zaměřili na turbulentní proudění, v [3] na nízké frekvence turbulencí a v [4] na vysoké frekvence turbulencí. V obou těchto pracích měřili jak přestup tepla, tak rychlost proudění.

Metody pro měření součinitele přestupu tepla. Tato diplomová práce popisuje dvě metody měření HTC. Jedná se o přímé a nepřímé měření sondou. U nepřímého měření sondou se měří smykové napětí, s následným přepočtem na součinitel přestupu tepla.

Další metodou určení HTC může být - vztah mezi přenosem tepla a hmoty. [6]a [7] kde HTC je vyjádřen z naměřeného přenosu hmoty jako:

$$h = \rho \cdot c_p (Sc/Pr)^{\frac{2}{3}} \cdot I / (z \cdot F \cdot S \cdot c_{\infty}) \quad (1.1)$$

kde h součinitel přestupu tepla, ρ hustota, c_p tepelná kapacita, Sc Schmidtovo číslo, Pr Prandtlovo číslo, I elektrický proud, z počet elektronu vstupující do reakce, F Faradayova konstanta, S plocha pracovní elektrody, c_{∞} molární koncentrace aktivních komponent v elektrolytu.

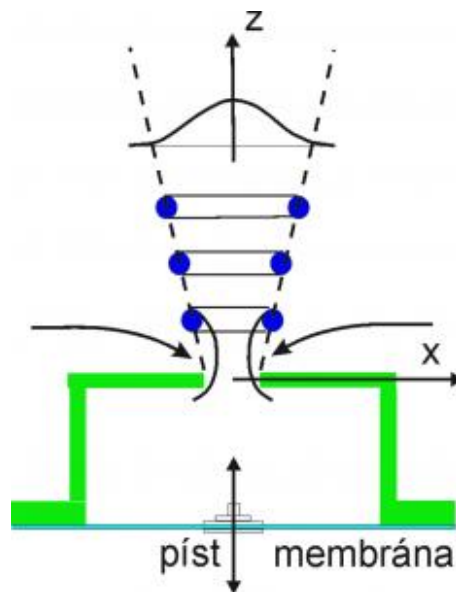
HTC lze také určit pomocí vztahu 1.2. Např. [8] kde \dot{Q} množství tepla, které projde plochou za určitý čas, h součinitel přestupu tepla, S plocha kterou prochází teplo, t čas, Δt rozdíl teplot.

$$\dot{Q} = h \cdot S \cdot t \cdot \Delta t \quad (1.2)$$

1.2 Syntetizovaný proud

Syntetizovanými proudy jsem je již zabýval ve své bakalářské práci [9], pro popis syntetizovaného proudu a teorie o syntetizovaných prouděch jsem tedy vycházel ze své bakalářské práce. Syntetizovaný proud je generován skládáním řady po sobě

následujících pulzů tekutiny. Pulzy jsou vytvořeny z periodických pulzací, vhodným otvorem (tryskou) je cyklicky vyfukována a nasávána tekutina. Na okraji výstupního otvoru dojde k vytvoření vírového prstence. Nasávání tekutiny probíhá cestou nejmenšího odporu z celého okolí, vyfouknutí však díky zvolenému otvoru (trysce) je usměrněno, viz. obr. 1.2. V určité vzdálenosti od trysky vzniká z pulzů nenulový tok pracovní tekutiny, složený z periodických pulzací, [9,10].



Obr. 1.2: Princip syntetizovaného proudu [10]

Pracovní cyklus začíná pohybem membrány směrem k trysce, tím dochází k vytlačování tekutiny z trysky a k tvoření proudu směrem od trysky. Největší rychlosti vytlačování je přitom dosaženo v pozici nulové výchylky membrány. Při dosažení maximální výchylky se membrána začne pohybovat zpět od trysky, čímž dochází k nasávání tekutiny do dutiny až do maximální výchylky směrem od trysky, odkud se začíná pohybovat opět směrem k trysce a pracovní cyklus se opakuje. Pro správnou funkci syntetizovaného proudu musí být splněna podmínka, že vytlačovaný proud tekutiny musí mít dostatečně velkou rychlost k tomu, aby byl při dalším cyklu vzdálen od trysky natolik, aby proud již nemohl být výrazně ovlivněn nasáváním zpět do dutiny.

Z předchozího popisu funkce vyplývá jedna z výhod syntetizovaného proudu a to generace proudu, bez přívodu tekutiny z externího zdroje - tekutina je nasávána z okolí. Ačkoliv je střední hmotnostní tok v ose výstupního otvoru trysky nulový, v dostatečné vzdálenosti od trysky jsou hmotnostní tok i hybnost proudu nenulové a mají směr od

trysky. Uvažuje se o využití syntetizovaných proudů v automobilizmu nebo letectví, kde aerodynamika ovlivňuje vlastnosti strojů a jejich efektivitu. [9,10]

1.3 Cíle diplomové práce

Konkrétní cíle diplomové práce jsou zapsány v jednotlivých bodech zadání a jsou to:

1. rešerše prací, které se zabývají zvolenou problematikou
2. rozbor úlohy, návrh experimentu
3. sestavení experimentálního zařízení, provedení experimentů
4. příprava modelu pro simulaci děje použitím FVM
5. numerické simulace ohřevu impaktním proudem
6. porovnání experimentů a numerických simulací, diskuze výsledků

2 Teoretická část

2.1 Charakteristiky syntetizovaného proudu

Základní charakteristiky syntetizovaného proudu (synthetic jet, SJ), lze určit nezávislými parametry dle [9,11,12]:

- průměr výstupního otvoru akčního členu d
- ekvivalentní délka sloupce vytlačené tekutiny L_0

$$L_0 = \int_0^{T/2} v_0(t) dt \quad (2.1)$$

kde T je perioda pohybu budícího členu, $T/2$ čas vytlačování tekutiny v případě, že pochybující se membrána trysky je buzena sinusovým signálem, v_0 rychlost ve výstupním otvoru

- časově středovaná rychlost ve výstupním otvoru trysky při vytlačování tekutiny V_0

$$V_0 = \frac{L_0}{T} = L_0 \cdot f \quad (2.2)$$

kde $f = 1/T$ je frekvence pohybu budícího členu

- Reynoldsovo číslo Re

$$Re = \frac{V_0 \cdot d}{\nu} \quad (2.3)$$

kde ν je kinematická viskozita

- Strouhalovo číslo St

$$St = \frac{f \cdot d}{\pi \cdot V_0} = \frac{d}{\pi \cdot L_0} \quad (2.4)$$

Výše uvedené rovnice jsou převzaté z [11,12]

2.2 CTA anemometr

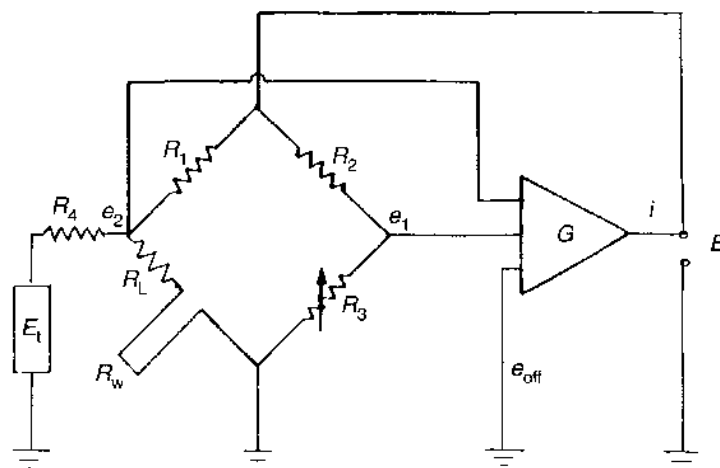
CTA (constant temperature anemometry) anemometr jsem využil i při měření ve své bakalářské práci [9,13], kde jsem použil metodu HWA pro měření rychlosti. Teoretická část je tedy zčásti podobná jako v bakalářské práci.

CTA anemometr se používá pro měření rychlosti v tekutinách, a je obzvláště vhodný pro měření turbulentních fluktuací rychlostí proudění. Pracuje na základě konvektivního přenosu tepla ze zahřívajícího drátku/sondy do okolní tekutiny, přičemž přestup tepla je primárně závislý na rychlosti tekutiny. Použitím velmi tenkých drátkových čidel, umístěných v tekutině a elektroniky se zpětnovazební smyčkou, je umožněno měření fluktuací rychlostí malého měřítka turbulence a vysokých frekvencí [9,13].

Pro měření je nutné nastavit teplotu přehřátí sondy. Nastavení přehřátí definuje pracovní teplotu snímače. Odpor přehřátí v pravé větvi můstku je nastaven tak, že jakmile se můstek přepne do režimu operace, dosáhne snímač požadované pracovní teploty.

Kalibrací nalezneme vztah mezi výstupem CTA a rychlostí proudění tak, že sondu vystavíme sérii známých rychlostí V , a přitom zaznamenáváme výstupní napětí U . Křivka proložená body (U_a, V) , pak představuje přenosovou funkci, která se následně používá pro převod dat z napětí na rychlost. Kalibrace byla prováděna speciálním kalibrátorem, za konstantní teploty. Vzhledem k výrazně vyšší teplotě přehřátí drátku vůči změně teploty při měření, nebyla nutná korekce pro změnu teploty okolí [9,13].

Zapojení v režimu CTA, je udržována konstantní teplota drátku. Toto zapojení je vhodné pro měření rychlosti proudění tekutiny. Na obr. 2.1 je schéma pro zapojení Wheatstonova můstku. [9,14]



Obr. 2.1: Wheatsonův můstek pro CTA [14]

2.3 HWA (Hot-Wire Anemometry)

HWA metoda přehřátého drátku. Metoda spočívá v konvektivním přenosu tepla ze zahřívajícího tělesa (sonda) umístěného do proudu tekutiny. Použitím sondy (drátkové čidlo) s malou tepelnou kapacitou a elektroniky se zpětnovazební smyčkou, je možné měření fluktuací s vysokou frekvencí. Přestup tepla je závislý na teplotě a rychlosti proudění tekutiny. [9,11,13]

Elementární částí měřícího obvodu je sonda, která je většinou tvořena wolframovým drátkem upevněným ve vidlicích držáku.

Drátek je zahříván Jouleovým teplem při průchodu elektrického proudu. Toto teplo je definováno dle Joulova zákona.

$$d\dot{Q}_J = \frac{I^2 \cdot \rho_E}{S_d} dx \quad (2.6)$$

kde S_d je průřez drátku, I elektrický proud, ρ_E měrný elektrický odpor drátku při teplotě T_d .

Ve stacionárním případě je celkové teplo $d\dot{Q}_J$ generováno v drátku sondy o délce dx a je rovno:

$$d\dot{Q}_J = d\dot{Q}_S + d\dot{Q}_P + d\dot{Q}_V + d\dot{Q}_{ak} \quad (2.7)$$

kde $d\dot{Q}_S$ je teplo vyzářené sáláním, $d\dot{Q}_P$ teplo přenesené prouděním do okolí, $d\dot{Q}_V$ teplo přenesené vedením z drátku do držáku, $d\dot{Q}_{ak}$ teplo akumulované v sondě. [9]

Teplo vyzářené do okolí sáláním a teplo odvedené vedením z drátku do držáku, lze považovat za nezávislé na proudění pracovní tekutiny. Drátek lze vzhledem k rozměrům považovat v teoretickém výpočtu za nekonečně dlouhý. Poměr délky ku průměru drátku je řádově více jak 100:1. Teplo akumulované v drátku můžeme považovat za konstantní, vzhledem k nastavení konstantní teploty drátku, proto změnu $d\dot{Q}_{ak}$ uvažujeme rovnou nule. Přenos tepla prouděním z drátku do pracovní tekutiny můžeme definovat pomocí Newtonova zákona:

$$d\dot{Q}_P = \pi \cdot d_d \cdot h(T_d - T_t) dx \quad (2.8)$$

$$\dot{Q}_P = \pi \cdot d_d \cdot l_d \cdot h(T_d - T_t) \quad (2.9)$$

kde T_d je teplota drátku sondy, T_t teplota okolní tekutiny, h součinitel přestupu tepla. Díky těmto poznatkům lze termoanemometrii použít nejen pro měření rychlosti, ale i teploty.

Za předpokladu nekonečně dlouhého drátku, kde lze zanedbat přenos tepla do držáku, lze definovat teplotní rovnováhu dle [9,15] vztahem:

$$I^2 \cdot R_d = \pi \cdot d_d \cdot l_d \cdot h(T_d - T_t) \quad (2.10)$$

kde R_d je odpor na zahřátém drátku při teplotě T_d a je dán vztahem:

$$R_d = \int_{l_d} \frac{\rho_E}{S_d} dx \quad (2.11)$$

Za odpor je možno dosadit:

$$R_d = R_0 [1 + \alpha_0 (T_d - T_0)] \quad (2.12)$$

Napětí se vypočte z Ohmova zákona jako:

$$U_d = I \cdot R_d \quad (2.13)$$

Po úpravách pak lze vztah (2.10) vyjádřit jako:

$$\frac{U_d^2}{R_d} = (A + B \cdot V^n)(T_d - T_t) \quad (2.14)$$

kde parametry A, B, n jsou funkcemi materiálových vlastností drátku a okolní tekutiny, průměru drátku, které jsou získány kalibrací. [9,11,13]

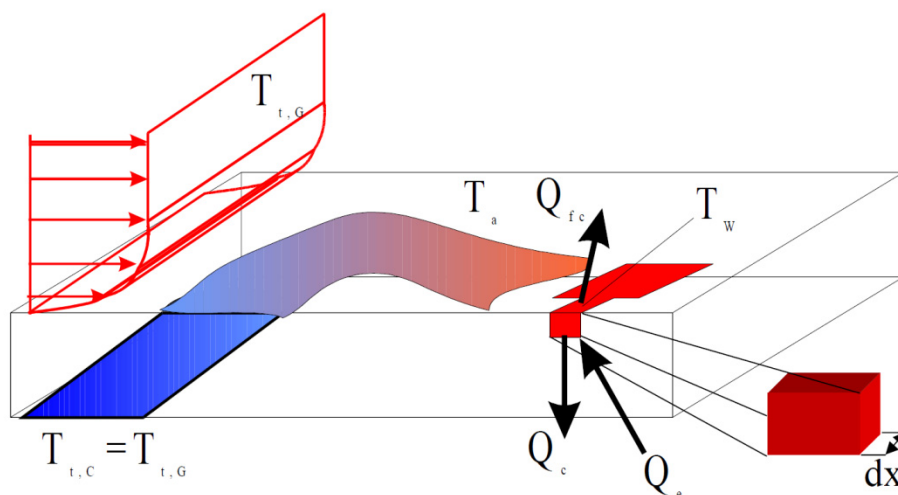
2.4 HFA (Glue-On Hot-Film Anemometry)

Metoda pomocí nalepené přehřáté filmové sondy. Metoda HFA je vhodná pro vyšetřování vývoje mezní vrstvy. Pomocí této metody lze určit dále HTC. Součinitel přestupu tepla není u této metody měřen přímo, ale přes smykové napětí.

Vyhodnocení součinitele přestupu tepla

Jak HWA tak HFA jsou založeny na konvektivním přenosu tepla ze zahřáté sondy vložené do proudu tekutiny. Nucený konvektivní tok $d\dot{Q}_{fc}$ lze určit z rovnice tepelné bilance, pro přírůstek části na zahřívání sondě. Znázornění tepelných toků, popsanych v rovnici (2.15) viz [16], je na obr. 2.2.

$$d\dot{Q}_e = d\dot{Q}_{fc} + d\dot{Q}_c + d\dot{Q}_s + d\dot{Q}_r \quad (2.15)$$



Obr. 2.2: Tepelná balance na sondě [16]

Jako referenční hodnota se měření provádí při nulovém toku tekutiny a stejném přehřátí.

$$d\dot{Q}_{e;0} = d\dot{Q}_{fc;0} + d\dot{Q}_{c;0} + d\dot{Q}_{s;0} + d\dot{Q}_{r;0} \quad (2.16)$$

Vezmeme v úvahu, že

$$d\dot{Q}_{fc;0} = 0 ; d\dot{Q}_{c;0} = d\dot{Q}_c ; d\dot{Q}_{r;0} = d\dot{Q}_r ; d\dot{Q}_{s;0} = d\dot{Q}_s \quad (2.17)$$

Nucený konvektivní tok je určený

$$d\dot{Q}_{fc} = d\dot{Q}_e - d\dot{Q}_{e;0} \quad (2.18)$$

Nucený konvektivní tok může být, dle [16] určený pomocí součinitele přestupu tepla h

$$d\dot{Q}_{fc} = dh \cdot b(T_w - T_c)dx \quad (2.19)$$

Za předpokladu, že h je konstantní ve směru osy x , dle [16] pak

$$\dot{Q}_{fc} = h \cdot A(T_w - T_c) \quad (2.20)$$

Filmová sonda s odporem R_w generuje teplo, vznikající průchodem proudu I

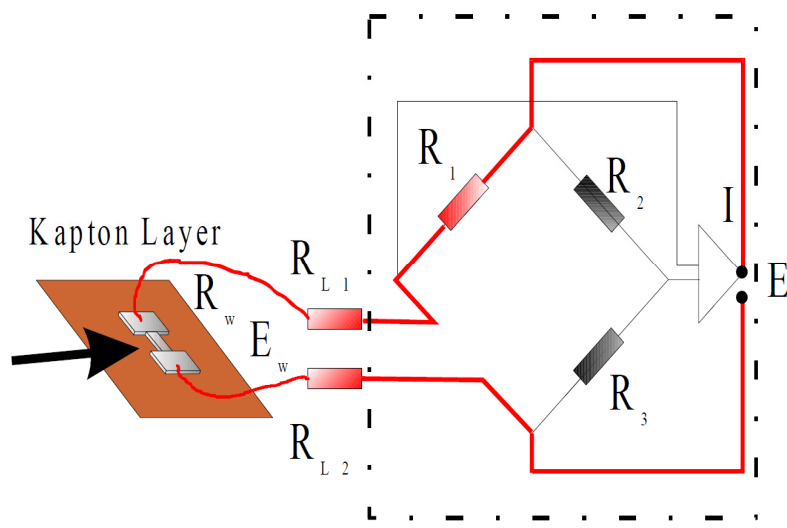
$$\dot{Q}_{fc} = I \cdot R_w = \frac{E_w^2}{R_w} \quad (2.21)$$

Rovnice výše uvedené, viz [16].

Úbytek napětí na můstku E_w lze určit pomocí Kirchhoffových zákonů, obvod je znázorněn na obr. 2.3

$$E_W = \frac{R_W}{R_1 + R_{L1} + R_W + R_{L2}} E \quad (2.22)$$

kde E je výstupní napětí na můstku.



Obr. 2.3: Schéma zapojení odporů pro filmovou sondu pro CTA [16]

Odpor R_1 a poměr na můstku (BR-bridge ratio) ($BR = R_1/R_2$) je pevně určen a nemění se. Na zařízení, na kterém se měřilo, byl poměr odporů na můstku $BR=1:20$. Tato hodnota je dána pro tento anemometr od výroby.

Ačkoli není možné přímo měřit odpor R_W za provozních podmínek, lze tento odpor určit s ohledem na nastavení můstku.

Postup je následující. Změříme odpor R_P na sondě při teplotě T_C , nezahřívána sonda.

$$R_C = R_P - R_{L1} - R_{L2} \quad (2.23)$$

Výpočet odporu R_W zahřívané sondy, s využitím součinitele přehřátí a .

$$R_W = (1 + a) \cdot R_C \quad (2.24)$$

Měření se provádí i pro nulový tok, při daném přehřátí. Z předešlých rovnic lze určit součinitel přestupu tepla h . Teplota T_∞ je teplota volného proudu. [16]

$$h = \left(\frac{E_W^2}{R_{W,h}} - \frac{E_{W,0}^2}{R_{W,0,h}} \right) \frac{1}{A(T_W - T_\infty)} \quad (2.25)$$

3 Sestavení experimentu a měření

3.1 Sestavení experimentu

Základní sestavení experimentu jsou: 1. volná tryska bez desky 2. tryska se zahřívanou deskou. Tryska s konstantním proudem vzduchu, pro pohon je použit centrální stlačený vzduch, tryska syntetizovaného proudu (synthetic jet). Z těchto možností vyplývají 4 varianty pro sestavení experimentu, zároveň musí být provedena kalibrace zařízení.

Pro sestavení experimentu byly použity tyto přístroje: zdroj generátoru pulzů, na který je připojen zesilovač. Na výstupu ze zesilovače jsou připojeny voltmetr a ampérmetr, pro měření výkonu vystupujícího ze zesilovače. Na zesilovač je napojena tryska pro syntetizovaný proud. Tryska pro syntetizovaný proud je tvořena dvěma reproduktory, které jsou uchyceny v držáku tak, aby tvořily vhodné prostředí pro vznik syntetizovaného proudu.

Tryska je připevněna k držáku, který je umístěn na mikrometrickém stole. Při měření se tedy nehýbe sondou, ale tryskou. Sonda je na stejném místě během měření, k posunu (traverzování) dochází posouváním sondy. Tryska je tvořena dvěma reproduktory, které jsou připevněny na rám a utěsněny. Vstupní/výstupní otvor trysky má v průměru 10mm, tryska je na obr 3.1.



Obr 3.1: Tryska na SJ, je vidět vstupní/výstupní otvor

Při použití kontinuální trysky je jako zdroj použit stlačený vzduch z centrálního rozvodu v laboratoři. K regulaci proudění tekutiny (vzduchu) tryskou, jsou použity regulační ventily. Před každým měřením jsou nastaveny škrticí ventily tak, aby z trysky

vycházel vzduch požadovanou rychlostí. Ruční anemometry slouží k určení přibližné hodnoty rychlosti proudění, přesnější hodnota rychlosti je pak změřena pomocí CTA.

Pokud se měřilo rychlostní pole, kde nebyla potřeba zahřívání deska. Byla deska odmontována, aby proud tekutiny nebyl ovlivňován okolím. V okolí trysky se ve směru proudu nenacházely žádné předměty, které by ovlivňovaly proud tekutiny, jediné co vstupovalo do proudu tekutiny, byla sama sonda.

Pro měření rychlosti proudění byla použita drátková sonda Dantec 55P11 a pro měření u desky zahřívání/nezahřívání byla použita sonda 55P15. Sondy jsou jednodrátové, sonda 55P15 je vhodnější na měření u stěny, díky zahnutým držákům drátku.

Pro měření součinitele přestupu tepla byly použity dvě rozdílné sondy od dvou výrobců. Sonda od firmy Dantec - nalepovací filmová sonda 55R47 (Glue-on Film Probe for air). Tato sonda měří smykové napětí, jejím výstupem je elektrický signál a odpovídá smykovému napětí. Pro získání součinitele přestupu tepla použijeme vzorec (2.25). Druhá použitá sonda Heat Flux Sensor-gSKIN-XM od firmy greenTEG. Měří součinitel přestupu tepla, tak že elektrický signál vystupující ze sondy lze rovnou přepočítat na součinitel přestupu tepla, přepočítání je dle [17].

Zahřívání deska

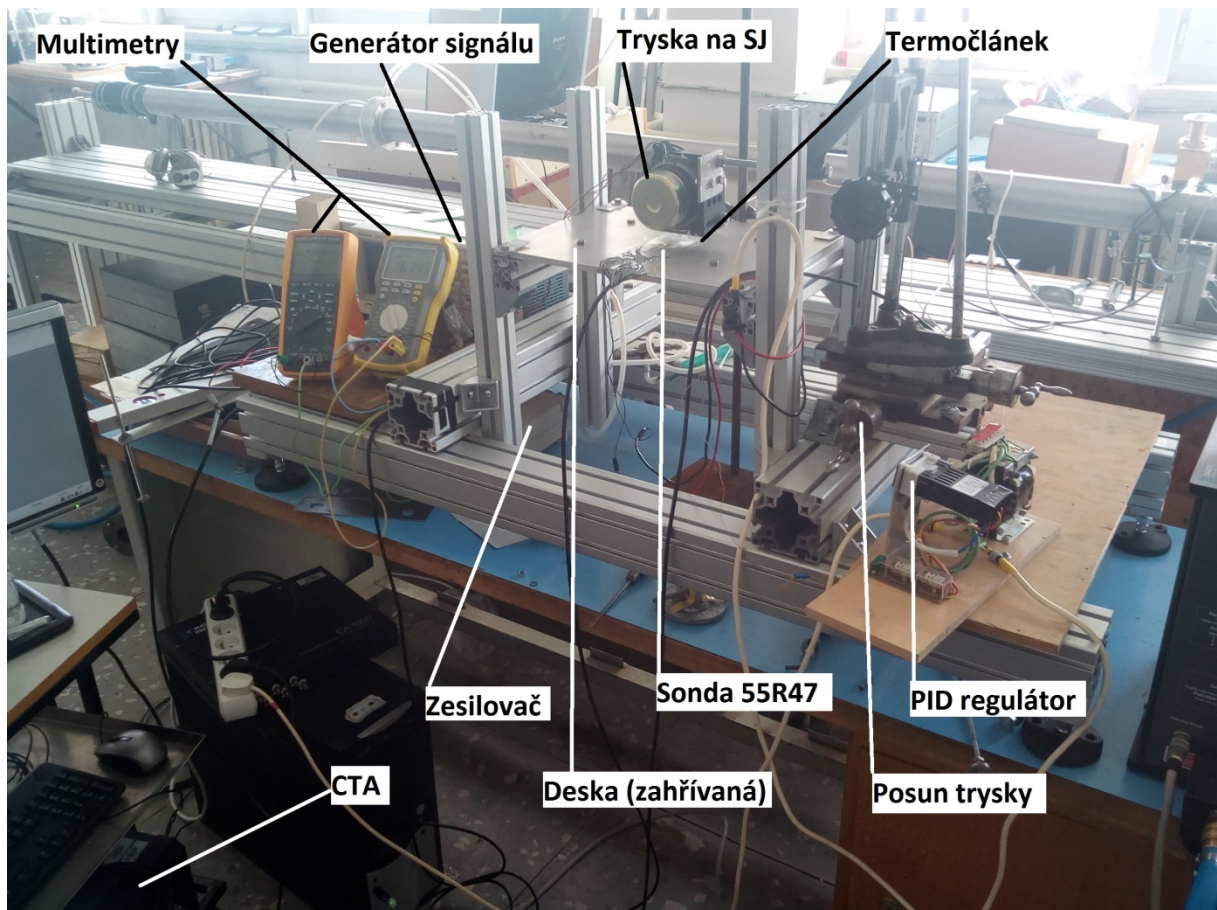
Deska je vyrobena z hliníku, na jejíž spodní straně je připevněna topná fólie. Teplota desky je udržována pomocí PID regulátoru CN 7500 od omega regulátor. Na vrchní straně desky je umístěn termočlánek a údaje z něj pak slouží jako vstupní data pro PID regulátor. Na desku byly na vrchní stranu připevněny obě nalepovací filmové sondy pro určení součinitele přestupu tepla. Při montáži desky a trysky se muselo dbát, aby rovina desky byla kolmá k ose proudu, který na desku dopadá z trysky. Regulace ohřevu desky nebyla řízena změnou výkonu topení, ale pouze možností vypnutí nebo zapnutí, to obstarával PID regulátor, který byl nastaven na interval $\pm 0,1^\circ\text{C}$ od požadované teploty.

3.2 Kalibrace

Pro kalibraci drátkových sond byl použit kalibrátor rychlosti Dantec. Drátkové sondy 55P11 a 55P15 byly před měřením nakalibrovány, z naměřených dat kalibrace je

vytvořen polynom, pro proložení naměřených dat, pomocí polynomu z kalibrace (dále rozepsáno v kapitole 4 zpracování dat).

Během kalibrace sondy byla pro přesnější určení teploty desky, použita klima komora. Teplota v klima komoře se ustalovala dostatečně dlouhou dobu, aby se dalo předpokládat, že teplota desky je v celém objemu a okolní teplotě stejná.



Obr. 3.2 Sestavený experiment s tryskou na SJ

3.3 Postup měření

Po sestavení experimentu bylo potřeba určit vlastní frekvenci trysky syntetizovaného proudu. Frekvence byla změřena pro dané příkony trysky. Měřeno bylo napětí a proud, který šel ze zesilovače a výkon dodávaný do reproduktoru který vytvářel syntetizovaný proud. Byly zvoleny výkony 1W, 3W a 5W. Pro dané výkony se změřila rychlost proudění u trysky, pro frekvence v intervalu (30 – 100) Hz s krokem 5 Hz. Jemnější měření po 1HZ pak bylo provedeno v rozmezí od 70-90Hz, interval byl vybrán

na základě předešlého měření po 5Hz. Experimentálně tedy byly určeny vlastní frekvence pro dané výkony trysky.

Po určení frekvence pro dané výkony bylo naměřeno, rychlostní pole pro proudění z trysky bez desky. Měření probíhalo na ose trysky ve zvolených vzdálenostech od trysky, a to do 50mm s krokem 5mm a poté do 150mm s krokem 10mm. Potom se v rovině osy trysky, tj. v ose x , měřily rychlosti ve vertikálních vzdálenostech od trysky ($y = 5, 10, 20, 50, 100\text{mm}$), traverzovalo se kolmo k ose trysky. Takto se změřily rychlosti v různých vzdálenostech od trysky pro různé výkony. Pro měření s deskou byly vybrané vzdálenosti (10,20,50mm).

Při dalším měření již byla umístěna deska ve vybraných vzdálenostech. Pro měření byla použita sonda 55P15, která je vhodnější k měření u stěny, díky zahnutým držákům sondy. Měření bylo pro dané výkony (1,3,5) W, pro vybrané vzdálenosti (10,20,50) mm, provedeno bez zahřívání desky a se zahřívanou deskou (celkem 2;). Celkem tady bylo 18 (3x3x2) měření průběhu pro rychlostní vrstvu u desky. Stejně měření proběhlo i pro kontinuální trysku, kde také bylo naměřeno rychlostní pole volné trysky i rychlostní pole, které vytvoří tryska u desky.

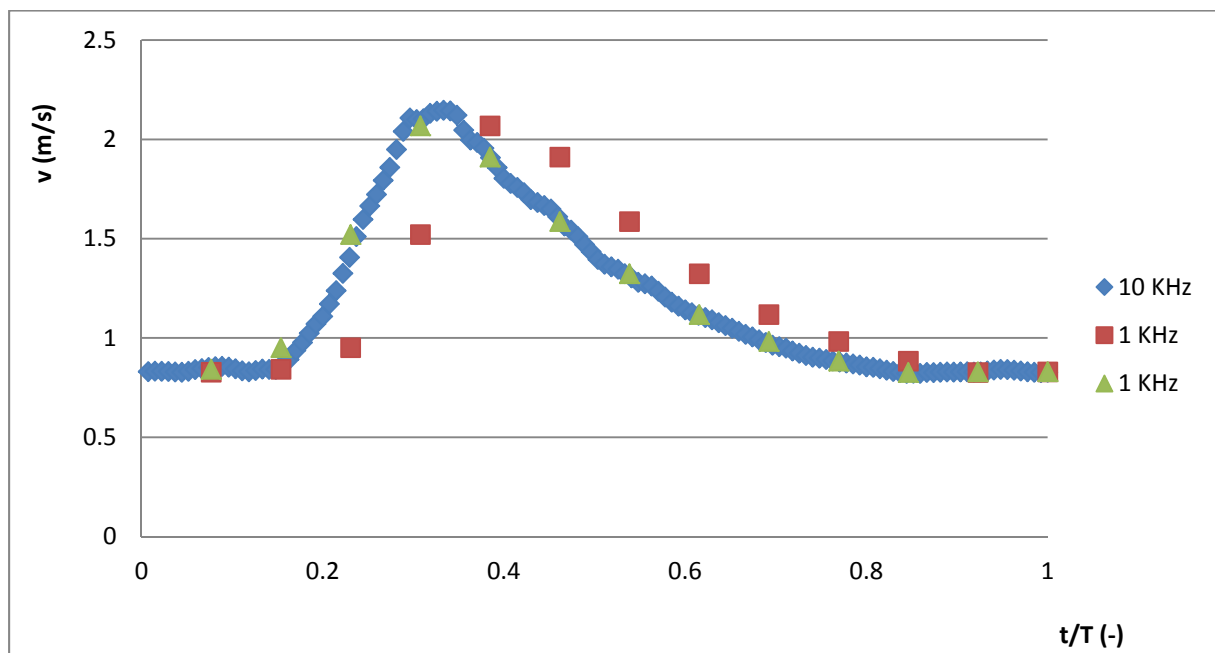
Měření přestupu tepla (pomocí sond gSKIN-XM – greenTEG, 55R47 – DANTEC) bylo provedeno při výkonu 3W dodávaného do trysky k vytvoření syntetizovaného proudu. Při vytvoření konstantního proudu stlačeným vzduchem, se použilo stejné Reynoldsovo číslo konstantního proudu, jako u syntetizovaného proudu.

Pro určení Reynoldsova čísla byla rychlost měřena v ose trysky ve vzdálenosti 1 mm od výstupního otvoru. Reynoldsovo číslo je pak určeno ze vzorce (2.3), kde pro určení rychlosti V_0 se u syntetizovaného proudu použije pouze kladná rychlost v průběhu časové periody. Ze stejného vzorce je poté určena rychlost proudění pro kontinuální trysku.

Při měření HTC byla deska zahřívána a regulovaná PID regulátorem. Příkon desky nebyl regulován, možnost byla pouze zapnuto/vypnuto, proto teplota kolísala v intervalu okolo požadované hodnoty. Měření tedy probíhalo, když teplota šla z nižší hodnoty, spuštěno bylo, když teplota byla o desetinu stupně Celsia nižší, nebo požadované hodnoty a končilo na požadované hodnotě nebo o desetinu stupně vyšší. Při správném nastavení PID regulátoru teplota na desce kolísala minimálně, tj. chyba nastavení 0,2°C. Při vyšších teplotách (nad 50°C) topná deska skoro nevypínala, tzn., že byla nastavena na maximální teplotu, kterou bylo topení schopné udržet.

Před samotným měřením HTC bylo potřeba nakalibrovat měřící sondu (55R47). Kalibrace byla provedena v klima komoře, aby bylo docíleno konstantní teploty celé měřící soustavy. Měření se prováděla pro daný výkon trysky 3W (S). Pro různá přehřátí sondy, a tím také odpovídající teploty desky. Pro každé přehřátí sondy bylo provedeno měření ve třech různých vzdálenostech trysky od zahříváné desky, (10, 20, 50)mm. Ke každému měření syntetizovaného proudu při daném přehřátí, proběhlo měření kontinuální trysky. Kontinuální tryska se měřila při stejném nastavení jako syntetizovaný proud, tedy při stejném přehřátí a ve stejných vzdálenostech. Pro měření součinitele přestupu tepla bylo pro jedno přehřátí šest měření, 3 pro syntetizovaný proud a 3 pro kontinuální proud.

Pro měření byla zvolena vzorkovací frekvence 10kHz, s počtem bodů na jedno měření 32768. Při frekvenci syntetizovaných proudů přes 70Hz odpovídá jedno měření více jak 200 kmitů. Výsledná hodnota je sice měřena méně než 3,3s, ale výsledný tvar kmitu je složen z více jak 200 kmitů. Daná frekvence 10kHz byla zvolena tak, aby výsledný kmit byl vytvořen z dostatečného množství bodů. Výsledný graf jednoho kmitu je tvořen více jak 100 body. Při měření s nižší frekvencí např. 1kHz dochází k posunutí grafu a špatnému rozlišení kmitu a to z důvodu nedostatečného množství bodů. Srovnání vzorkovacích frekvencí 1 a 10 kHz je vidět na grafu 3.1.



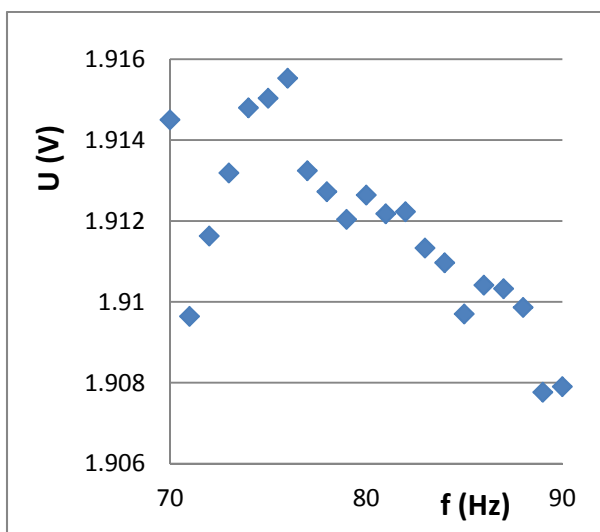
Graf 3.1: Znázornění signálu podle měřené frekvence

Na grafu 3.1 jsou znázorněny hodnoty rychlosti, pro vzorkovací frekvenci 10KHz – modrá, pro vzorkovací frekvenci 1KHz – červená a zelená. U vzorkovací frekvence 10KHz je více jak sto bodů na jeden kmit, na grafu je to 135 bodů. To je dostatečný počet bodů na jeden kmit. Při vzorkovací frekvenci 1KHz je vidět několik nedostatků. Při malé vzorkovací frekvenci je nedostatečný počet bodů na vykreslení, v tomto případě je na grafu 13 bodů, jak je vidět průběh, je možno jen přibližně odhadnout. Za druhé, malá frekvence neurčí přesně pozici kmitu danou časem. Pro dané měření na grafu je rozptyl naměřených dat mezi oběma frekvencemi velký, pro daná data by se daly vzít při nízké frekvenci obě možnosti. Jak je vidět, došlo by k určitému posunu odpovídajícímu času mezi dvěma měřeními. Při měření vyšších frekvencí také dochází ke stejnému problému, ale s vyšší frekvencí se chyba zmenšuje, jelikož rozdíl mezi dvěma měřeními je menší.

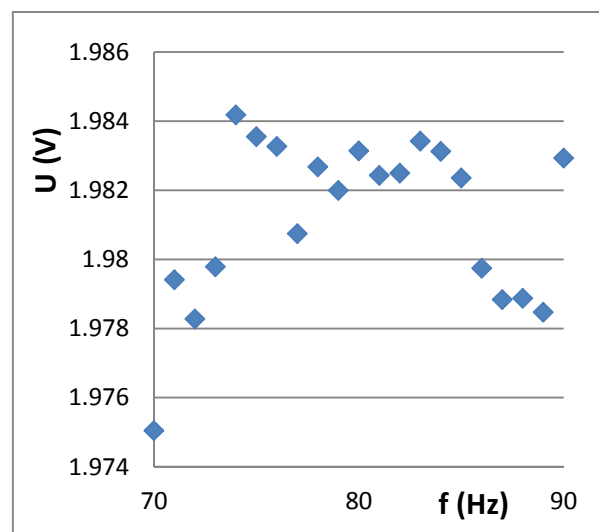
4 Výsledky měření z experimentu

4.1 Syntetizovaný proud

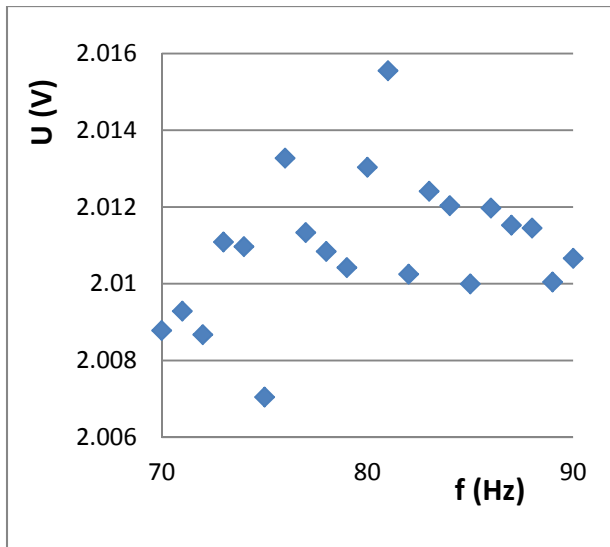
Jako první výsledky jsou hodnoty vlastní frekvence, která je určena z naměřených dat. Hrubý rozsah měření frekvence po 5 Hz od 30Hz do 100Hz, byl pro určení menšího rozpětí frekvence. S jemnějším krokem 1Hz jsem měřil v rozsahu 70Hz až 90Hz. Měření bylo pro tři různé výkony 1W, 3W a 5W. Výkonem je myšlen výkon vycházející ze zesilovače, pro trysku se tedy jedná o příkon. Dále v práci výkonem při měření bude nazýván výkon vystupující ze zesilovače a tedy příkon trysky. Pro zjištění nejvyšší efektivity trysky při daném výkonu, pro různou frekvenci, se určovala daná frekvence podle průměrné hodnoty naměřeného signálu. Signál je měřen jednodrátovou sondou 55P11, tyto hodnoty jsou změřeny v režimu CTA. Vzhledem k potřebě určit pouze maximální hodnotu, není u tohoto určení výsledků použita kalibrace signálu na rychlost proudění. Průměrné hodnoty naměřeného signálu jsou znázorněny v následujících grafech.



Graf 4.1: Určení frekvence pro 1W



Graf 4.2: Určení frekvence pro 3W



Graf 4.3: Určení frekvence pro 5W

Toto měření je důležité, protože podle něj jsou určeny frekvence, při kterých se měřilo za daného výkonu. Naměřené frekvence tedy jsou pro 1W 76Hz, pro 3W 74Hz a pro 5W 81Hz. Na grafu pro 5W je kromě globálního maxima při 81Hz vidět také výrazné lokální maximum. Vzhledem k tomu, že pro 1W je maximum při 76Hz, je provedeno ještě měření pro porovnání signálu jen pro 81 a 76Hz. Po měření, jen pro tyto dvě frekvence, je potvrzena z daných výsledků frekvence 81Hz při výkonu 5W.

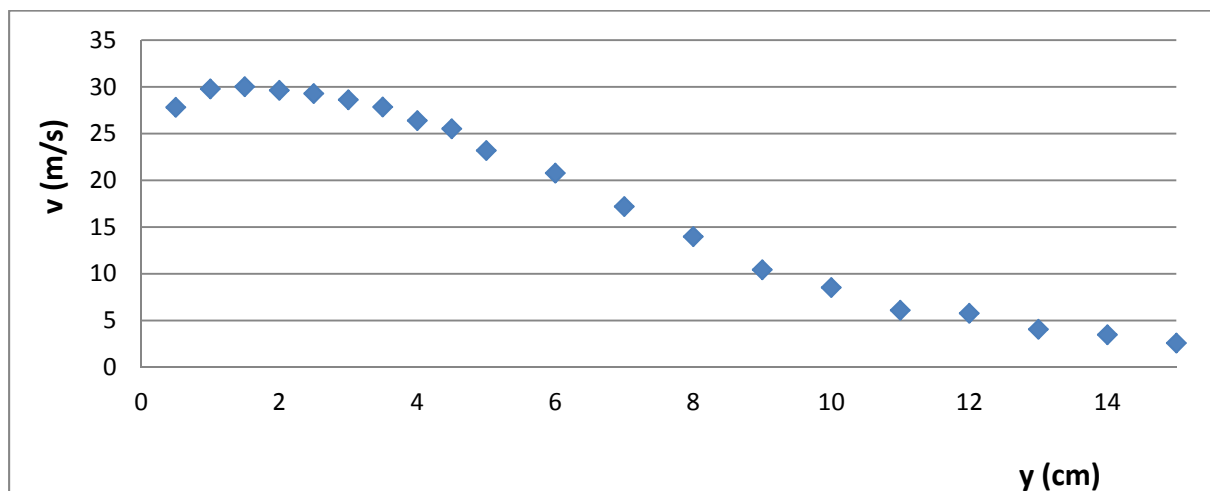
Po určení frekvence, při které se měří pro daný výkon, se proměřilo rychlostní pole syntetizovaného proudu. Polynom pro určení rychlosti je v následující rovnici.

$$\begin{aligned}
 V = & -756607,3502789 + 3351460,048816 \cdot U - 6572320,350874 \cdot U^2 \\
 & + 7488853,782863 \cdot U^3 - 5464069,580988 \cdot U^4 + 2647364,455013 \\
 & \cdot U^5 - 851746,0114116 \cdot U^6 + 175475,9720961 \cdot U^7 \\
 & - 21006,25396092 \cdot U^8 + 1113,311343756 \cdot U^9
 \end{aligned}$$

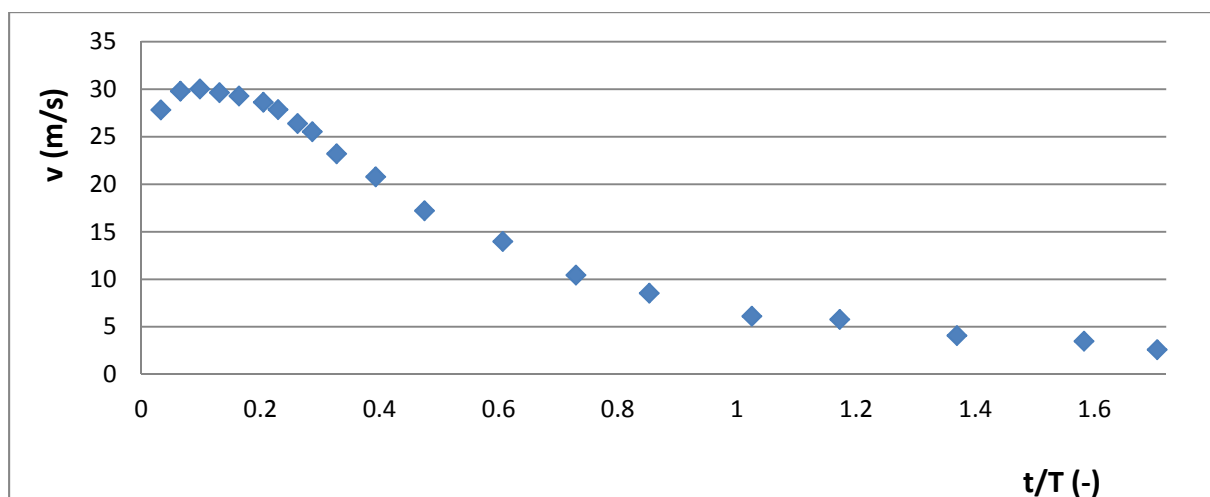
kde V je rychlost proudu (m/s) a U je napětí (V) které bylo naměřeno na sondě.

Nejdříve je měřen samotný proud bez desky. V následujícím grafu 4.4 jsou vyznačena naměřená maxima rychlosti v závislosti na vzdálenosti od trysky. V grafu 4.5 jsou stejná data jako v grafu 4.4, ale v závislosti na čase, y-ová osa je přepočtena na jednu dobu kmitu. V grafech jsou hodnoty pro výkon 5W, naměřené v ose trysky na syntetizovaný proud. Změřil jsem hodnoty i pro další výkony 1W a 3W.

Příloha graf 1 časový průběh rychlosti pro 1 kmit, graf 2 časový průběh rychlosti pro osu trysky.



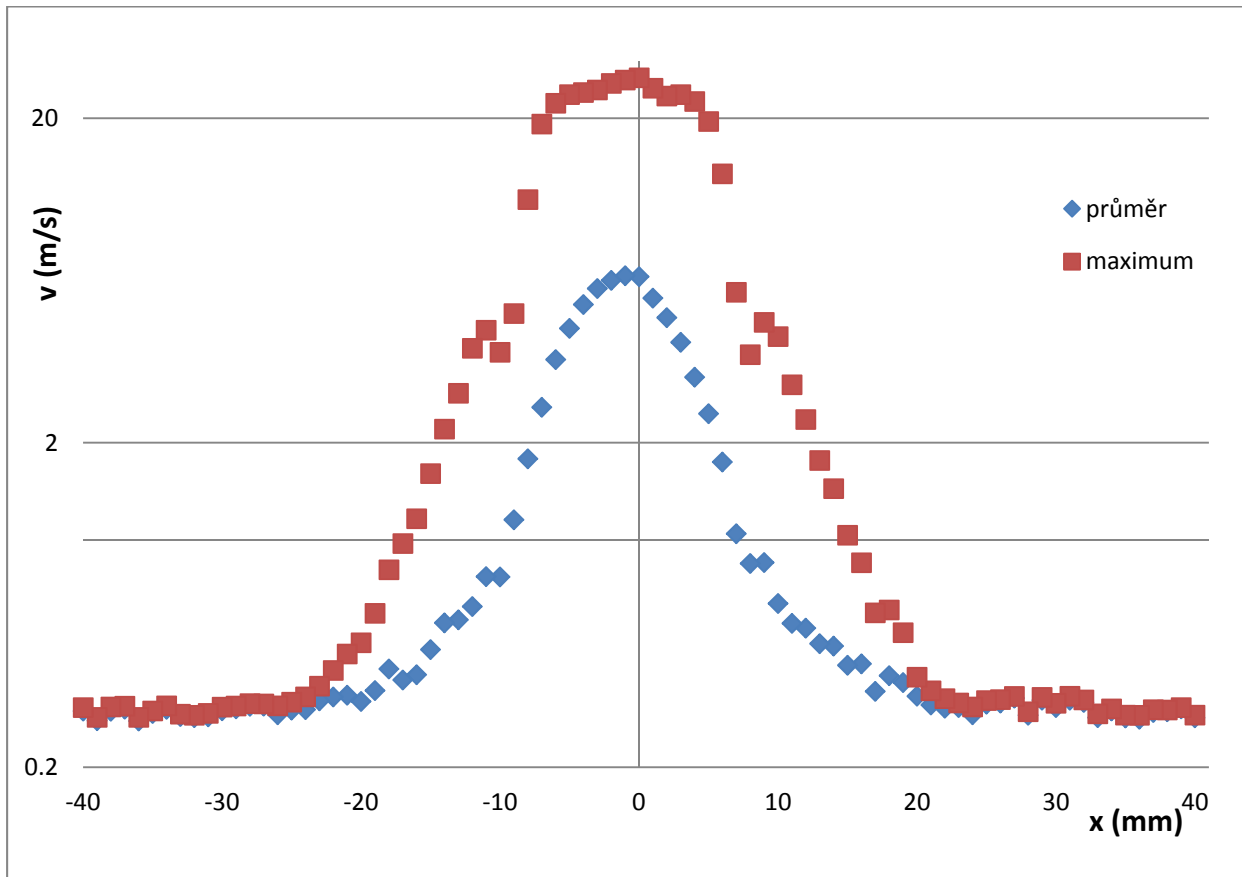
Graf 4.4: Maxima rychlosti v závislosti na vzdálenosti od trysky



Graf 4.5: Maxima rychlosti v závislosti na čase

V grafu je vidět že maximální rychlosti je dosaženo ve vzdálenosti $y = 1,5\text{cm}$ od trysky. Průběh rychlosti ve vzdálenosti 20mm od trysky, je znázorněn v grafu 4.6. Naměřilo se více hodnot, tyto jsou vybrány na ukázkou. Další měření byla prováděna v určité vzdálenosti od trysky, aby nebyla naměřena rychlost pouze v ose pro vzdálenost 5mm, 10mm, 20mm, 50mm a 100mm od trysky, pro výkony 1W, 3W a 5W. Polynom z kalibrace na určení rychlosti je v následující rovnici:

$$\begin{aligned}
V = & -398381,0379124 + 1856903,364812 \cdot U - 3826943,285468 \cdot U^2 \\
& + 4576960,644881 \cdot U^3 - 3500696,612891 \cdot U^4 + 1775711,445633 \\
& \cdot U^5 - 597349,8730591 \cdot U^6 + 128508,4705295 \cdot U^7 \\
& - 16043,15728899 \cdot U^8 + 885,5520993201 \cdot U^9
\end{aligned}$$



Graf 4.6: Průměr a maximum rychlosti v závislosti na vzdálenosti od osy trysky, ve vzdálenosti 20mm od trysky při výkonu 3W

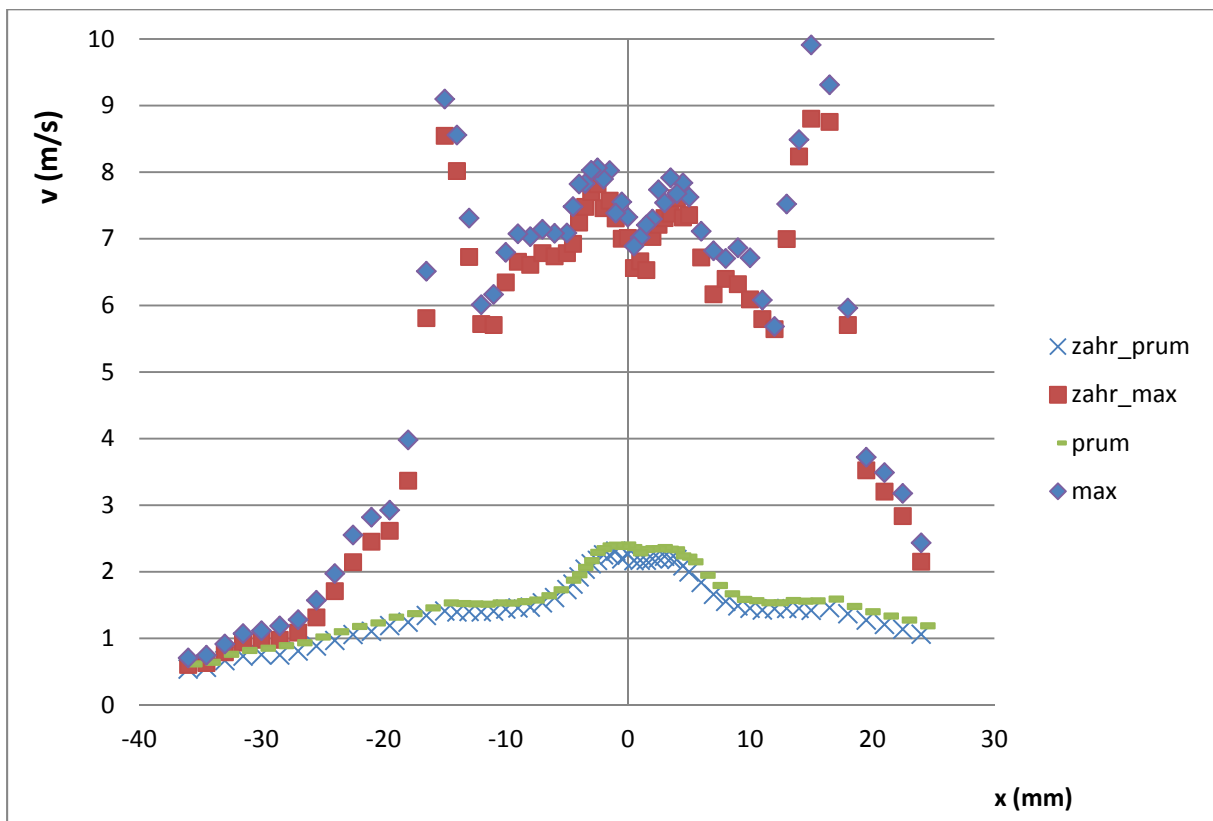
Na grafu 4.6 je vidět, že proud je osově symetrický. Jak maximální tak průměrné hodnoty rychlosti jsou symetrické podle osy.

Příloha graf 3-6 průběh rychlosti v 5mm, 10mm, 50mm, 10mm. Graf 7-8 porovnání v 20mm pro různé výkony. Graf 9 rychlost u hrdla.

Z naměřených a zpracovaných hodnot, lze určit charakteristiku syntetizovaného proudu vycházejícím z trysky. Určení volného proudu umožnilo určení hodnot pro měření s deskou. Další měření spočívalo v měření rychlosti proudu s deskou. Pro měření s deskou se měřilo ve vzdálenostech 10mm, 20mm a 50mm. Tato vzdálenost byla mezi tryskou a deskou. Pro toto měření byla použita jednodrátková sonda 55P15, která je

vhodnější pro měření u stěny. Sonda (měřící drátek) byla umístěna ve vzdálenosti 1mm od desky. Měření v těchto vzdálenostech bylo pro tři výkony trysky. Rychlostní profil byl naměřen jak s nezahřívanou deskou, tak se zahřívanou. Při zahřívání desce byl proud ovlivněn stoupajícím vzduchem nad zahřátou deskou. Porovnání hodnot, pro zahřívanou a nezahřívanou desku, je zobrazeno na grafu 4.7, kde jsou vyneseny hodnoty rychlosti jak průměrné tak maximální.

Příloha graf 10-11 průběhy rychlosti syntetizovaného proudu u stěny.



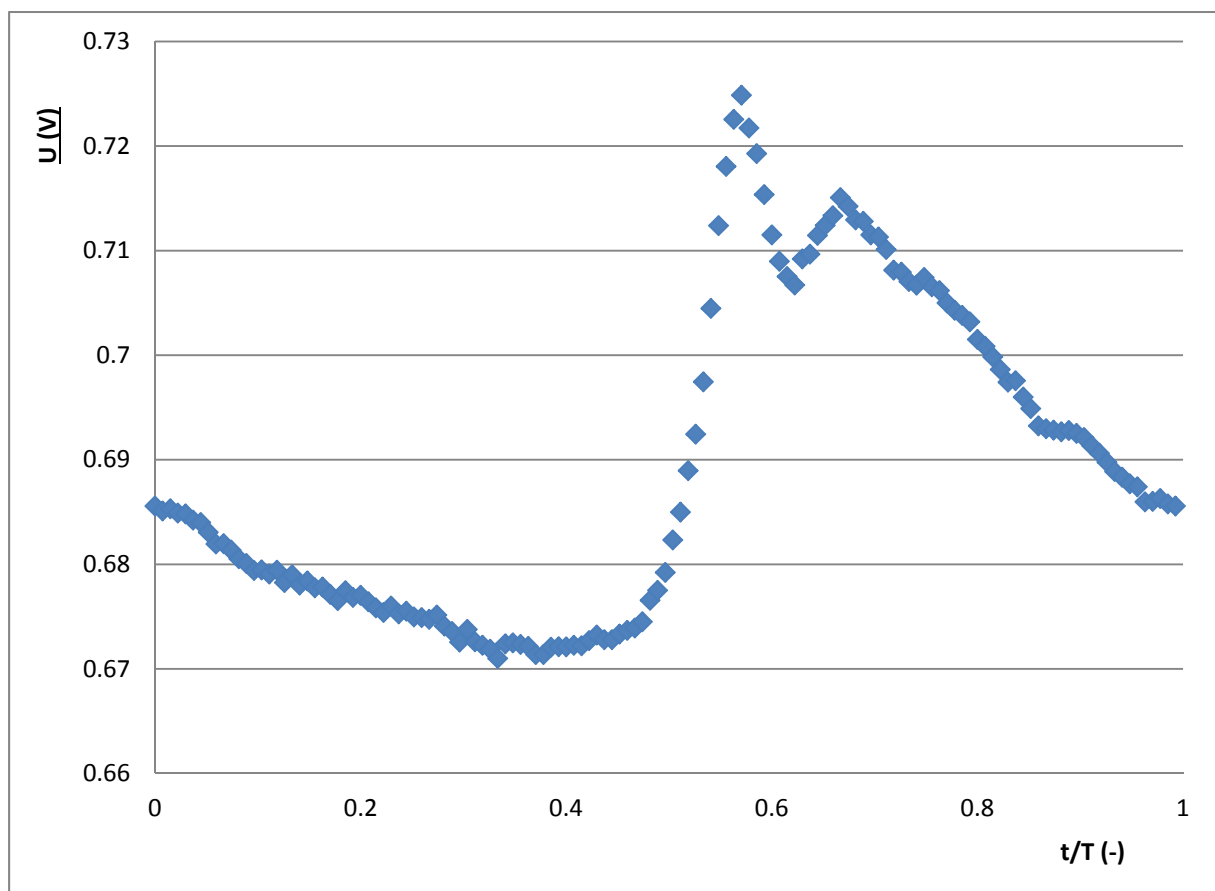
Graf 4.7: Porovnání průměrné a maximální rychlosti pro zahřívanou a nezahřívanou desku, měření vrstvy při 3W, ve vzdálenosti 20mm, při frekvenci 74Hz

Na grafu 4.7 je vidět, že při zahřívání desce se rychlost proudění snižuje, oproti nezahřívání desce, platí pro maximální dosahovanou rychlost, i pro průměrnou naměřenou rychlost. Také je zde vidět symetrie proudu podle osy y. Výrazná lokální maxima ve vzdálenosti 15mm od osy a průměrná hodnota, která se nezvyšuje, to značí zvýšení turbulence proudění v této oblasti. Také je patrné, že v ose trysky je rychlost nižší, než několik milimetrů od osy. Toto jsou nejpatrnější změny proudění při použití

desky. Jak je patrné z grafu, u stěny trysky není dosahováno takových rychlostí jako u volné trysky.

Po měření součinitele přestupu tepla sondou Heat Flux Sensor-gSKIN-XM, byla data zpracována. Během zpracování dat byla zjištěna nedostatečná časová odezva sondy na signál. Sonda byla určena za nevhodnou pro další zpracování výsledků.

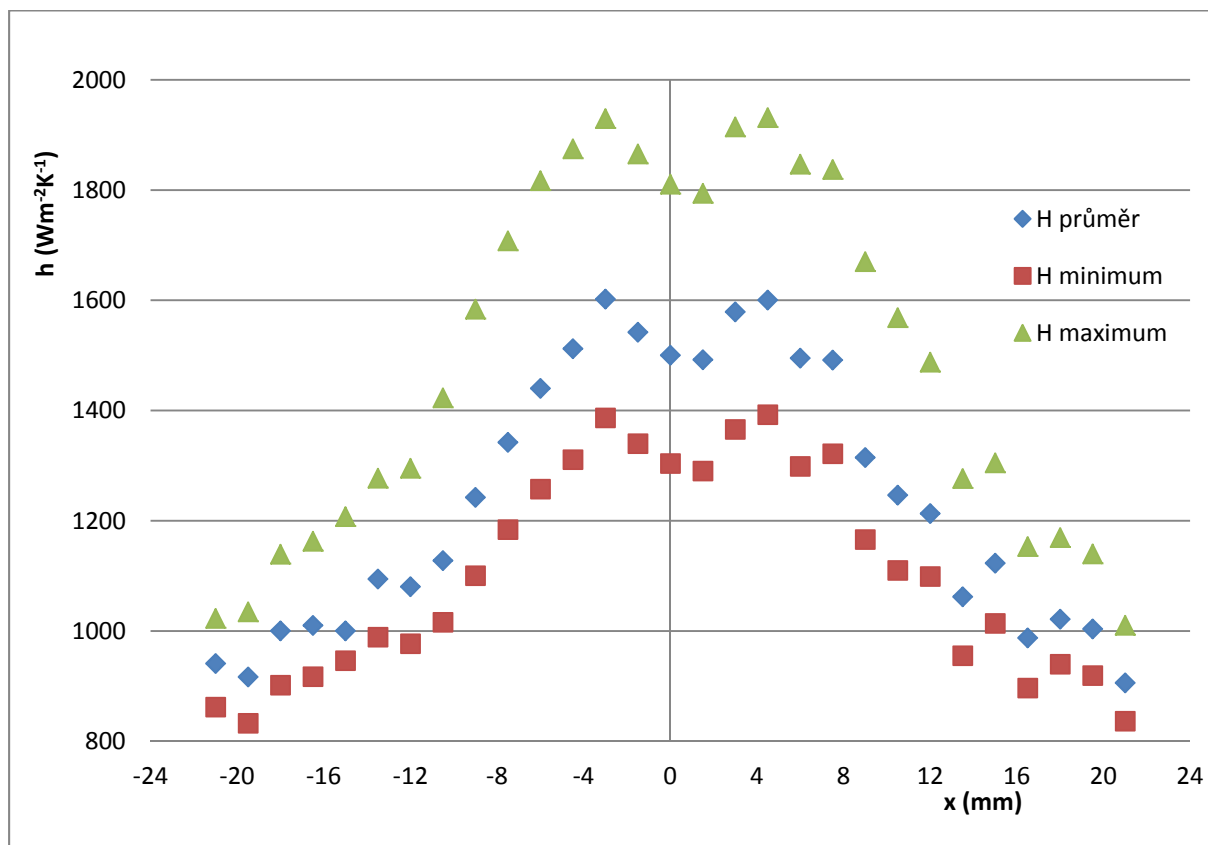
Dále se měří pomocí nalepovací filmové sondy 55R47, kterou využijeme k měření součinitele přestupu tepla. V grafu 4.8 jsou znázorněny naměřené hodnoty napětí, změřené sondou 55R47, při teplotě zahřívání desky 42°C a přehřátí sondy 0.05. Vzdálenost trysky od zahřívání desky je 20mm.



Graf 4.8: Hodnota naměřeného signálu v průběhu kmitu. Při teplotě desky 42°C, sondou 55R47, při přehřátí sondy 0,05

Na časovém průběhu naměřeného signálu během jednoho kmitu je vidět, že tvarem přibližně odpovídá časovému průběhu naměřené rychlosti u stěny. Tato podobnost je i pro další měření, jak pro různé vzdálenosti trysky od desky tak i pro jiné teploty desky, resp. přehřátí sondy.

Další přepočít je na součinitel přestupu tepla podle vzorce č. 2.25 Výsledné hodnoty z měření součinitele přestupu tepla jsou v následujícím grafu 4.9. V příloze jsou hodnoty součinitele přestupu tepla pro jinou vzdálenost zahřívávané desky od trysky syntetizovaného proudu pod čísly graf 12-13.



Graf 4.9: Porovnání hodnot součinitele přestupu tepla v závislosti na vzdálenosti od osy trysky. Teplota desky 42°C (přehřátí sondy 0,05), vzdálenost trysky od desky 20mm

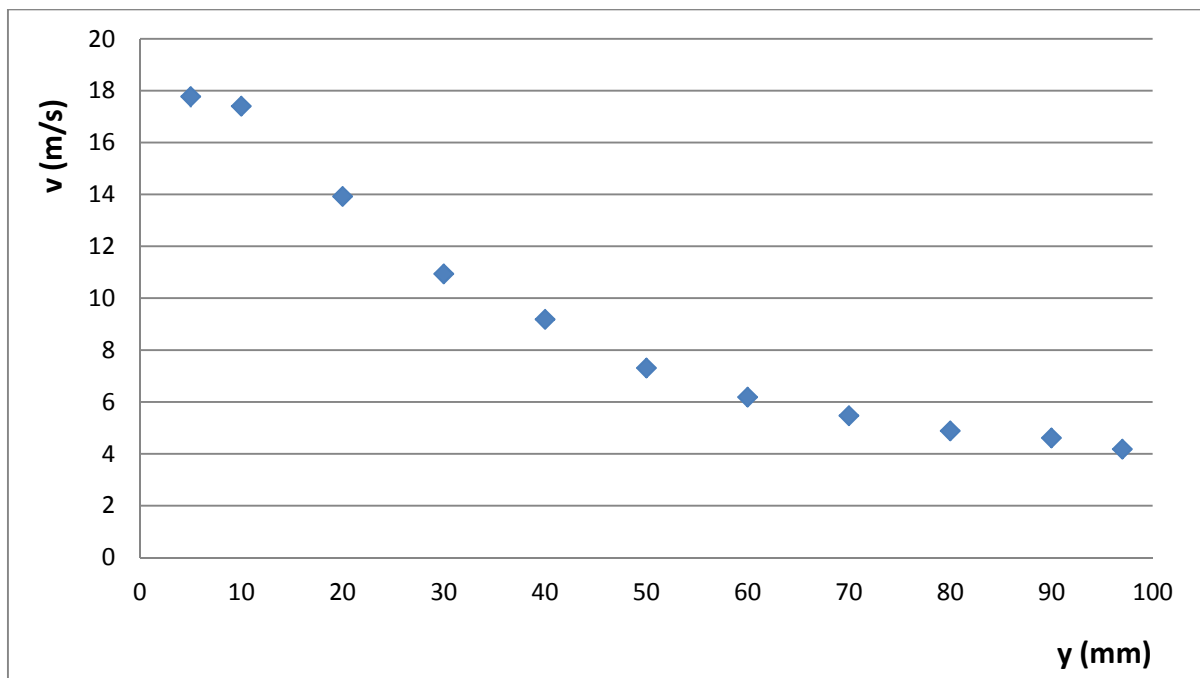
Pro dopadající proud v ose trysky je součinitel přestupu tepla nižší, než těsně vedle osy trysky. Při porovnání s rychlostí u stěny, kde ve vzdálenosti 15mm od osy je výrazné zvýšení maxima, pro součinitele přestupu tepla je toto zvýšení sotva postřehnutelné, ale je patrné. Příloha průběh součinitele přestupu tepla v jednotlivých bodech je v grafech 14-17.

4.2 Kontinuální proud

Kontinuální proud je mnohem jednodušší na zpracování. Na rozdíl od syntetizovaného proudu, kde se určuje proudění zprůměrované na jeden kmit, u kontinuálního proudu stačí vzít průměrnou hodnotu signálu. Pro změření rychlosti je použita jednodrátková sonda 55P11. Kalibrační polynom je v následující rovnici.

$$V = -398381,0379124 + 1856903,364812 \cdot U - 3826943,285468 \cdot U^2 + 4576960,644881 \cdot U^3 - 3500696,612891 \cdot U^4 + 1775711,445633 \cdot U^5 - 597349,8730591 \cdot U^6 + 128508,4705295 \cdot U^7 - 16043,15728899 \cdot U^8 + 885,5520993201 \cdot U^9$$

Určení rychlosti v kontinuální trysce je provedeno na základě rovností Reynoldsových čísel pro syntetizovaný, resp. kontinuální proud. Přepočítání je pro rychlost vzduchu proudu, který vychází z trysky. Rychlost je upravena pomocí škrtících ventilů, na požadovanou rychlost proudu, která je měřena sondou 55P11. V grafu 4.10 jsou znázorněny rychlosti kontinuálního proudu v ose trysky.

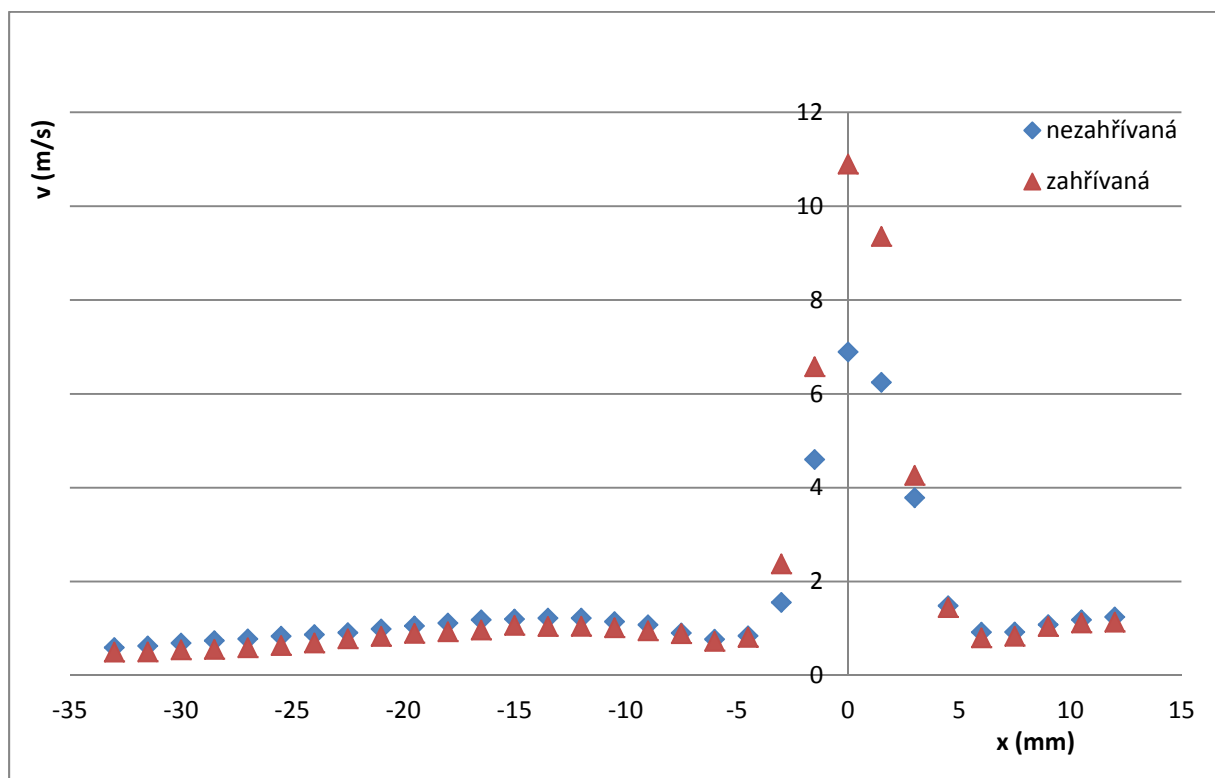


Graf 4.10: Rychlost v ose trysky (kontinuálního proudu), v závislosti na vzdálenosti od trysky y (mm)

Na grafu 4.11 je znázorněna rychlost proudění u stěny. Pro změření rychlosti je použita jednodrátková sonda 55P15, určená k měření u stěny. Kalibrační polynom je v následující rovnici.

$$V = 253811,9216272 - 957842,4810572 \cdot U + 1523370,862594 \cdot U^2 - 1298398,029925 \cdot U^3 + 604085,7028358 \cdot U^4 - 114709,0829442 \cdot U^5 - 24082,20207199 \cdot U^6 + 18286,55246804 \cdot U^7 - 3874,088401682 \cdot U^8 + 299,3155119764 \cdot U^9$$

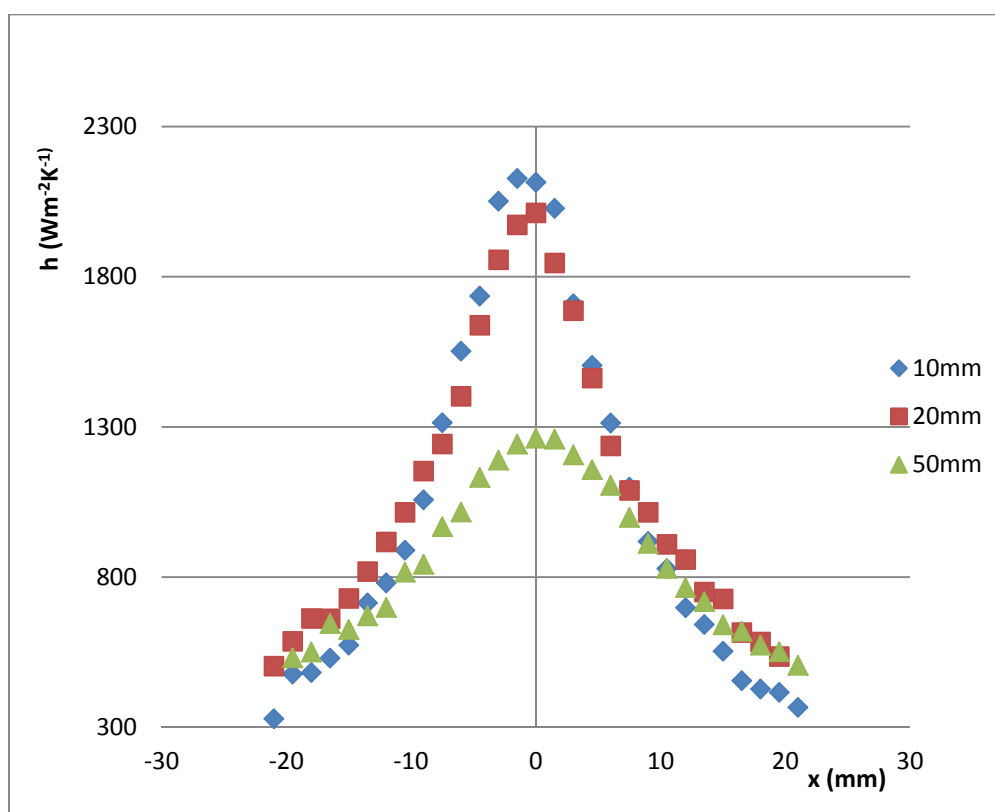
Kontinuální tryska je vzdálena 20mm od desky, měření probíhá pro nezahřívanou desku (okolní teplota) a pro zahřívanou desku. Toto měření bylo prováděno i pro hodnoty vzdálenosti desky od trysky 10mm a 50mm.



Graf 4.11: Rychlost u stěny ve vzdálenosti trysky 20mm, pro zahřívanou a nezahřívanou desku

Z naměřených dat je na grafu vidět osová souměrnost proudu. Při porovnání dat je patrné, že v místě dopadání kontinuálního proudu je rychlost vyšší při zahřívané desce, ale jinak pro ostatní naměřená data dále od trysky je rychlost vyšší pro

nezahřívající desku. Při měření ve vzdálenosti od osy trysky 5mm je naměřeno lokální minimum. Pokles rychlosti, a pak mírný nárůst je nejpravděpodobněji způsoben změnou směru rychlosti, když se proud zpomalí při dopadu na desku, poté proudí podle desky. Po proměření rychlostního pole následuje měření součinitele přestupu tepla filmovou sondou Dantec 55R47. Zpracované výsledky naměřeného součinitele přestupu tepla, jsou v grafu 4.12, který zobrazuje naměřené hodnoty pro přehřátí trysky 0,05 a teplotu desky 42°C.



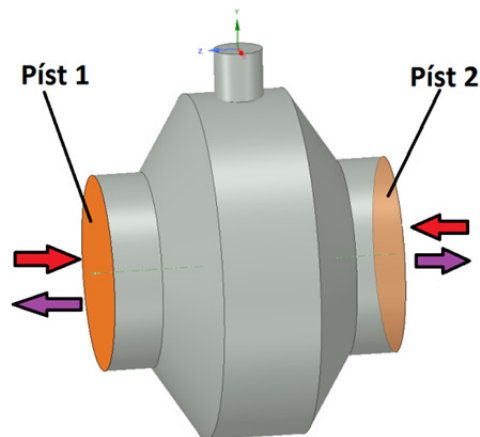
Graf 4.12: Porovnání hodnot součinitele přestupu tepla v závislosti na vzdálenosti od osy trysky. Přehřátí sondy 0,05 a různé vzdálenosti trysky od desky

V graf 4.12 ukazuje, jak se liší hodnoty součinitele přestupu tepla, pro různé vzdálenosti zahřívající desky od kontinuální trysky (hodnoty 10mm, 20mm, 50mm). Je patrné, že v ose trysky je součinitel přestupu tepla vyšší, pokud je kontinuální tryska blíže desce. Toto však není samozřejmost, pokud budeme dále od trysky, jak je patrné z měření. Pro vzdálenost 10mm (nejbližší hodnota, při které se měřilo) je patrné, že ve větší vzdálenosti od osy trysky, je naměřený součinitel přestupu tepla nejnižší (z měřených 3 hodnot).

5 Tvorba a nastavení simulace

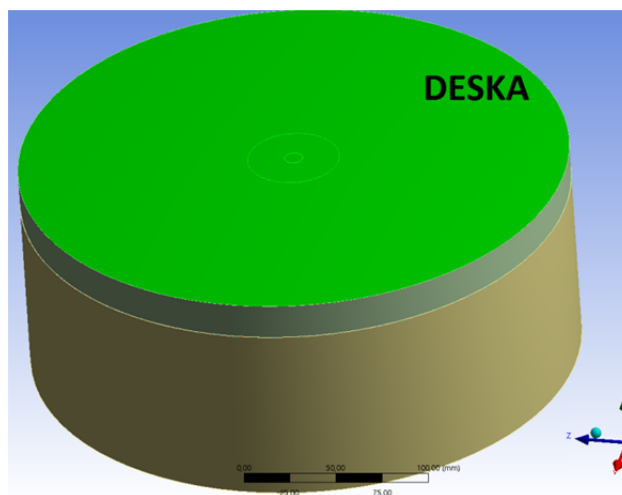
5.1 Sestavení simulace

Pro simulaci je použit program Ansys Fluent [18] studentská verze 18.2. V této verzi je limit prvků 512 tisíc, pro simulaci dané sítě. Pro simulaci této úlohy je to dostatečný počet prvků. V programu ANSYS v prostředí Workbench, je zvoleno pro simulaci Fluid flow (Fluent). Ve Fluentu je vytvořena geometrie simulace v části Geometry. Geometrie trysky je zobrazena na obr. 5.1, kde jsou také vyobrazeny stěny, označeny termínem píšť, tyto stěny slouží k nastavení pohyblivé sítě modelu. Geometrie trysky je rovině symetrická. Tato geometrie simulace je pracovně nazvána jako Model1.



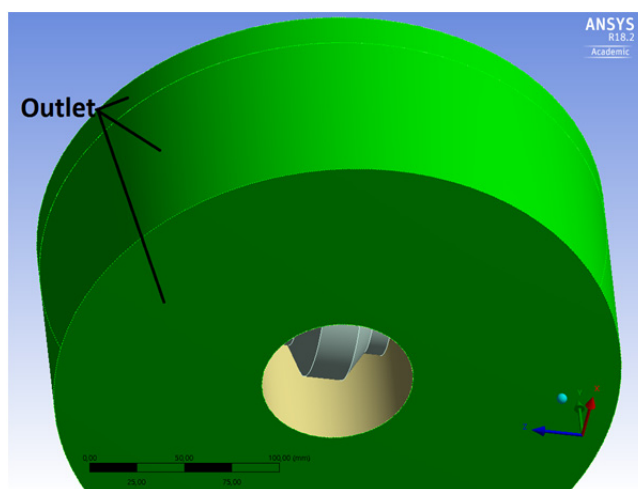
Obr. 5.1: Geometrie trysky, se znázorněnými pohyblivými plochami (písty)

Na geometrii trysky navazuje geometrie okolí. Veškerá další geometrie (kromě geometrie trysky) je osově symetrická. Prostředí okolo trysky bylo vytvořeno dostatečně velké, aby stěna modelovaného okolí neovlivňovala proud vycházející z trysky. Při tvorbě malého modelu okolí byl proud ovlivňován. Například u volného proudu s nedostatečným okolím se proud přikláněl ke straně modelu. Na obr. 5.2 je znázorněna plocha, která v modelu sloužila jako simulace zahřívání desky.



Obr. 5.2: Znáznorněná geometrie zahříváná deska

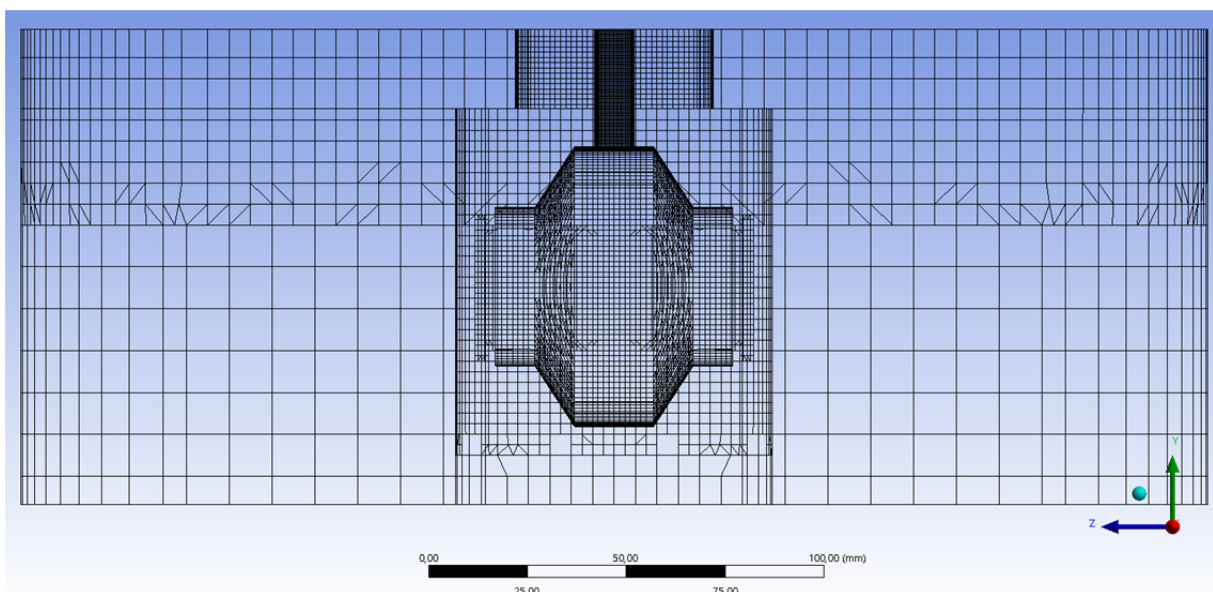
V experimentu byly na desku připevněny senzory, které měřily bodově. V simulaci budou výsledky vykresleny na celé ploše modelu. Pro experiment byly použity následující senzory. Filmová sonda Dantec 55R47 a d greenTEG Heat Flux Sensor – gSKIN-XM (pro HTC). Pro měření teploty byl použit termočlánek, který sloužil k řízení PID regulátoru. PID regulátor udržoval požadovanou teplotu desky. Dále v dané geometrii jsem zvolil vnější hranice Outlet, výstup do okolí, kde v simulaci mohlo procházet dané médium z modelu. Hranice do okolí Outlet je vyobrazena na obr. 5.3. V modelu je dané médium, nasimulován vzduch. Médium – pracovní látka pro simulaci se definuje až po vytvoření geometrie a následně sítě, při zadávání podmínek pro simulaci.



Obr. 5.3: Znáznornění geometrie s vyznačenou plochou Outlet

5.2 Tvorba a velikost sítě

Pro lepší tvorbu sítě byl vytvořen geometrický model z několika částí. Základní rozdělení je tryska, proud a okolí. Tryska je vytvořena tak aby model odpovídal reproduktorům a zároveň mohl využít pohyblivého modelu sítě. Jako pohyblivá část je použit píst. Stěna cyklicky kmitá, jako hlava pístu u spalovacího motoru. Jedná se o klasický klikový mechanismus. U klikového mechanismu není pohyb pístu sinusový, pokud při konstantních otáčkách, budeme uvažovat výchylku pístu v závislosti na čase. Pokud ale použijeme výrazně delší ojnici oproti klice mechanismu, bude se výchylka pístu blížit sinusovému signálu. Sinusový signál byl v experimentu použit jako budící signál pro trysku (na sinusový signál byly napojeny dva reproduktory). Jako generátor elektrického signálu byl použit generátor kmitů. Jako generátor kmitů je vytvořena v simulaci jedna část nazvaná tryska, jejíž geometrie je na obr. 5.1. Proud, který vychází z trysky, je tvořen jemnou sítí. Jemná síť byla zvolena, protože v této oblasti nás zajímají vlastnosti proudu. Jemnější síť nám dává přesnější data ze simulace. Pro lepší zpracování, kratší výpočetní čas a nižší náročností zpracovávání výsledků, je jemnější síť zvolena v oblasti, která je pro nás důležitá. Jako část proudu jsou v modelu dvě části, nazvané proud tryska a proud u hrdla. Proud a okolí jsou osově symetrické, celá úloha vyšetřování proudu a součinitele přestupu tepla, se dá považovat za osově symetrickou. Okolí je tvořeno třemi částmi, proud okolí, deska okolí a okolí zpětné. Okolí pro model je vytvořeno hlavně z důvodu, aby kraj modelu neovlivňoval proud, který nás při simulaci zajímá. Síť je vyobrazena na obr. 5.4.



Obr. 5.4: Vnější pohled na vytvořenou síť pro model1

Při tvoření sítě je nejdříve nutné zkontrolovat kontakty geometrie. Kontakty (Connections) se vytvoří při otevření části na tvoření sítě (Meshing) automaticky. Je nutné automatické kontakty zkontrolovat, a je vhodné vytvořit znovu vlastní kontakty. Po vytvoření kontaktů jsem zvolil pro každou část sítě velikost elementu. Pro nastavení velikosti je použit pro úpravu sítě Sizing. Obecné nastavení generované sítě. Sít' je vytvářena pomocí metody CutCell (část Assembly Meshing), kvalita sítě (část Quality) smoothing→Medium, růst sítě (část Inflation) Inflation Option→Smooth Transition, Transit Ratio→0,272 , Growth Rate→1,2. Celková síť je tvořena 278554 uzlovými body a 252249 elementy. Pro tvoření sítě, se u jednotlivých částí modelu lišilo nastavení Sizing, velikost elementu (Element Size). Hodnoty velikosti elementu jsou v následujících řádcích, zároveň s počtem uzlových bodů a počtem elementů pro danou část modelu. U volby Sizing je stejné nastavení pro všechny části následující, v pokročilém nastavení (část Advanced) Size Function→Uniform, Behavior→Soft, Growth Rate→1,2.

Celkem:	uzlové body 278554	elementy 252249	
Proud u hrdla:	uzlové body 45140	elementy 43212	velikost 0,5mm
Proud okolí:	uzlové body 63206	elementy 55312	velikost 2,0mm
Deska okolí:	uzlové body 25492	elementy 20172	velikost 8,0mm
Tryska:	uzlové body 77609	elementy 75521	velikost 2,0mm
Tryska hrdlo:	uzlové body 22727	elementy 21406	velikost 0,5mm
Okolí zpětné:	uzlové body 44380	elementy 36626	velikost 16,0mm

5.3 Nastavení modelu a výpočet úlohy

Nastavení modelu v části General, je nastaven časový krok a také zapnuta gravitace, Time→Transient, gravitace je v modelu ve směru osy Y, hodnota tíhového zrychlení je zadána 9,81 m/s². Další nastavení, které se nastavuje, je část modelu (Models), zde je zapnut energetický model (Energy→On), model pro viskozitu je zvolen, k-omega SST (Viscous→SST k-omega), tento model je vybrán po konzultacích. Pro daný model je potřeba vybrat látku, se kterou se bude pracovat. Nastaven je vzduch, je potřeba zkontrolovat, že jsou nastaveny všechny části modelu, se správným materiálem (Fluid→Air). Dále se pokračuje v nastavení dalších částí, je potřeba nastavit teplotu zahřívání desky. Úprava teploty se provede v části Boundary Condition, pro příslušnou

část. Teplotu na desce (podle experiment zahřívání deska) je nastavena na 315,15K. Počáteční teplota simulace (veškerý vzduch) je nastavena na 300,15K. Nastavení počáteční teploty se provede v části Solution→Initialization. Dále je potřeba nastavit dynamickou síť. Nastavení dynamické sítě se provádí v části Dynamic Mesh, zde zvolíme v Mesh Methods metodu Layering. V nastavení (Options) zvolíme In-Cylinder. Tato volba umožňuje nastavení pohybu sítě jako pístu. Pohybuje se nám rovinná část sítě jako hlava pístu klikového mechanismu, tyto části jsou předem označeny jako píst1 a píst2. Nastavení pohybu je stejné jako pro klikový mechanismus. Aby bylo docíleno pohybu, kde výchylka pístu bude podobná sinusovce, je volena ojnice mechanismu výrazně delší, než klika mechanismu. Nastavení klikového mechanismu. Pro 74Hz je nastaveno 4440rpm (otáček za minutu), perioda kliky na 360° (Crank Period), velikost úhlu pootočení kliky na jeden časový krok 1° (Crank Angle Step Size), nastavení poloměru kliky 1,5mm (Crank Radius), délka ojnice 1m (Connecting Rod Length). Poměr mezi ojnící a klikou je větší jak 100:1, pohyb pístu se dá považovat za sinusový.

Úloha je cyklicky se opakující, je-li dán předpoklad, že proud se cyklicky opakuje při každém kmitu trysky. Tedy, že syntetizovaný proud a další vlastnosti například součinitel přestupu tepla na desce, můžeme určovat pro jeden kmit. V simulaci je problém, že na začátku simulace je statická úloha. Aby byl tento problém odstraněn, protože prostředí je na začátku statické, je potřeba nechat proběhnout simulaci několika kmitů. Zjednodušeně řečeno, je potřeba rozeběhnout simulaci. Po dostatečném množství kmitů se prostředí rozpohybuje a proud v simulaci se chová cyklicky, není znatelný rozdíl mezi jednotlivými kmity. Aby náročnost úlohy nebyla tak velká (zkrácení výpočetního času), je na začátek simulace zvolen větší krok. Větší krok znamená, že je nastaven větší úhel pootočení klikového mechanismu na jeden časový krok. Simulace není tak přesná s větším časovým krokem, ale pro rozhýbání statického prostředí nám stačí menší přesnost, se kterou uvedeme prostředí do pohybu. Na začátek je zvoleno pootočení klikového mechanismu na jeden časový krok 10°. Při takto velkém pootočení se výpočet dostal na maximální zadaný počet iterací na jeden časový krok. Dále se krok zmenšoval na pět stupňů, a pak na tři stupně pro jeden časový krok. Pro simulaci je poté zvoleno pootočení o 1 stupeň na jeden časový krok. Tato podrobná simulace, kdy na jeden kmit je potřeba 360 časových kroků, proběhla jako 23. kmit. Při zmenšení pootočení, jemnější krok, nebyl potřeba tak vysoký počet iterací, výpočet v časovém kroku byl dopočítán po 3 až 4 iteracích. Při pootočení o deset stupňů nestačilo ani 10

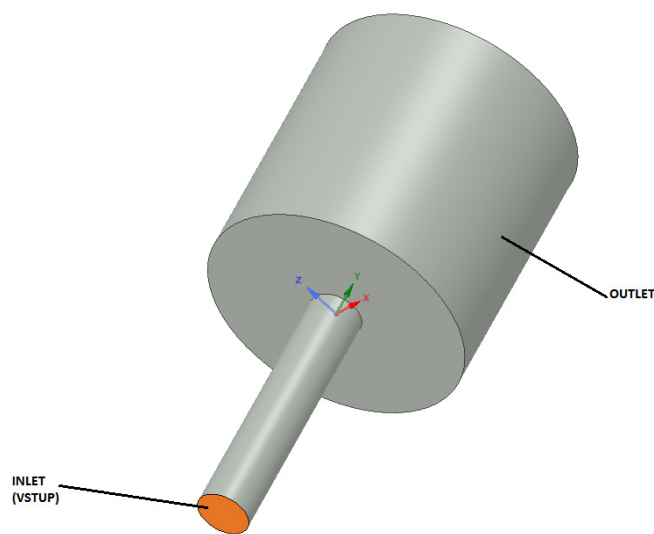
iterací, 10 iterací bylo nastaveno jako maximum. Pro 23. kmit, při kterém byl časový krok po jednom stupni, jsou ukládána výsledná data každý třetí časový krok. Takže v jednom kmitu je 120 výsledných časových kroků. Dalších dvacet kmitů bylo po dvou stupních na jeden krok, zde není podrobný záznam, výsledky byly ukládány po 90° otočení. Podrobné kmity jsou kmity 47. a 48., kde je krok snižen na jeden stupeň na časový krok. U této simulace je ukládán výsledek z každého časového kroku. Těchto 720 výsledků zabírá 40GB místa, to odpovídá necelým 60MB na jeden výsledek. Při vytváření videa, kde je 24 snímků za sekundu, vznikne video, kde jeden kmit trvá 15 sekund. Tyto poslední dva kmity již můžeme považovat za cyklické, protože proud se již nemění, a to od sledovaného 23. kmitu. I pro dvacet kmitů po sobě následujících, jsou výsledné hodnoty téměř shodné. Tento počet kmitů je pro danou úlohu dostatečný.

5.4 Úprava geometrie a sítě

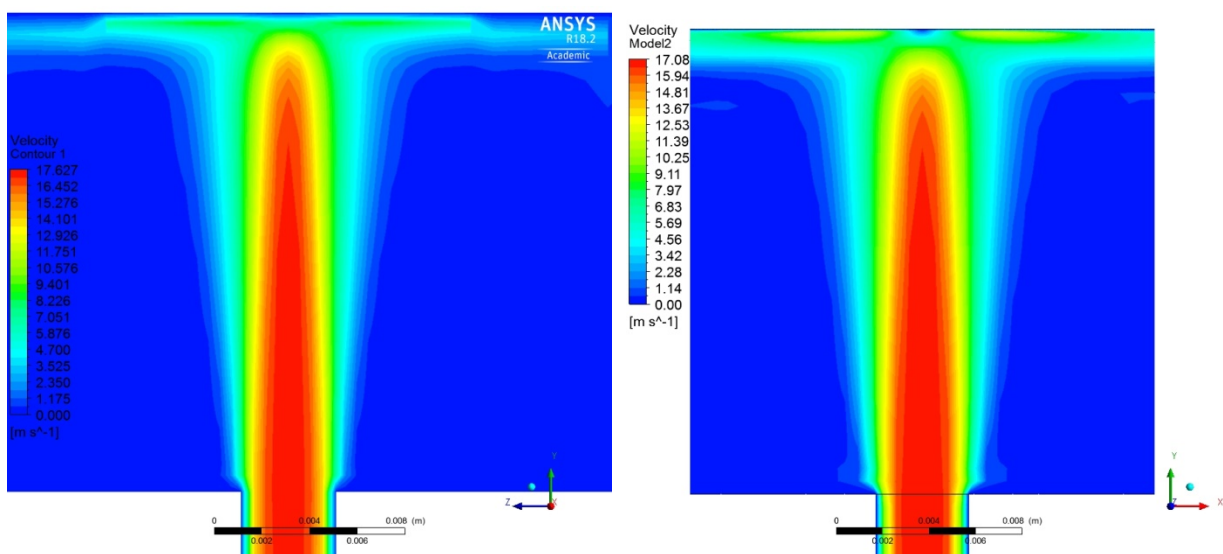
U předešlého modelu bylo několik nedostatků, které je potřeba odstranit. Upřesnění teplot a rychlostí, tak aby odpovídaly měřenému experimentu. Hodnoty jsou vybrány pro měření experimentu při 3W výkonu syntetizované trysky a zahřátí desky na 42°C. Hlavním problémem je vznik lokálních maxim, nejdříve bylo předpokládáno, že se jedná o turbulenci proudění, protože i u experimentu byly naměřeny. Při podrobnějším pohledu na výsledky bylo zjištěno, že lokální maximum pro součinitel přestupu tepla není způsobeno zvýšením rychlosti, ale změnou sítě. U této metody vysítování dochází ke skokové změně velikosti buňky sítě, a na tomto přechodu velikosti buňky vzniká zvýšení součinitele přestupu tepla. Ověření spočívalo v tom, že při změně geometrie, a tedy posunu změny velikosti buňky, se zároveň se změnou velikosti buňky posunulo i maximum součinitele přestupu tepla. Proto je pro následující model zvolena jedna velikost buňky u stěny.

Pro určení parametrů simulace je potřeba udělat několik předešlých simulací, aby se dané hodnoty mohly určit. Pro syntetizovaný proud je pohyb stěny pístu nastaven podle rychlosti vzduchu na výstupu z trysky. Jako požadovaná rychlost je uvažovaná naměřená rychlost při experimentu (pro daný výkon trysky). Pro kontinuální trysku je rychlost na výstupu u trysky 17,6m/s podle experimentu, ale pokud bychom zadali hodnotu na vstupu, přes celý průřez 17,6 hodnota na výstupu z trysky by byla vyšší, protože rychlostní pole se v průřezu trysky mění. Pro danou odpovídající rychlost na výstupu z trysky a pro danou délku trysky byla postupným iterováním dané rychlosti na vstupu určena rychlost do zadání na 14,3m/s. Tato rychlost odpovídá pro novou geometrii modelu a typu sítě, který byl zvolen.

Upravená geometrie je na obr. 5.5, pracovní název jako model 2. Tento model je pro kontinuální trysku, kde jako vstup je zadaná rychlost na celé ploše. Aby se v trysce vytvořil rychlostní profil, podobně jako v reálném případě, je zvolena dostatečná délka trysky 20mm. Tento menší model je určen pro vyhodnocení součinitele přestupu tepla. Při porovnání rychlostního profilu, je rychlostní profil pro oba dva modely stejný (podobný), porovnání je na obr. 5.6. Nastavení simulace zůstává stejné, jako v předešlém případě pro model1. Rozdíl je v síti, kde zahřívající deska je tvořena buňkami stejné velikosti, aby výsledná data nebyla ovlivněna změnou velikosti buňky.



Obr. 5.5: Upravená geometrie pro kontinuální trysku (model2)

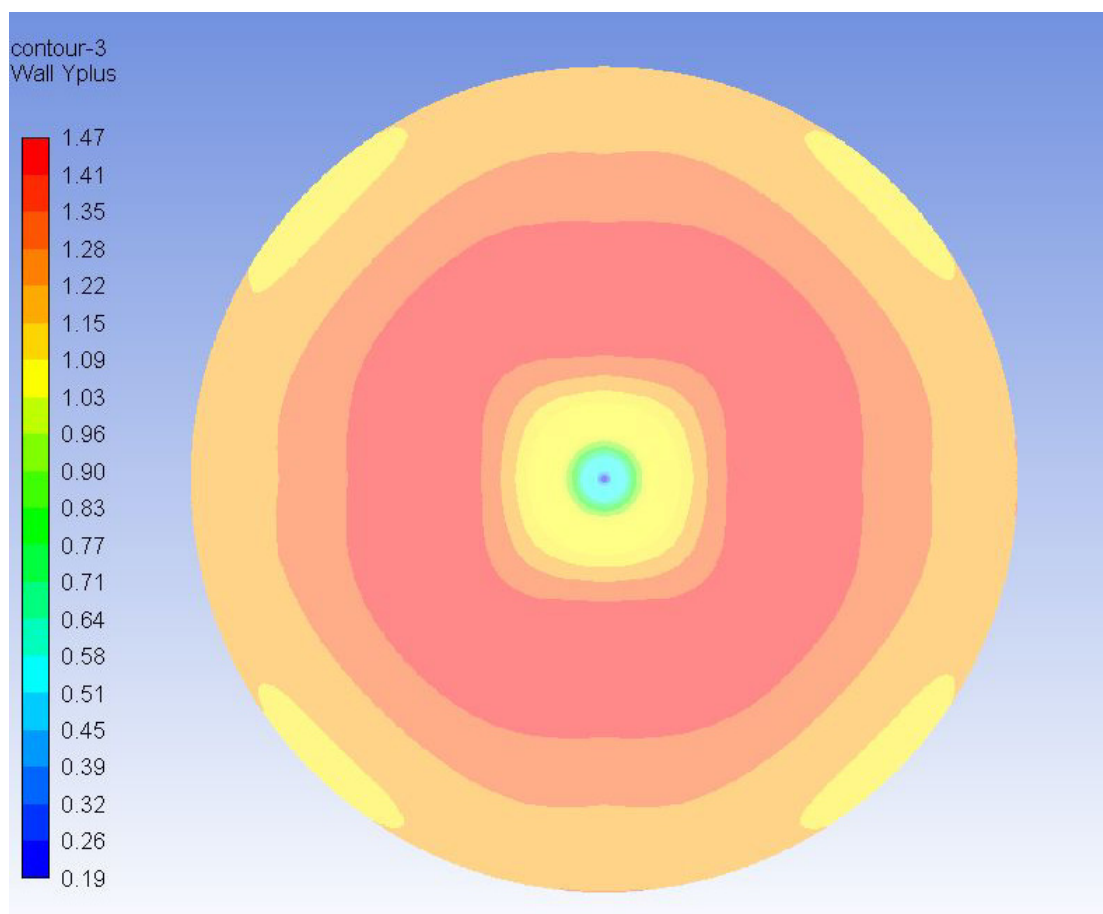


Obr. 5.6: Porovnání rychlostního profilu mezi modelem1 (vlevo) a modelem2 (vpravo)

6 Výsledky simulace

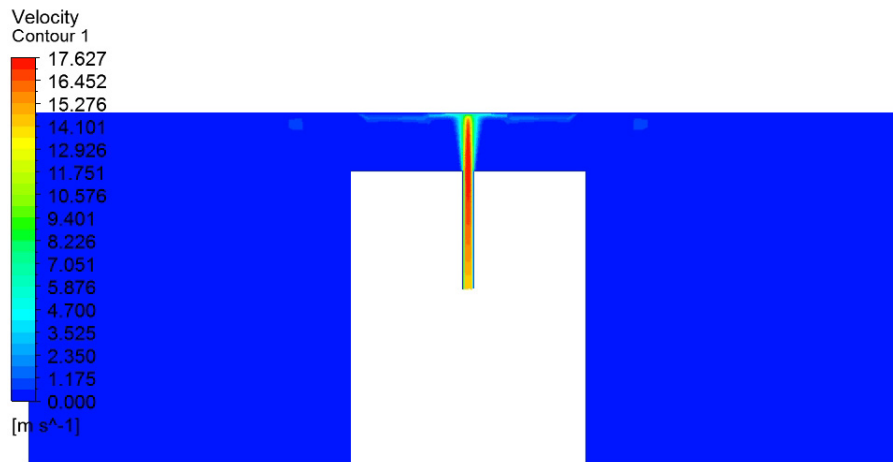
6.1 Kontinuální proud

V simulaci je použit model viskozity SST k-omega. Aby tento model pracoval správně, je potřeba, aby hodnota funkce Y_{plus} byla do hodnoty kolem jedné a nepřesahovala hodnotu 5. Na obr. 6.1 je znázorněna hodnota funkce Y_{plus} , která tyto podmínky splňuje, obrázek upozorňuje plochu zahříváné desky, na které je poté zkoumán součinitel přestupu tepla.

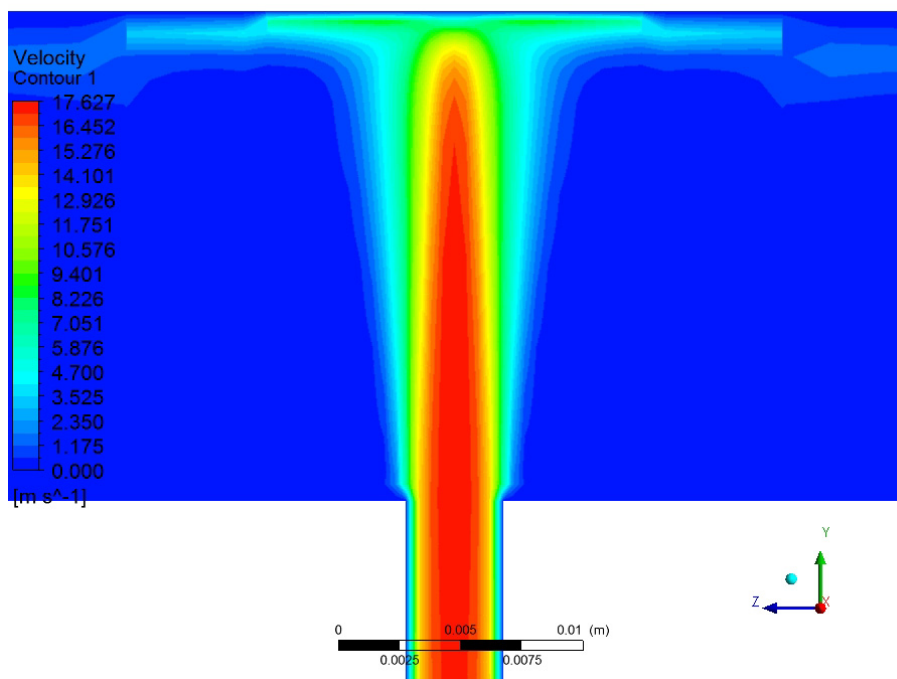


Obr. 6.1: Hodnota funkce Y_{plus} , na zahříváné desce při simulaci

Při použití modelu1 je veliké okolí okolo zkoumaného proudu, na obr. 6.2 je zobrazena rychlost proudění v řezu rovinou, která dělí simulovaný objem na polovinu. Pro lepší přehlednost proudu, je přiblížení proudu znázorněno na obr. 6.3.



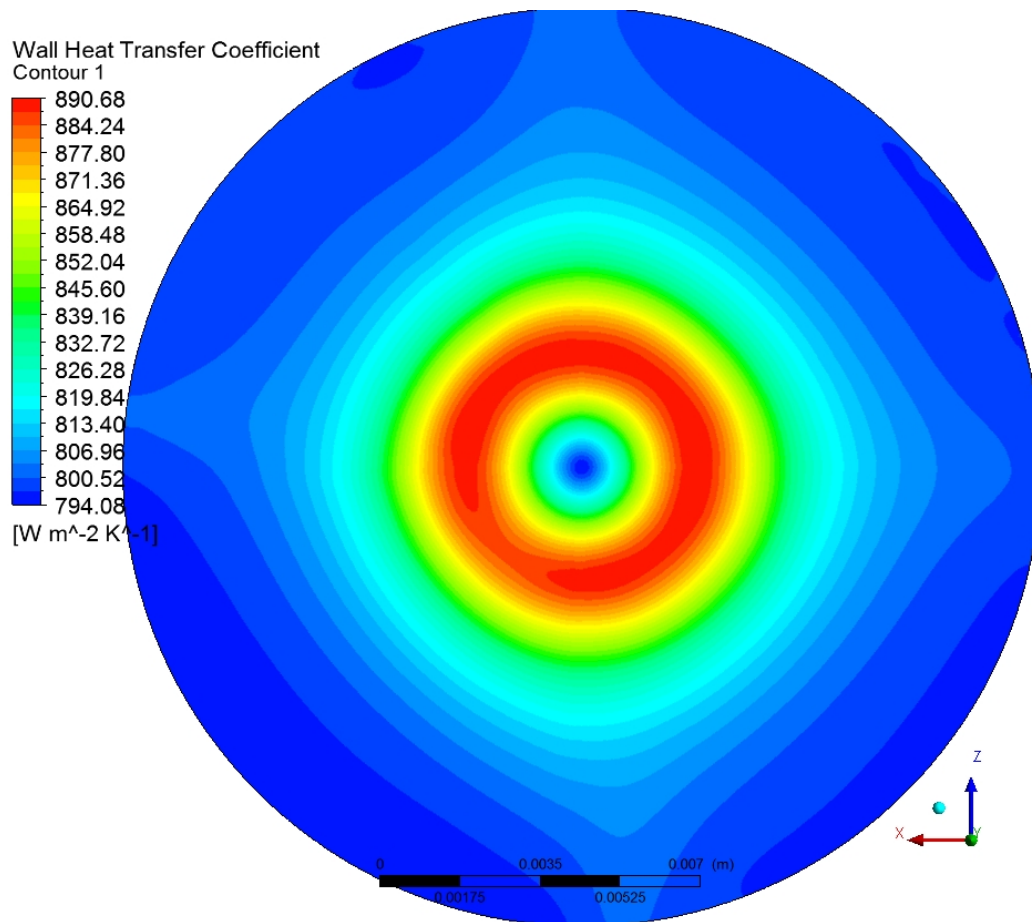
Obr. 6.2: Zobrazení rychlosti kontinuální trysky, pro model1



Obr. 6.3: Zobrazení rychlosti kontinuální trysky, přiblížena část trysky

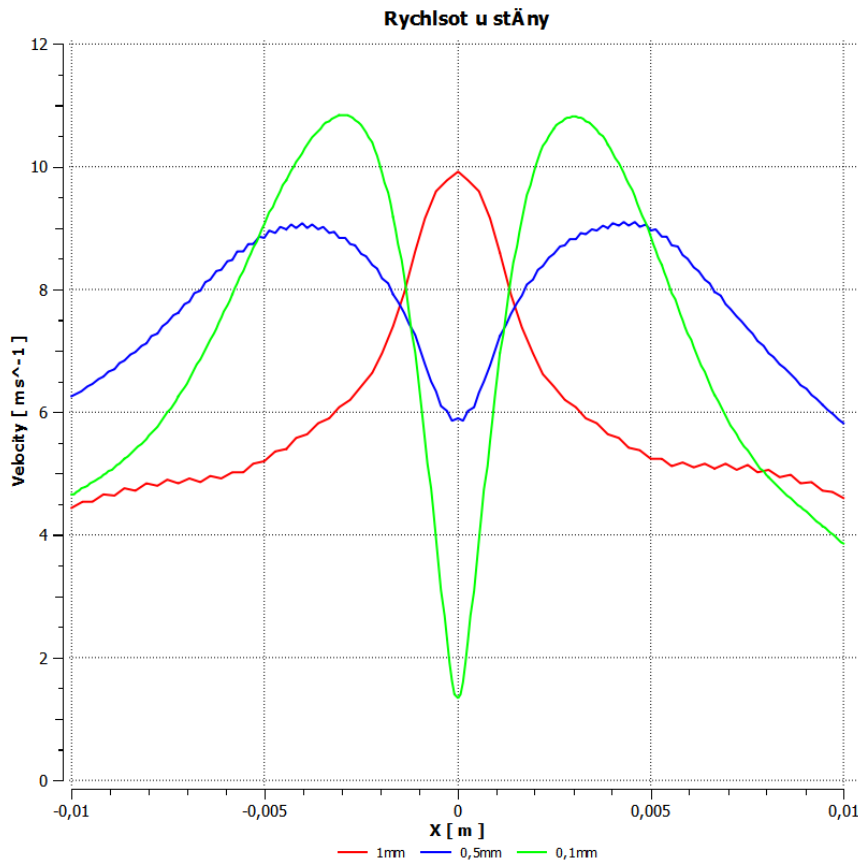
Rychlostní profil určený v simulaci odpovídá očekávaným hodnotám, v další části bude porovnání simulace s naměřenými hodnotami při experimentu. Na obr. 6.2 je zobrazen řez modelem simulace, aby bylo znázorněno dostatečné okolí proudu. Na obr. 6.3 je patrné, že rychlost u stěny vykazuje nepravidelnosti, to je způsobeno změnou velikosti sítě. Změna velikosti sítě působí hlavně problémy při určování součinitele přestupu tepla, proto byl zvolen model 2.

Hodnoty součinitele přestupu tepla, ze simulace pro model2, na zahříváné desce jsou znázorněny na obr. 6.4.



Obr. 6.4: Vypočtený součinitel přestupu tepla pro kontinuální proud na modelu2

Jelikož součinitel přestupu tepla ovlivňuje rychlost proudění u stěny, je v následujícím grafu znázorněna rychlost proudění u stěny, pro model2. V grafu 6.1 je zobrazena rychlost proudění v závislosti na vzdálenosti od osy, data jsou zobrazena pro vzdálenost od stěny 1mm, 0,5mm a 0,1mm.

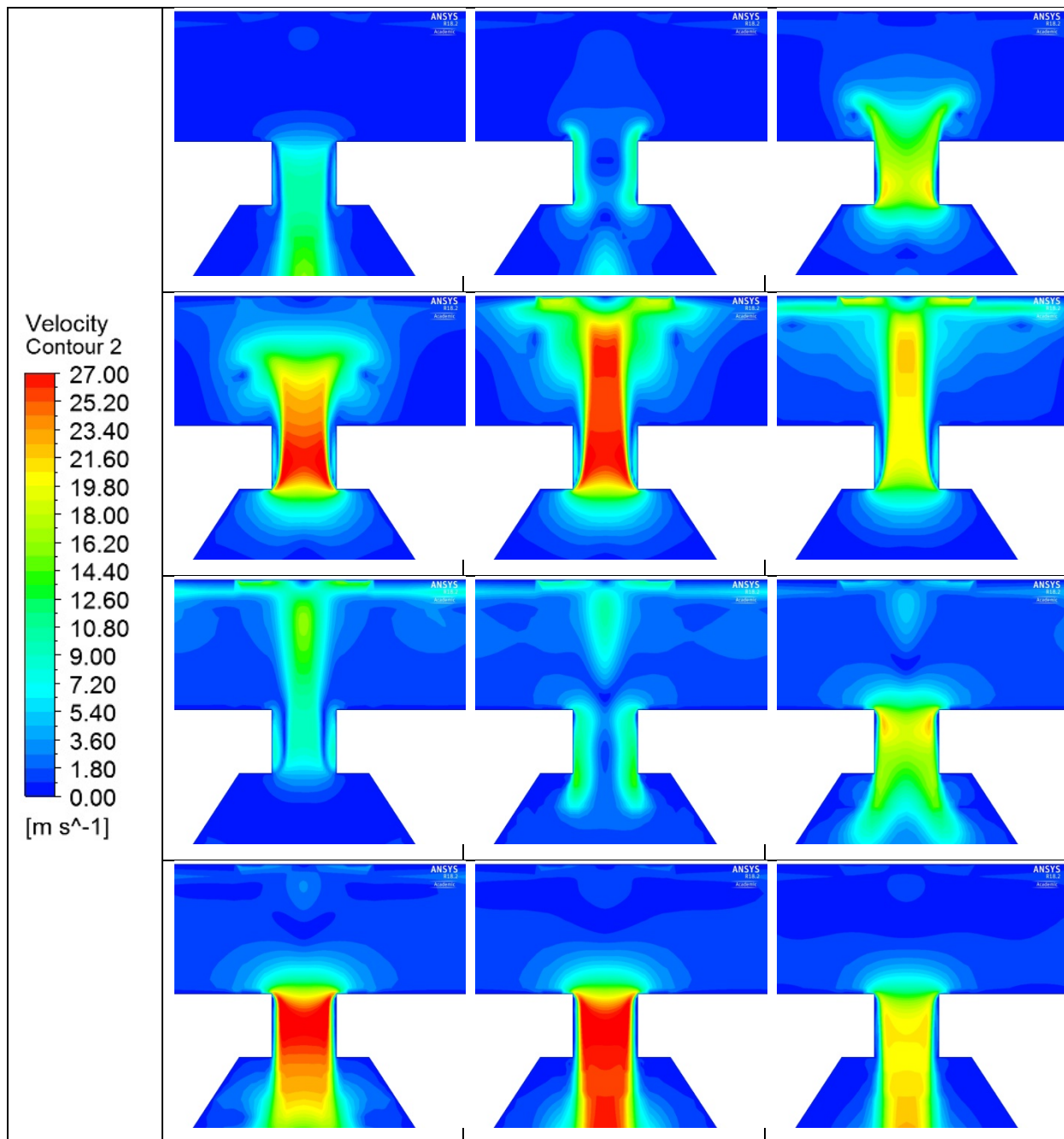


Graf 6.1: Rychlost u stěny v závislosti na vzdálenosti od osy trysky, hodnoty pro vzdálenost od stěny 1mm, 0,5mm a 0,1mm, z modelu2

Rychlost u stěny nejbližší desce koresponduje se součinitelem přestupu tepla na zahřívání desce, alespoň co se lokálních maxim a minim týče. Z grafu je patrné, že čím blíže stěně, tím více se projevuje zpomalení proudu v ose trysky, a také je výrazně vyšší rychlost při obtékání této zpomalené části.

6.2 Syntetizovaný proud

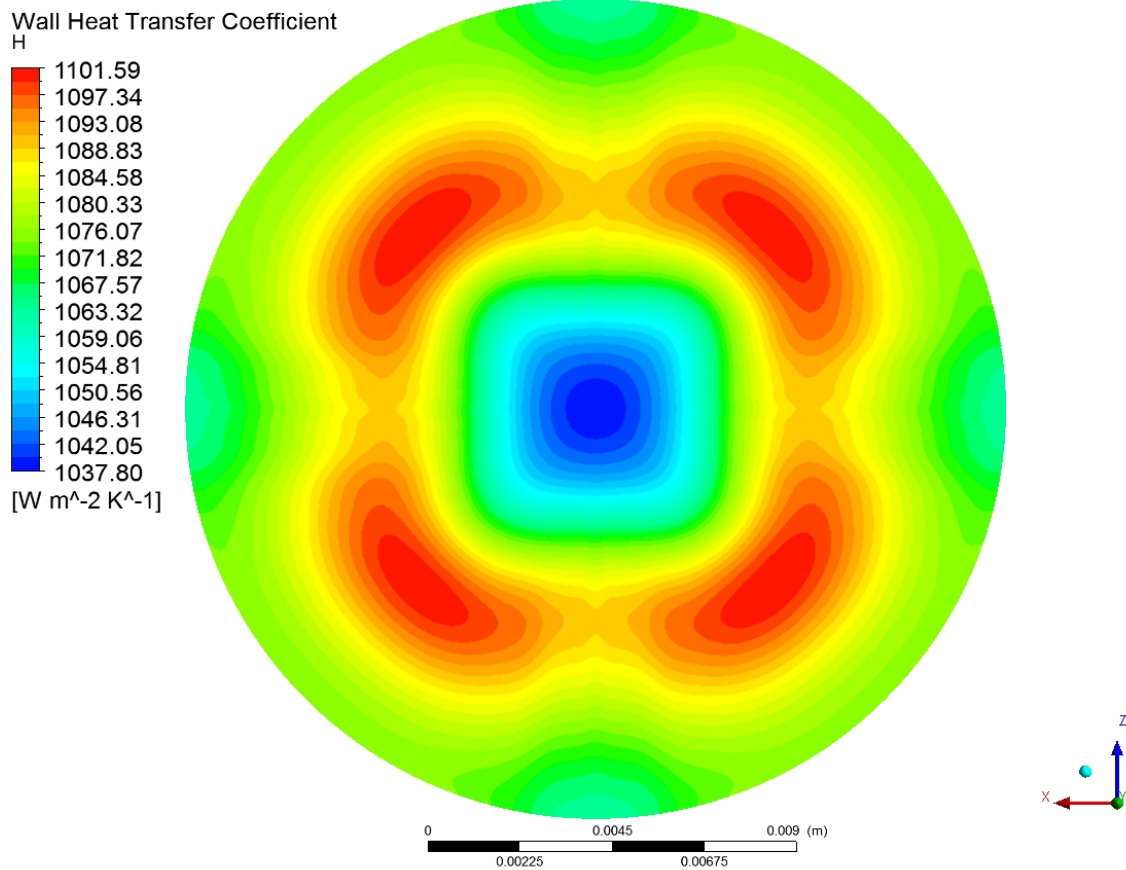
Zobrazení výsledků pro syntetizovaný proud je složitější, než pro kontinuální proud, u syntetizovaného proudu je totiž potřeba zachytit časový průběh. Pro syntetizovaný proud jsou také použity oba modely, model1 s dodatečným okolím pro rychlostní profil a model2 pro určení součinitele přestupu tepla. Na obr. 6.5 je zobrazen průběh rychlosti.



Obr. 6.5: Znáznornění průběhu rychlosti syntetizovaného proudu na výstupu z trysky
 (postup zleva doprava, pak další řádek)

Při vytlačování vzduchu z trysky je patrné, že se tvoří vír po stranách proudu, ale nedojde k jeho rozvinutí, vzhledem ke vzdálenosti trysky a desky. U desky je opět patrné že změna velikosti buňky má vliv na proudění u desky. Získaný rychlostní profil ze simulace odpovídá předpokladům o syntetizovaném proudu z teorie.

Na obr. 6.6 je znázorněn HTC pro model2.



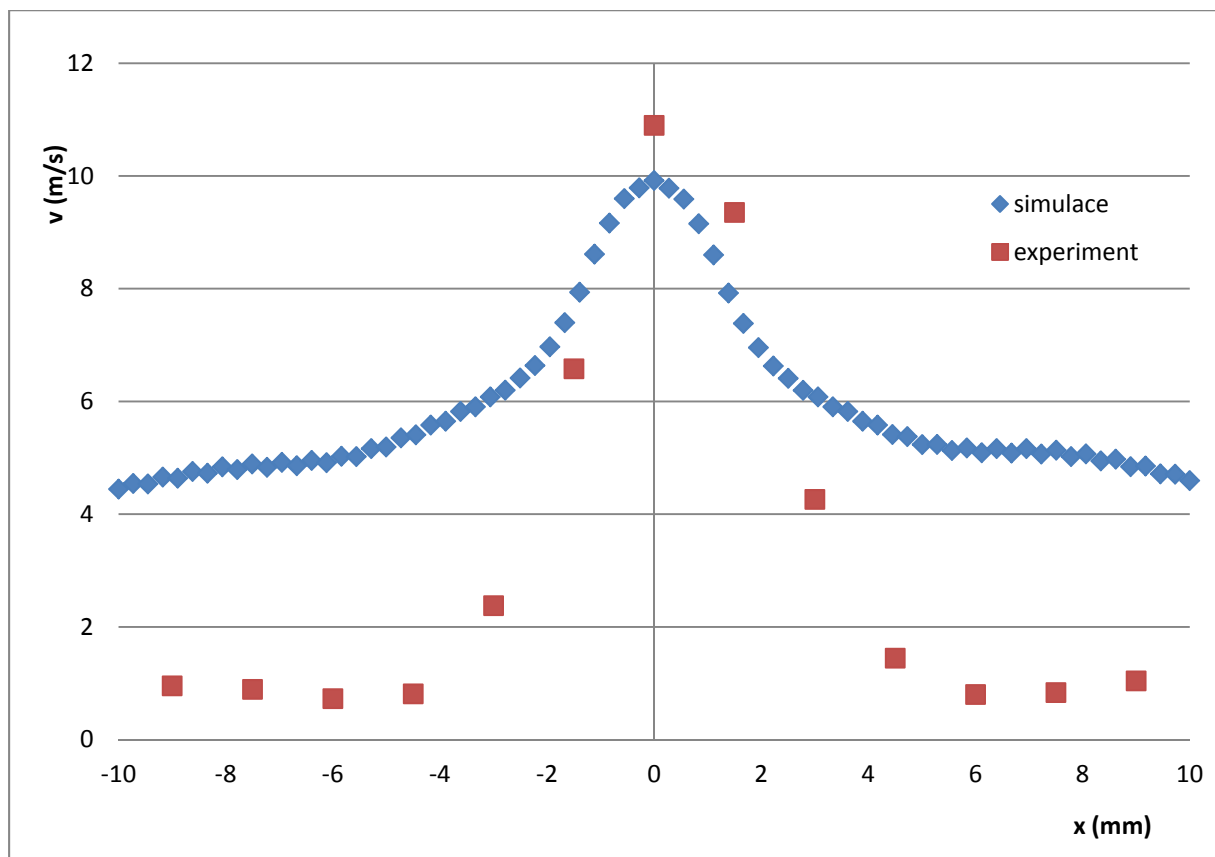
Obr. 6.6: Součinitel přestupu tepla (maximum) pro model2

Ze simulace vyplývá, že součinitel přestupu tepla není přesně osově souměrný. Rozdíly těchto hodnot jsou ale minimální, z výsledných hodnot je patrné, že se liší maximálně v jednotkách procent.

7 Porovnání experimentů a numerických simulací

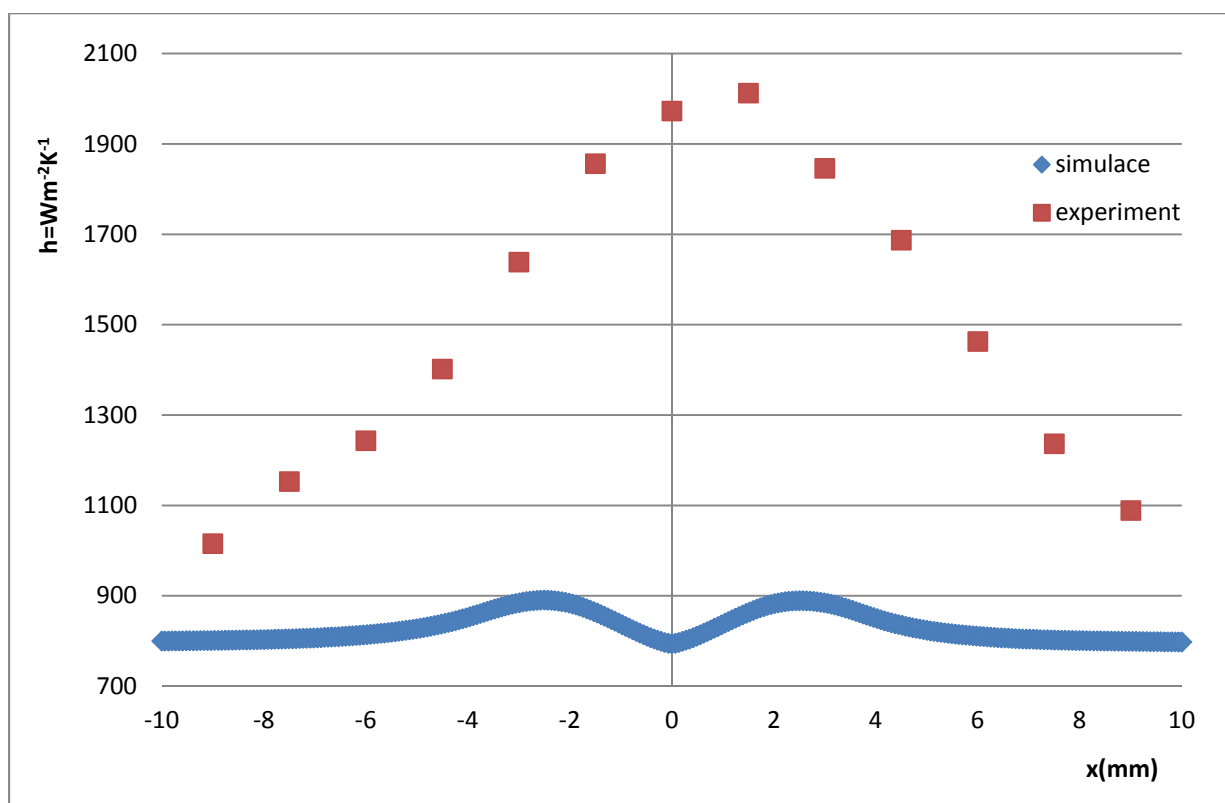
7.1 Kontinuální proud

Při porovnávání výsledků je možno zvolit dvě kritéria. Za prvé na srovnání absolutních hodnot daných výsledků. Za druhé na porovnání průběhu hodnot. V grafu 7.1 je porovnána rychlost u stěny. Srovnání kontinuálního proudu je pro hodnoty, teplota desky 42°C (přehřátí 0,05 pro měření součinitele přestupu tepla), vzdálenost trysky od zahříváné desky 20mm. Rychlost u stěny je měřena ve vzdálenosti 1mm od stěny.



Graf 7.1: Porovnání rychlosti kontinuálního proudu u stěny

Na grafu je patrné, že hodnoty naměřené v experimentu a v simulaci si odpovídají v ose trysky. Dále od osy trysky dochází k rozchodu hodnot od sebe, při simulaci dochází k poklesu rychlosti se vzdáleností od trysky pomaleji. Průběhy hodnot při experimentu i simulaci si odpovídají, v obou případech dochází k poklesu rychlosti směrem od trysky. V grafu 7.2 je znázorněn součinitel přestupu tepla, pro stejné podmínky jako v grafu 7.1.

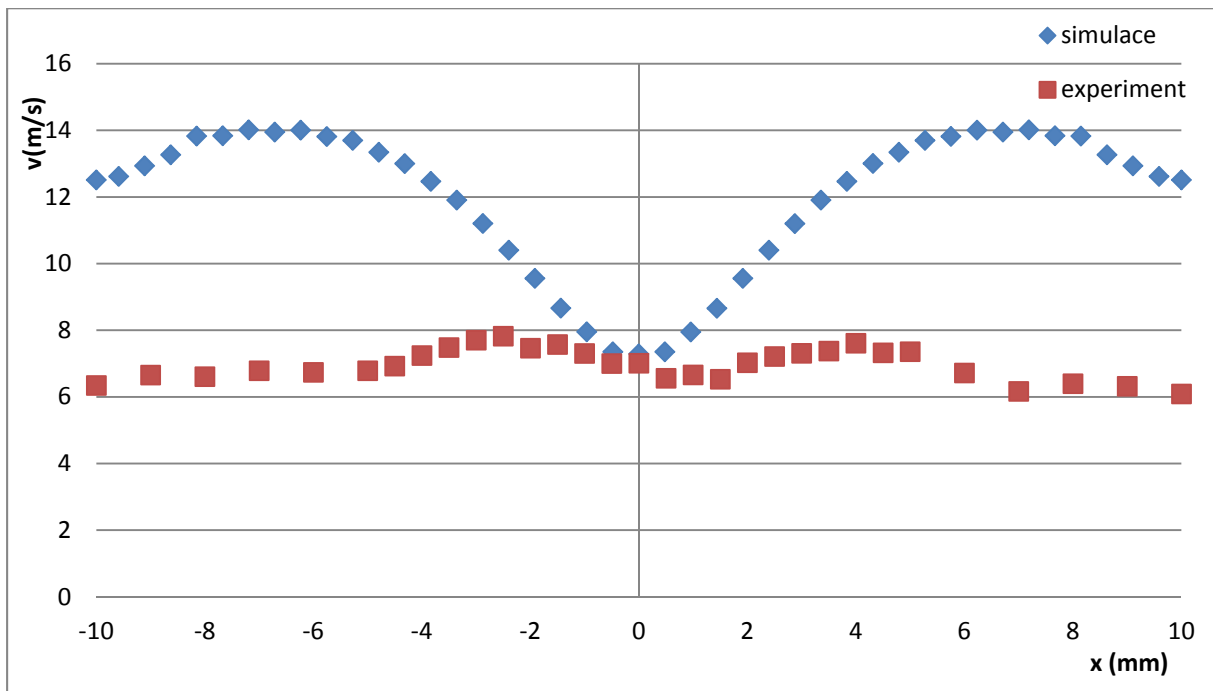


Graf 7.2: Porovnání součinitele přestupu tepla pro kontinuální proud

Při porovnání hodnot je patrné, že u simulace vyšly nižší hodnoty, největší rozdíl je v ose trysky. Čím dále jsme od osy trysky, tím více se k sobě naměřené hodnoty přibližují. Rozdíl v průběhu je pouze u osy trysky, u simulace je vypočten pokles u osy, u experimentu toto lokální minimum naměřeno není. Hodnoty se sice od sebe liší, ale rozdíl hodnot není tak výrazný, zvláště pokud nejsme u osy trysky.

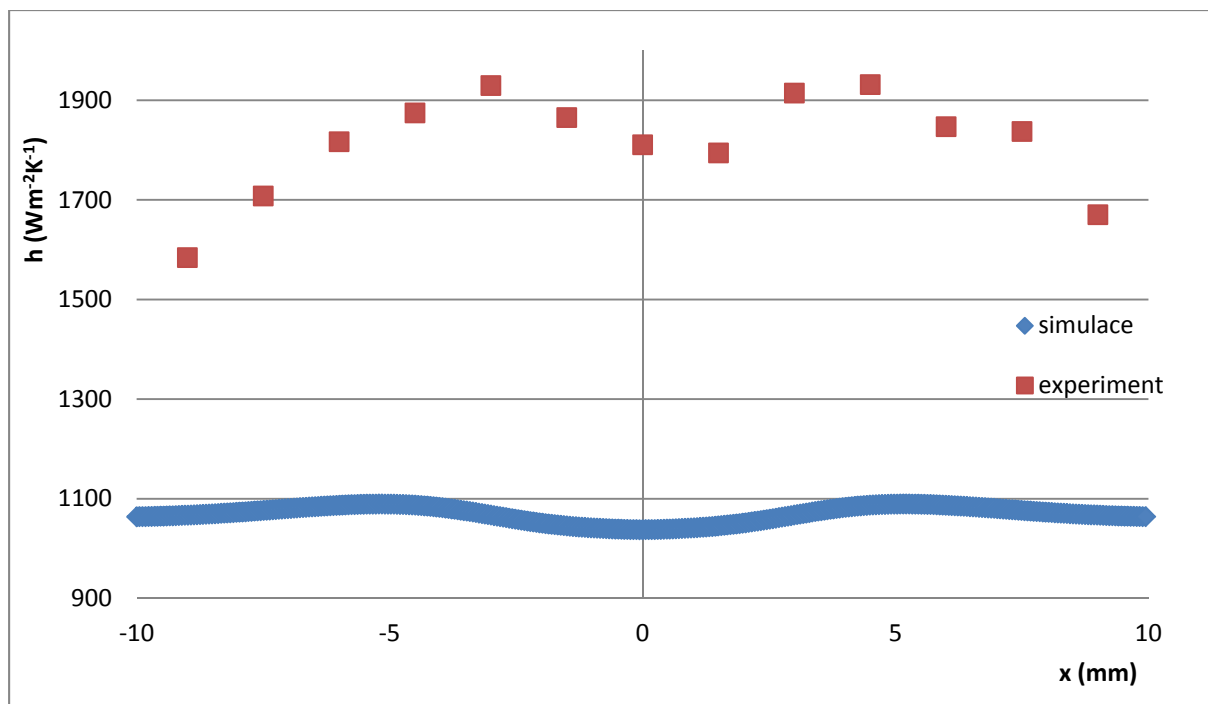
7.2 Syntetizovaný proud

Pro porovnání dat syntetizovaného proudu, pokud bychom porovnávali i časový průběh, by byl potřeba 3D graf (prostorová souřadnice, průběh v čase, naměřená veličina), který by byl nepřehledný. Proto je zvoleno pro porovnání hodnot z experimentu a simulace, porovnání maxim v časovém průběhu daných veličin. V grafu 7.3 je porovnání rychlosti u stěny pro syntetizovaný proud, parametry jsou, výkon trysky 3W, teplota desky 42°C (přehřátí 0,05 pro měření součinitele přestupu tepla), vzdálenost trysky od zahřívající desky 20mm. Rychlost u stěny je měřena ve vzdálenosti 1mm od stěny. Příloha v grafu 18 je porovnání časového průběhu rychlosti.



Graf 7.3: Porovnání rychlosti syntetizovaného proudu u stěny

V ose trysky si rychlosti u stěny odpovídají, pro polohu dále od trysky se rozdíl mezi hodnotami zvětšuje. Tento rozdílný průběh mezi hodnotami je podobný rozdílu u kontinuální trysky. Rychlostní profil je podobný pro oba případy, u osy trysky je lokální minimum, ve větších vzdálenostech od osy trysky (za lokálním maximem) dochází opět k poklesu. V grafu 7.4 je znázorněn součinitel přestupu tepla, pro stejné podmínky jako v grafu 7.3.



Graf 7.4: Porovnání součinitele přestupu tepla pro syntetizovaný proud

Při porovnání hodnot je patrné, že u simulace vyšly nižší hodnoty, rozdíl mezi hodnotami se příliš neliší. Průběh experimentu i simulace je podobný, lokální minimum v ose trysky, mírný nárůst se zvětšující se vzdáleností od osy, a poté mírný pokles, na sledované části měření.

Hodnoty naměřené při experimentu a vypočtené při simulaci se liší v absolutních hodnotách. Na hodnoty získané ze simulace má vliv řada faktorů, hlavně nastavení simulace tj. okrajové podmínky, vybraný model, nastavení pracovního média, síť modelu a další. Hodnoty sice nejsou stejné v absolutní hodnotě, ale trend růstu a poklesu je podobný pro experiment i simulaci.

8 Závěr

V diplomové práci jsem provedl rešerši zvolené problematiky, podle dostupných zdrojů. Diplomová práce navazuje na moji bakalářskou práci, ve které jsem se zabýval syntetizovaným proudem a jeho rychlostním polem. Dále jsou zmíněny některé další postupy měření součinitele přestupu tepla.

Při rozboru úlohy jsem využil rovnice v kapitole 2 - Teoretická část. Při návrhu experimentu jsem vycházel z dostupného zařízení v laboratoři a dostupných měřicích přístrojů. V návrhu experimentu je použití trysky pro tvorbu kontinuálního proudu a trysky pro generování syntetizovaného proudu.

Při sestavování experimentu byl technicky problém s konstrukcí ohřevu s využitím impaktního proudu tekutiny. Proto jsem po konzultaci s vedoucím diplomové práce upravil experiment tak, že bude využito impaktního proudu jako chlazení a deska, na kterou proud dopadá, bude zahřívána. Experiment jsem sestavil tak, že kontinuální tryska využívá jako zdroj proudu stlačený vzduch ze zásobníku laboratoře a tryska na vytvoření syntetizovaného proudu využívá jako zdroj generátor signálu se zesilovačem. Po provedení experimentu jsem zpracoval výsledky a vybrané výsledky naměřených hodnot jsou uvedeny v kapitole 4.

K sestavení modelu jsem použil komerční software Ansys Fluent v.18.2. Pro každou trysku jsem sestavil dva modely, aby byly využity výhody každého z nich. Sít' modelu1 je znázorněna na obr. 5.4, geometrie modelu2 je na obr. 5.5.

Po vytvoření modelu jsem provedl simulaci výsledků, kde bylo potřeba nastavení okrajových podmínek a počátečních hodnot. Výsledky simulace jsou v kapitole 6.

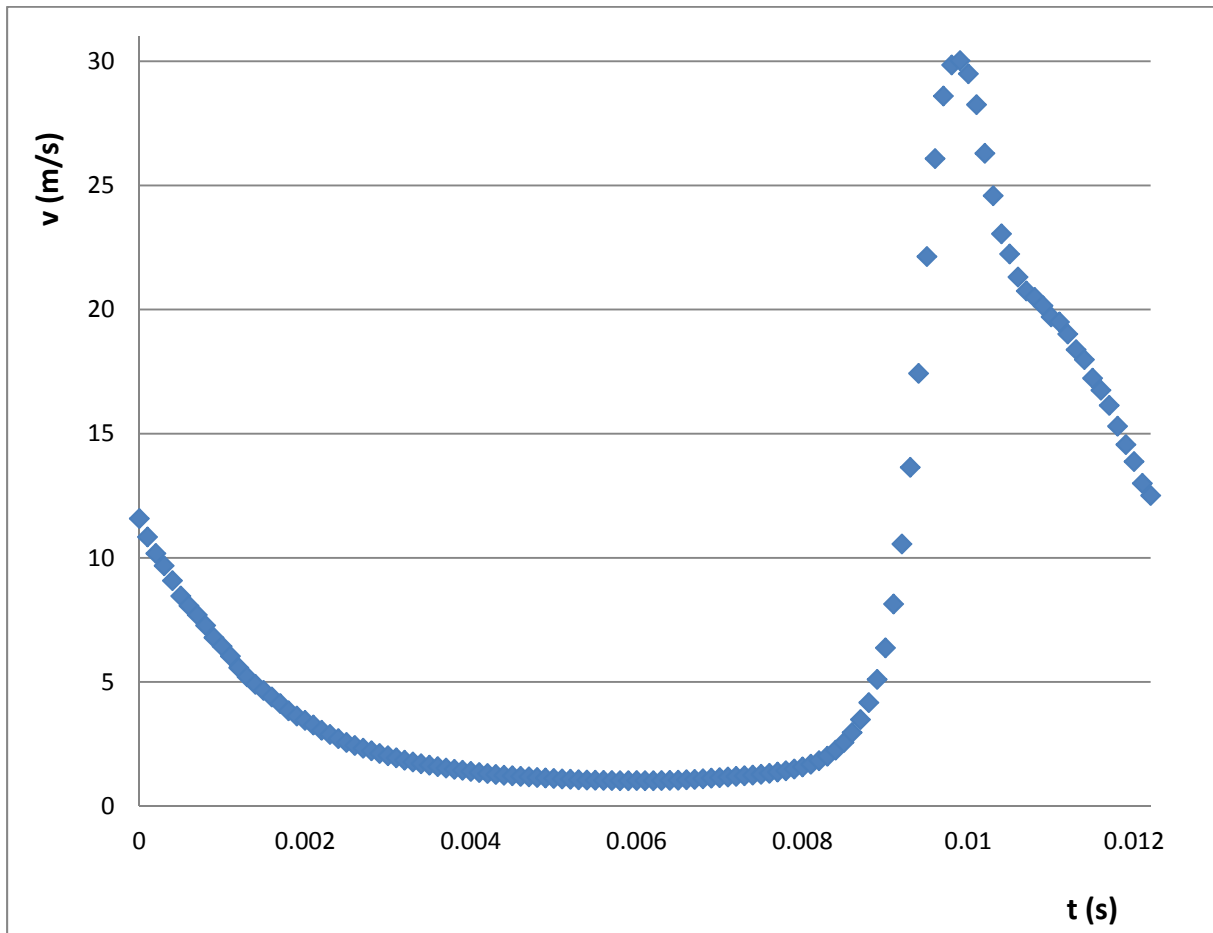
Výsledky naměřené v experimentu a vypočtené hodnoty simulace jsem porovnal v kapitole 7. Rovněž jsem v této kapitole znázornil v grafech rozdíly mezi výsledky získanými experimentem a hodnotami ze simulací. Při porovnání výsledků z experimentu vychází vyšší součinitel přestupu tepla pro syntetizovaný proud oproti kontinuálnímu proudu.

9 Bibliografie

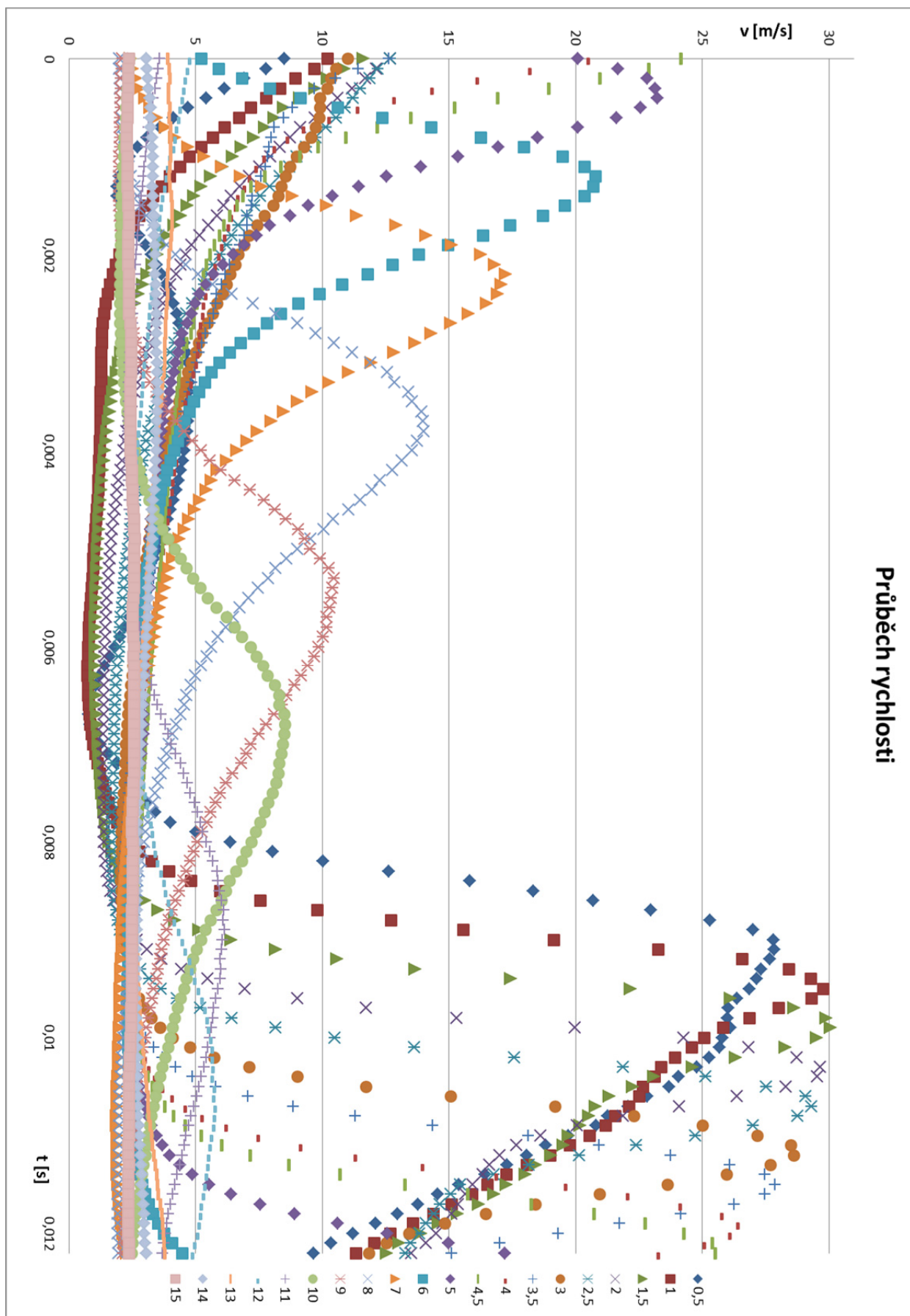
- [1] B. SMITH a A. GLEZER, „The formation and evolution of synthetic jets,“ *Physics of Fluids*, 1998.
- [2] J. W. SCHOLTEN a D. B. MURRAY, „Measurement of Convective Heat Transfer Using Hot Film Sensors: Correction for Sensor Overheat,“ *Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer*, November 1996.
- [3] J. W. SCHOLTEN a D. B. MURRAY, *Unsteady heat transfer and velocity of a cylinder in cross flow- I. Low freestream turbulence*, Department of Mechanical Engineering, Trinity College, 1997.
- [4] J. W. SCHOLTEN a D. B. MURRAY, *Unsteady heat transfer and velocity of a cylinder in cross flow II. High freestream turbulence*, Department of Mechanical Engineering, Trinity College, 1997.
- [5] F. RIEGER a J. ŠESTÁK, *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*, Praha: ČVUT, 1996.
- [6] K. PETERA, M. DOSTÁL, M. VĚŘÍŠOVÁ a T. JIROUT, „Heat Transfer at the Bottom of a Cylindrical Vessel,“ *Chem. Biochem. Eng*, 2017.
- [7] G. SEDAHMED, Y. EL-TAWEEL, Y. ABDEL-AZIZ a H. EL-NAQEARA, *Mass and heat transfer enhancement at the wall of cylindrical agitated vessel by turbulence promoters*, Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Alexandria University, 2014.
- [8] Z. MARŠÁK, *Termodynamika a statistická fyzika*, Praha: ČVUT, 1991.
- [9] M. ŠIMKO, *Měření nestacionárního rychlostního a teplotního pole*, Liberec: TUL, 2015.
- [10] „MMSpektrum,“ 2007. (Online). Available:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/syntetizovany-proud-synthetic-jet.html>.
(Přístup získán 10 6 2015).
- [11] P. DANČOVÁ, *Studie proudění typu „Synthetic Jet“*, Liberec: TUL, 2006.
- [12] F. JØRGENSEN, *How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a practical guide*, DANTEC Dynamics, 2002.

- [13] M. KOZUBOVÁ, P. FABIÁN a J. KUNDYS, *Měření žárovým anemometrem*, DANTEC Dynamics, 2004.
- [14] H. BRUNN, *Hot-wire anemometry: principles and signal analysis*, Oxford University press, 1995.
- [15] I. ŠTOLL, *Elektřina a magnetismus*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003.
- [16] S. WOLFF, L. HOMEIER a L. FOTTNER, „Experimental Investigation of Heat Transfer in Separated Flow on a Highly Loaded LP Turbine Cascade,“ Institut für Strahltriebwerke Universität der Bundeswehr München, 2003.
- [17] „greenTEG“ (Online) (Přístup získán 11 10 2017).
<https://shop.greenteg.com/shop/heat-flux-measurement/heat-flux-sensor-gskin-xm/>
- [18] A. Fluent, *FLUENT 6.3 User's Guide*.

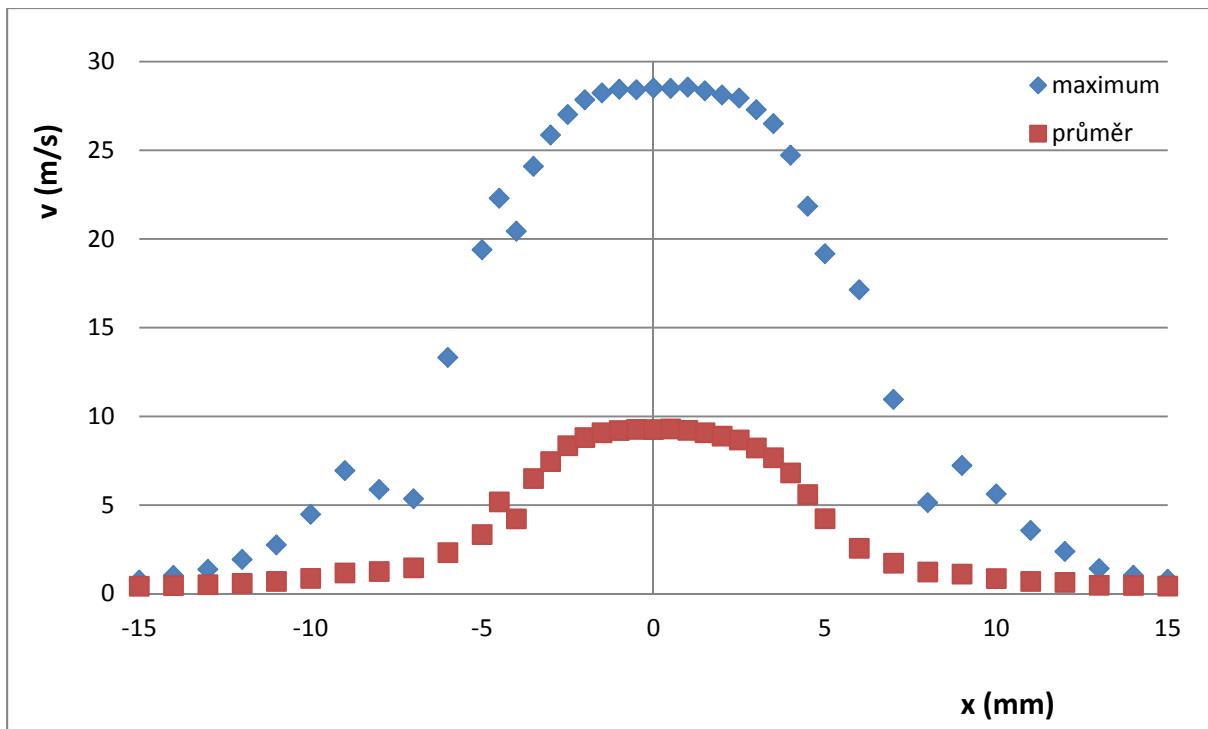
10 Přílohy



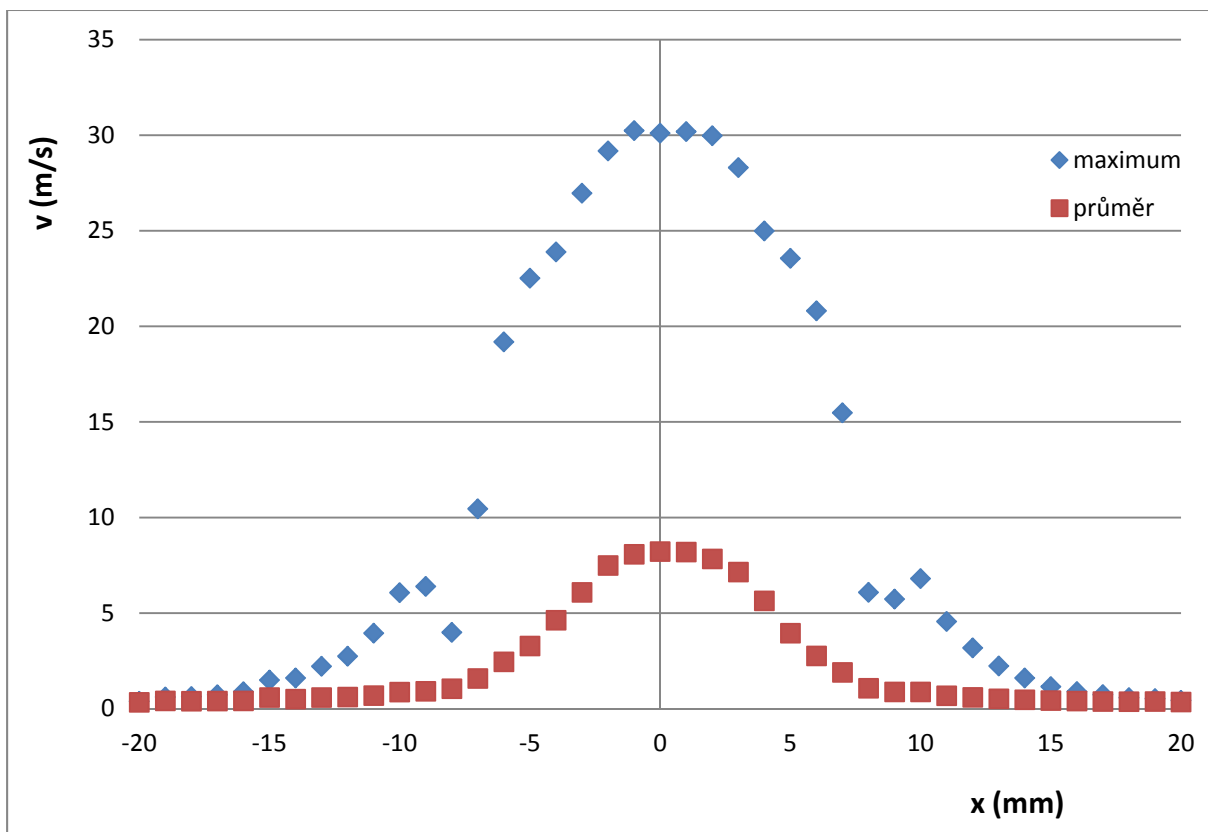
Graf 1: Naměřená rychlost jednoho kmitu syntetizovaného proudu, pro výkon 5W, v ose trysky, ve vzdálenosti 1,5cm od trysky



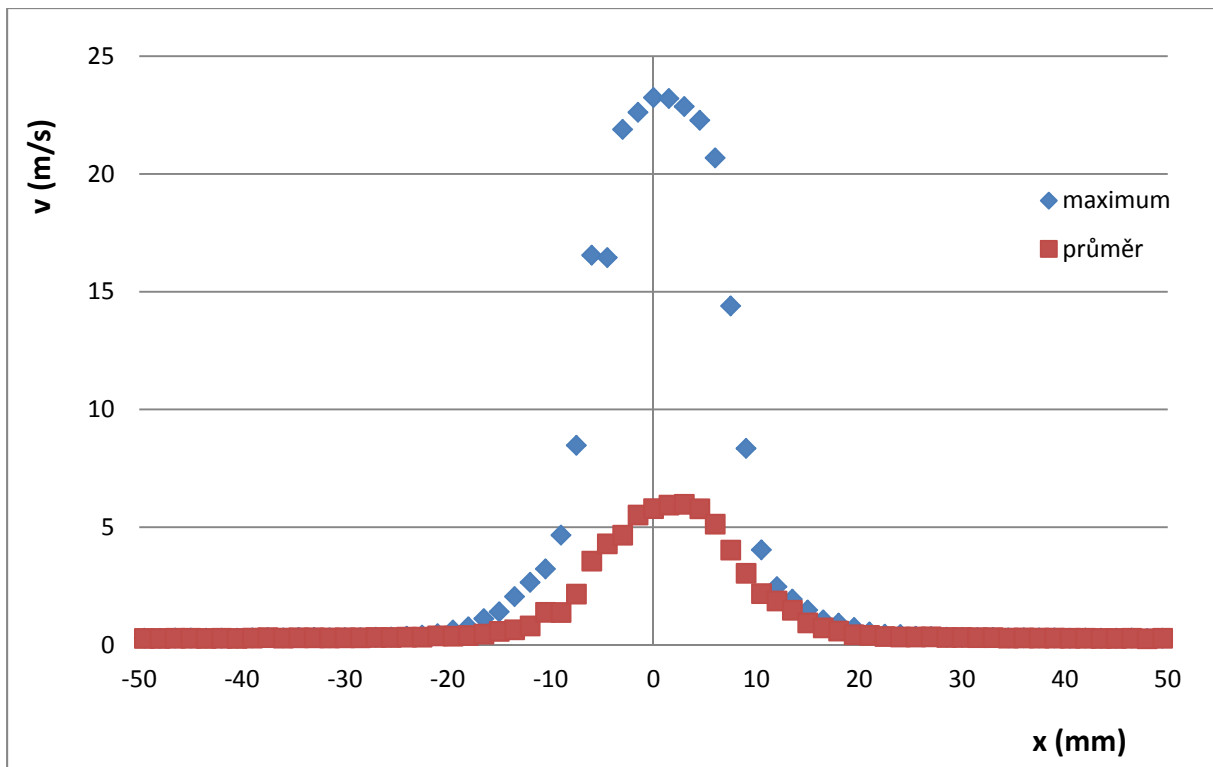
Graf 2: Rychlosti během kmitu SJ, v ose trysky, pro 5W



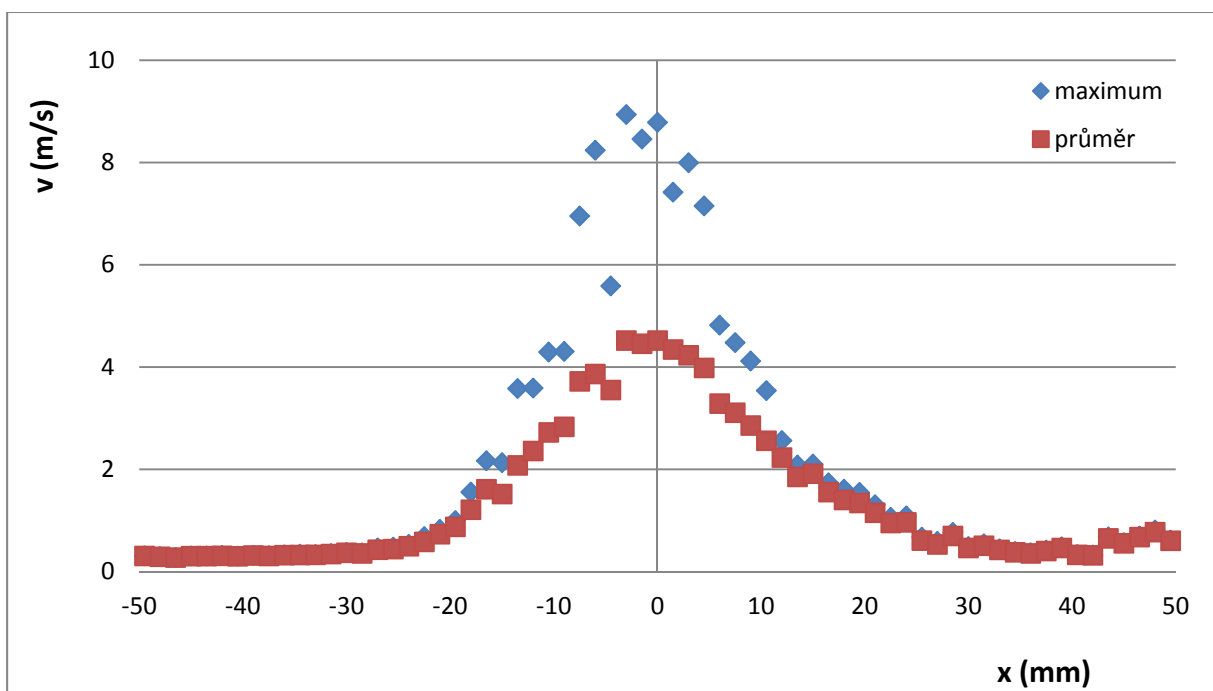
Graf 3: Průběh rychlosti syntetizované proudu ve vzdálenosti 5mm od trysky při výkonu 5W



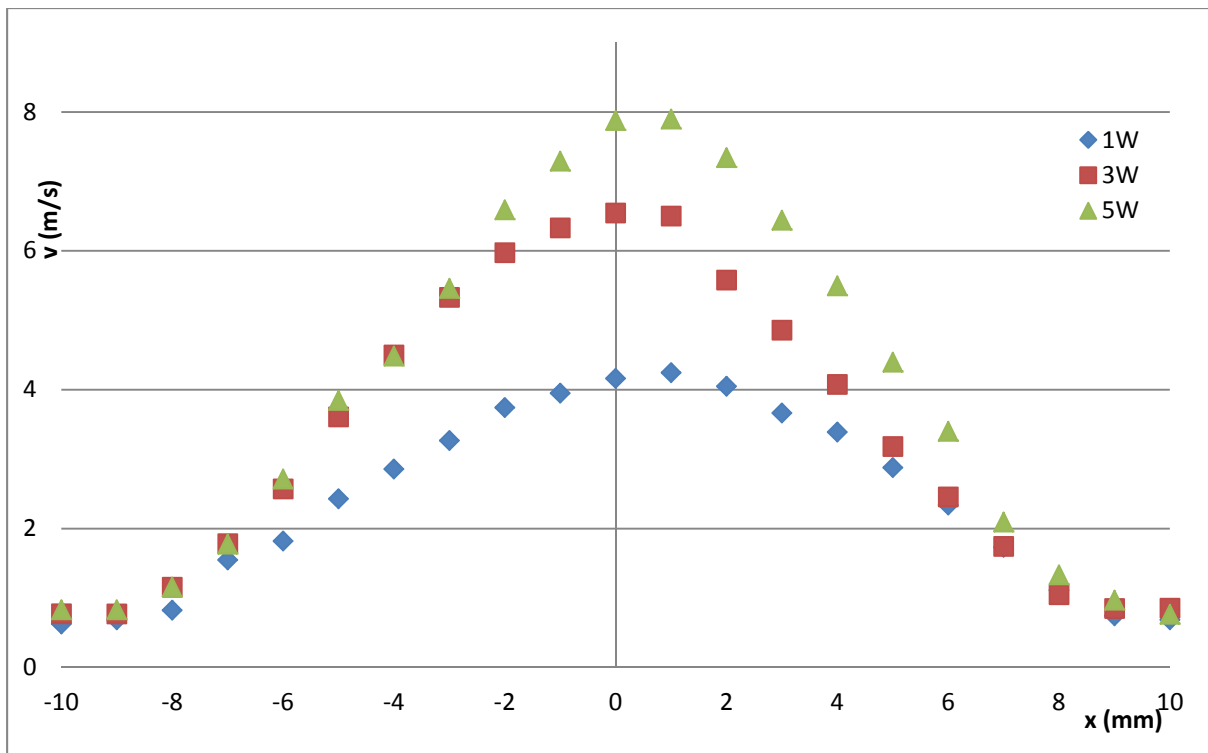
Graf 4: Průběh rychlosti syntetizované proudu ve vzdálenosti 10mm od trysky při výkonu 5W



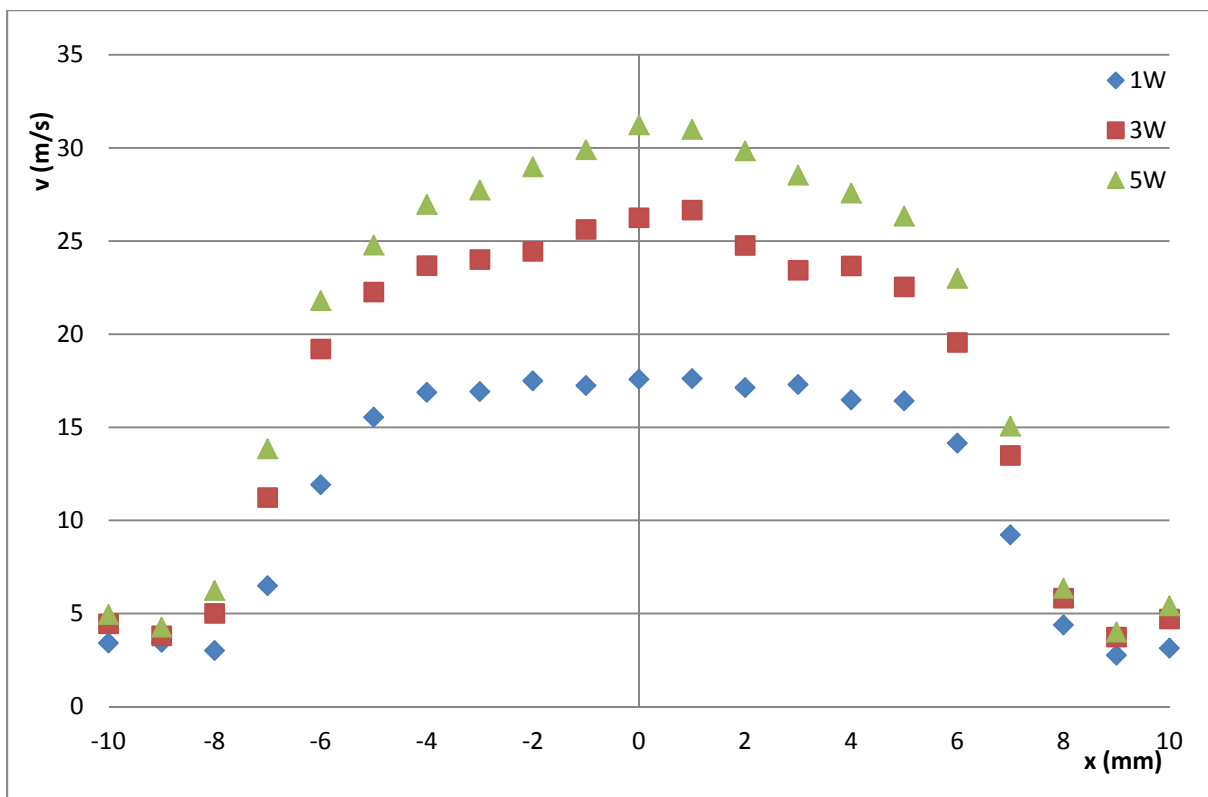
Graf 5: Průběh rychlosti syntetizované proudy ve vzdálenosti 50mm od trysky při výkonu 5W



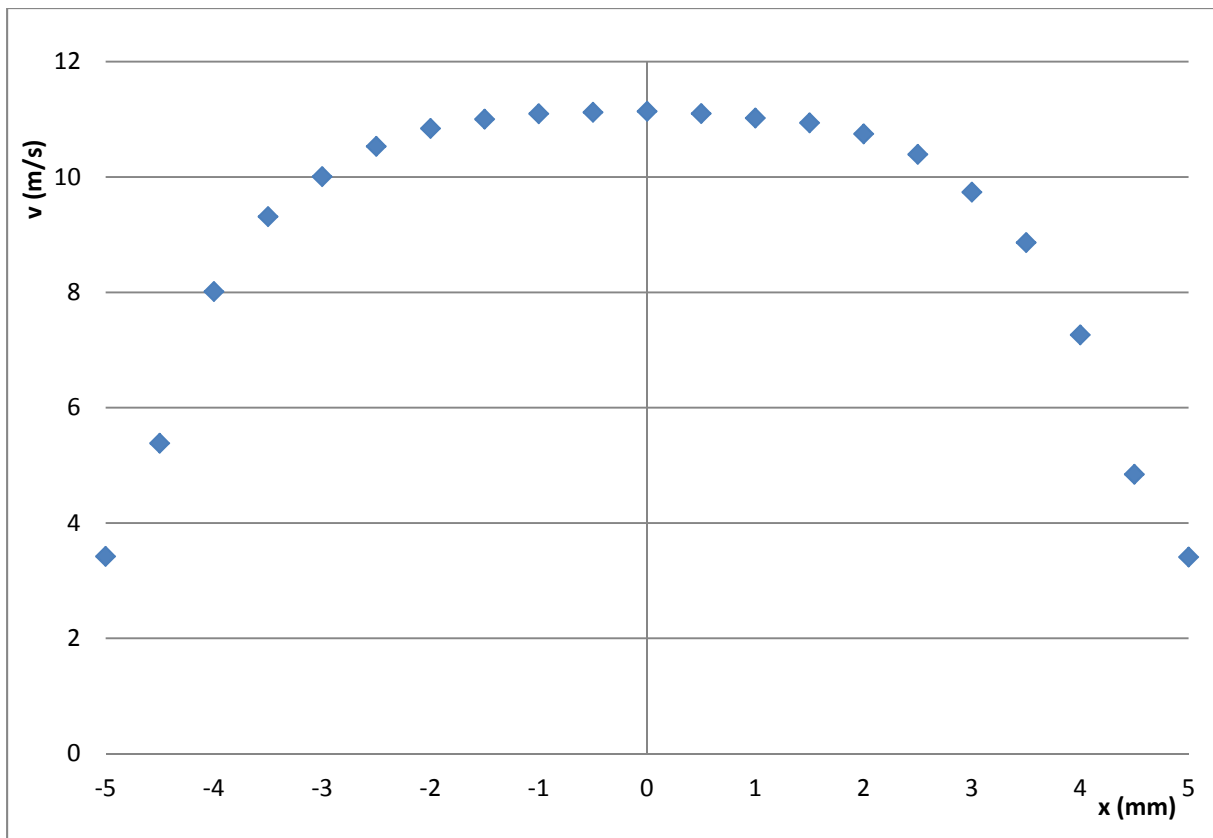
Graf 6: Průběh rychlosti syntetizované proudy ve vzdálenosti 100mm od trysky při výkonu 5W



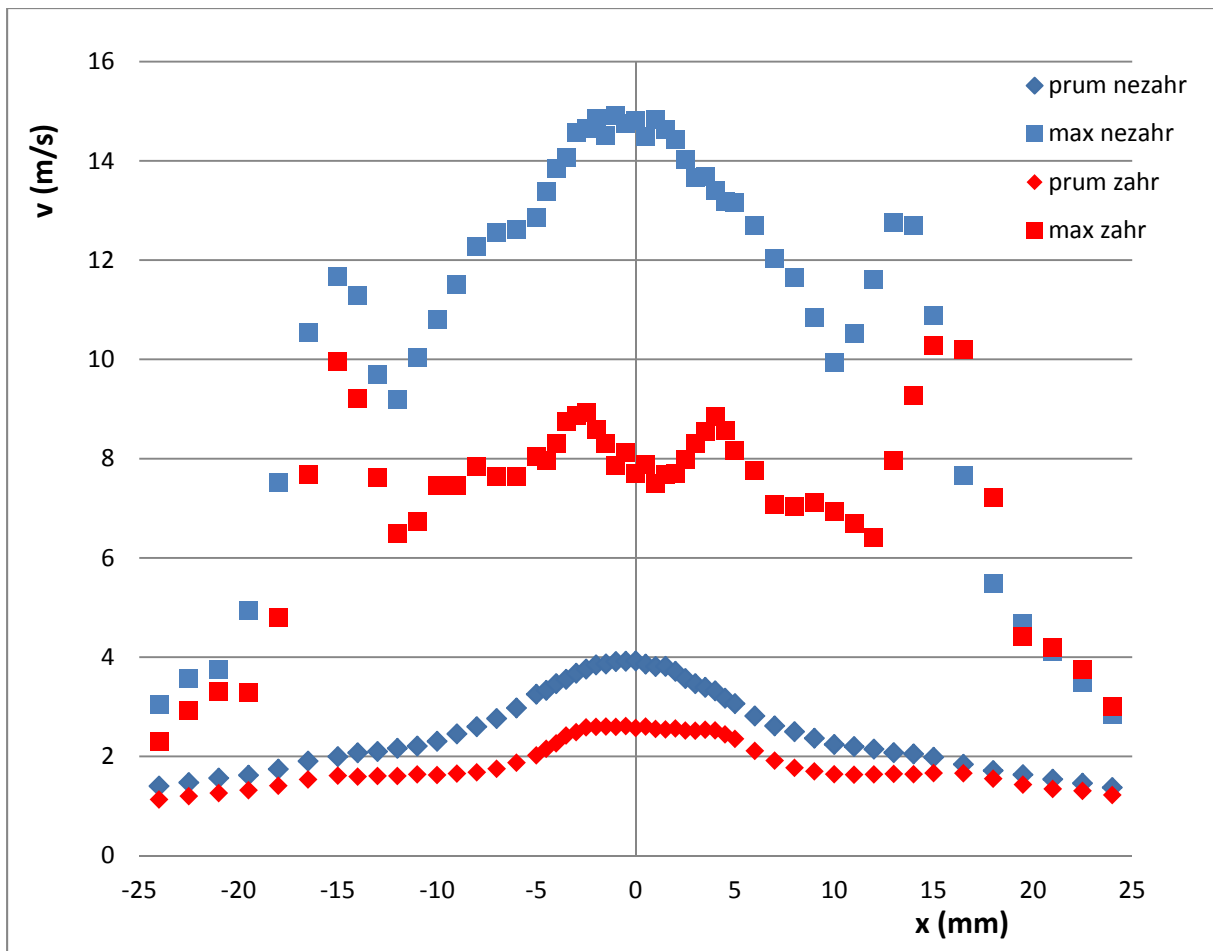
Graf 7: Průběh průměrné rychlosti syntetizované proudu ve vzdálenosti 20mm od trysky pro dané výkony



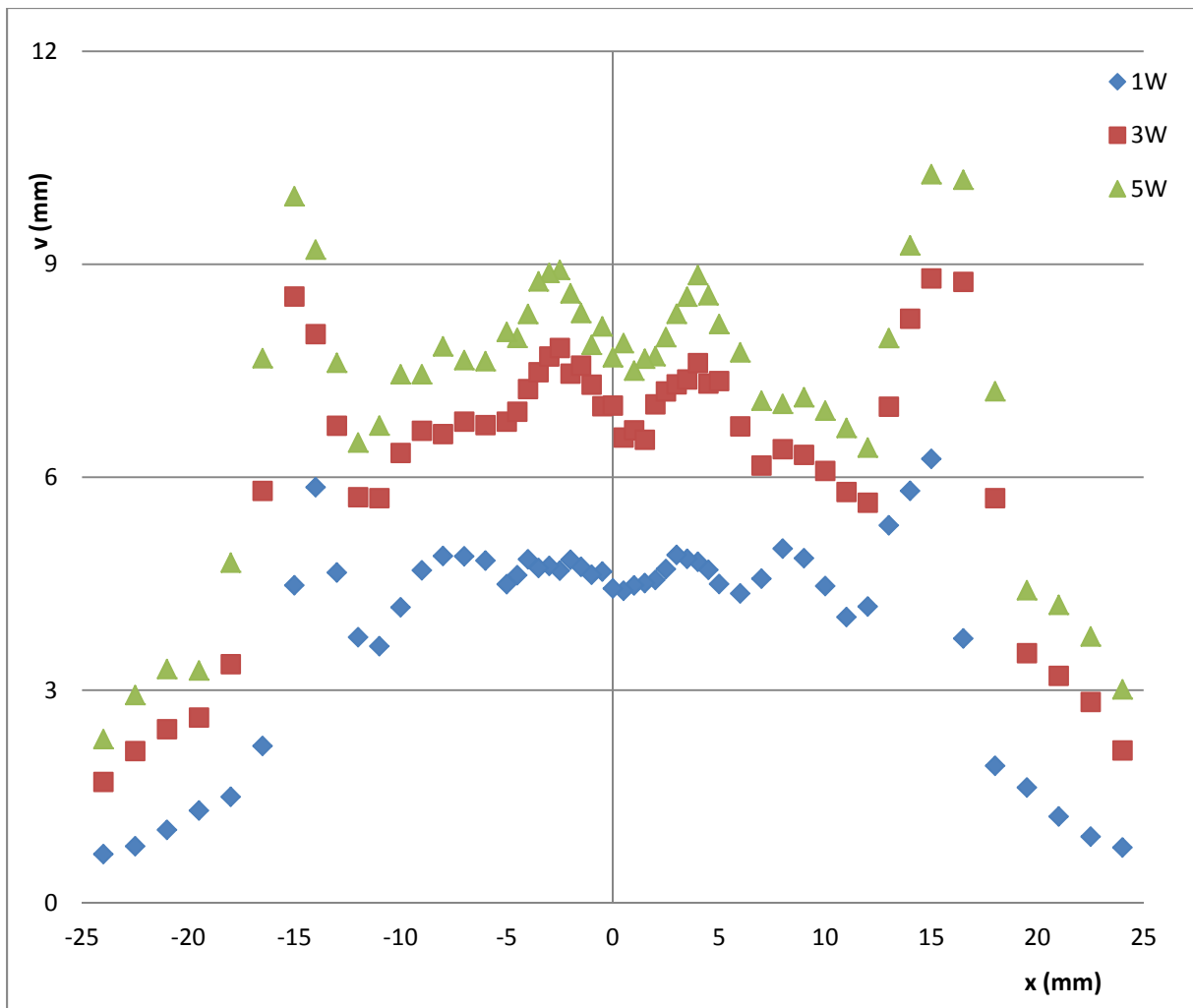
Graf 8: Průběh průměrné rychlosti syntetizované proudu ve vzdálenosti 20mm od trysky pro dané výkony



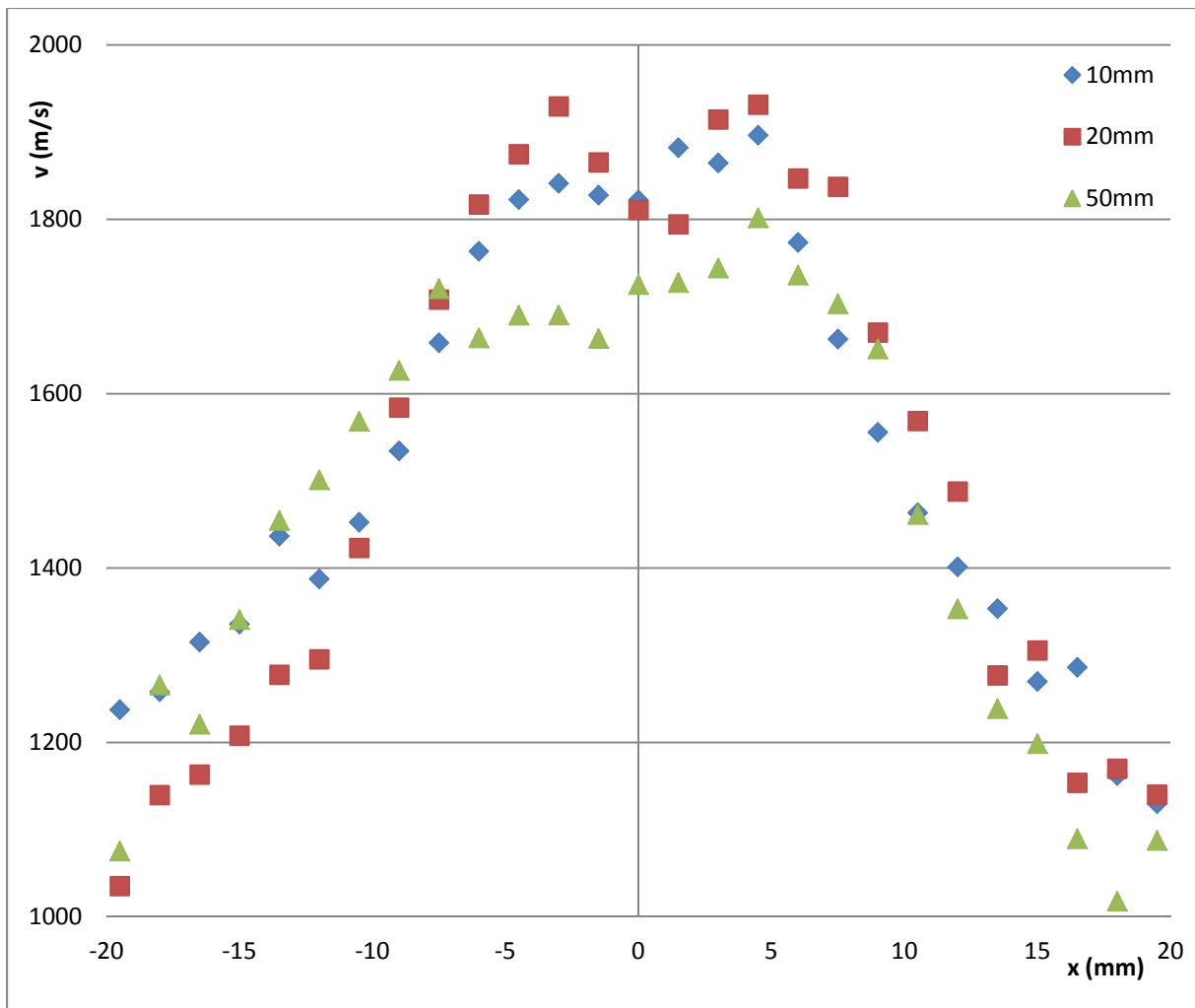
Graf 9: Průběh průměrné rychlosti syntetizované proudu u hrdla trysky (2mm) pro výkon 3W



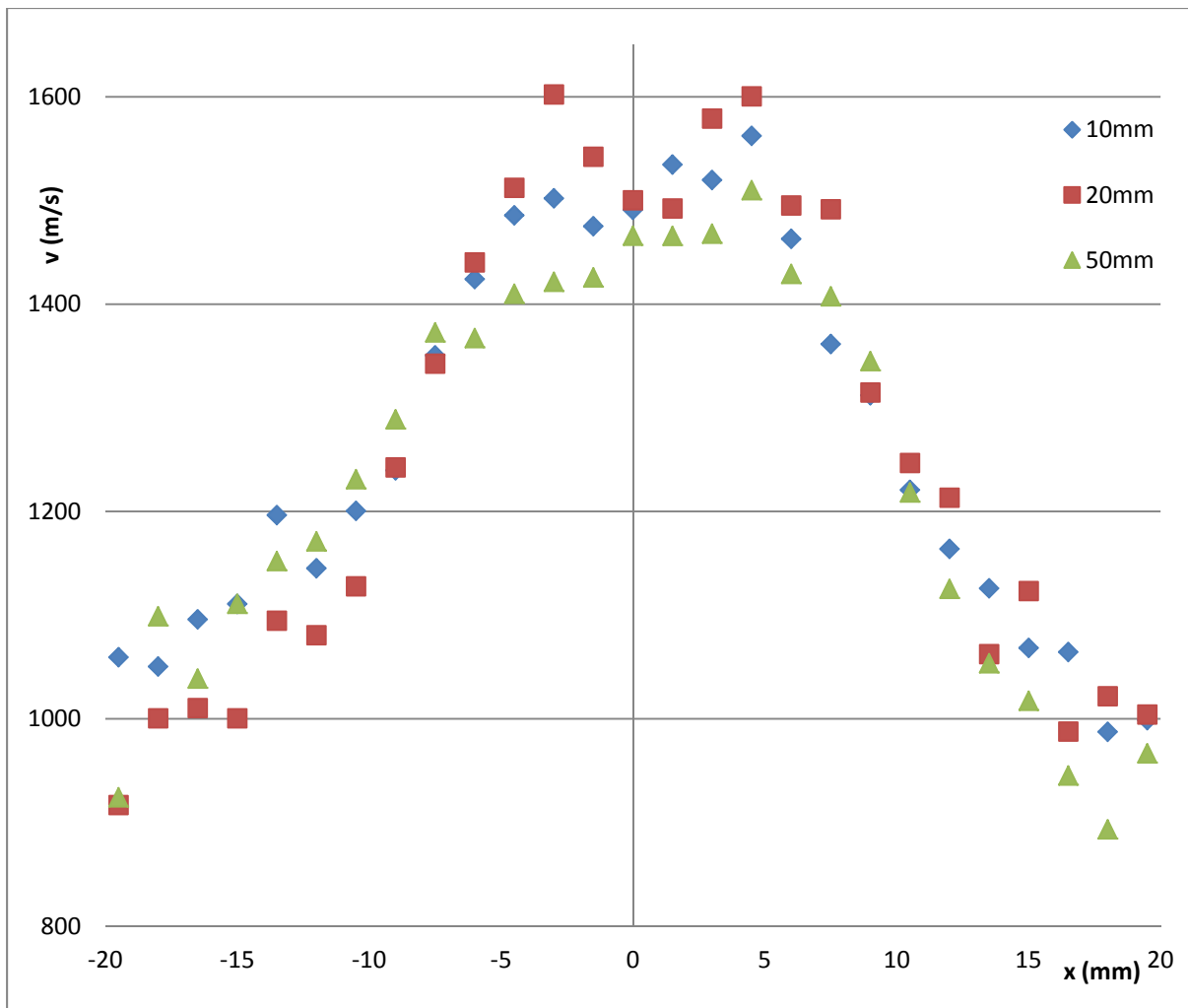
Graf 10: Porovnání rychlosti u stěny syntetizovaného proudu, pro vzdálenost trysky od desky 20mm, se zahřívanou/nezahřívanou desko, při výkonu 5W



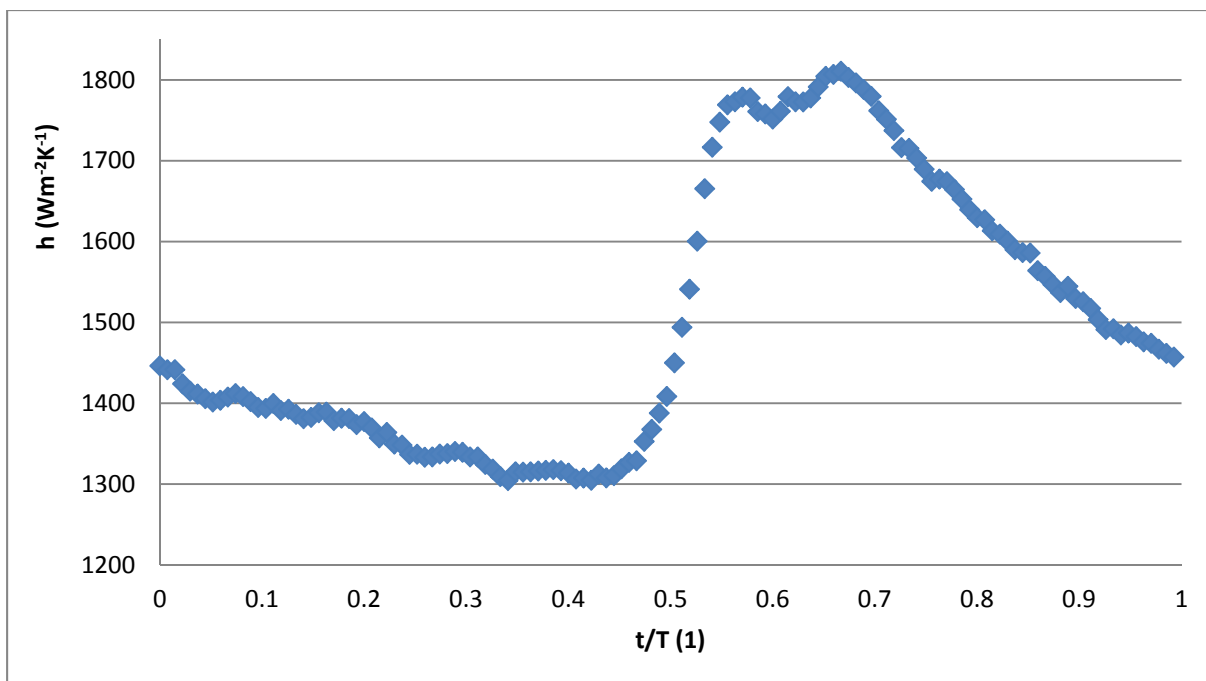
Graf 11: Porovnání rychlosti u stěny syntetizovaného proudu, pro vzdálenost trysky od desky 20mm, se zahřívanou deskou, pro dané výkony



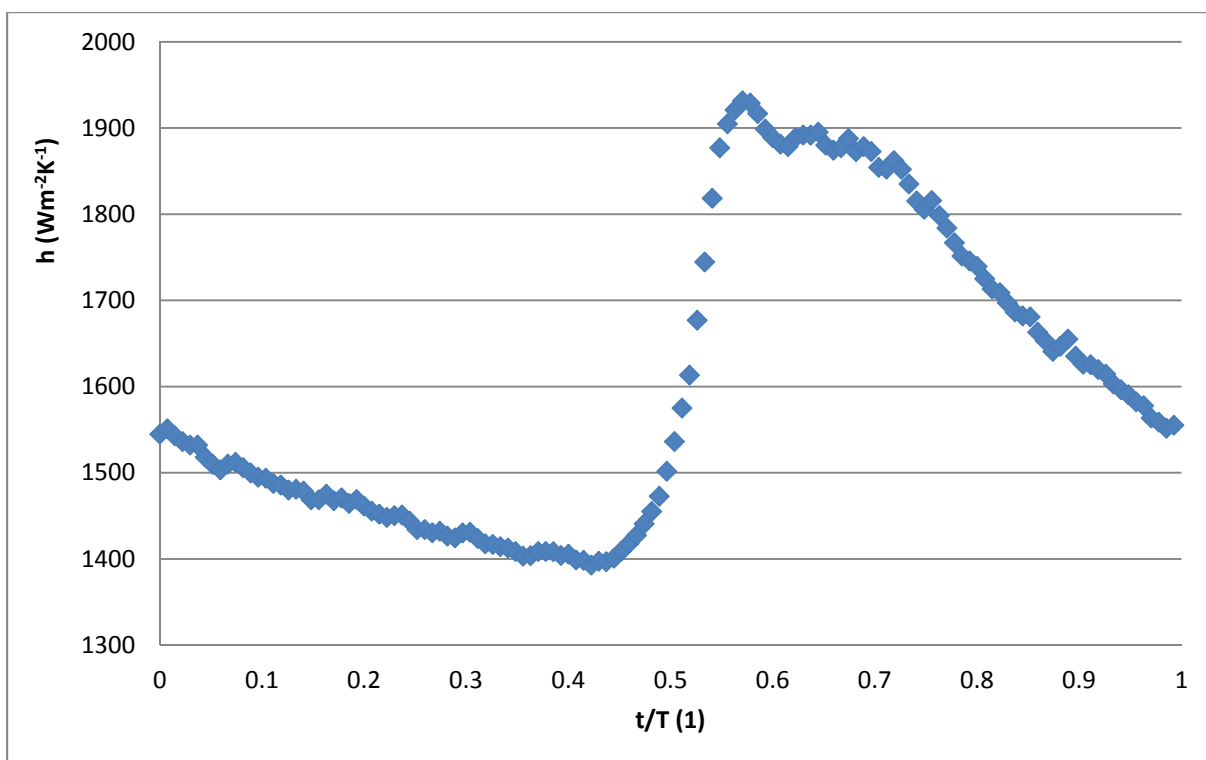
Graf 12: Porovnání maximálních hodnot součinitele přestupu tepla v závislosti na vzdálenosti od osy trysky. Teplota desky 42°C (přehřátí sondy 0,05), pro dané vzdálenosti trysky od desky



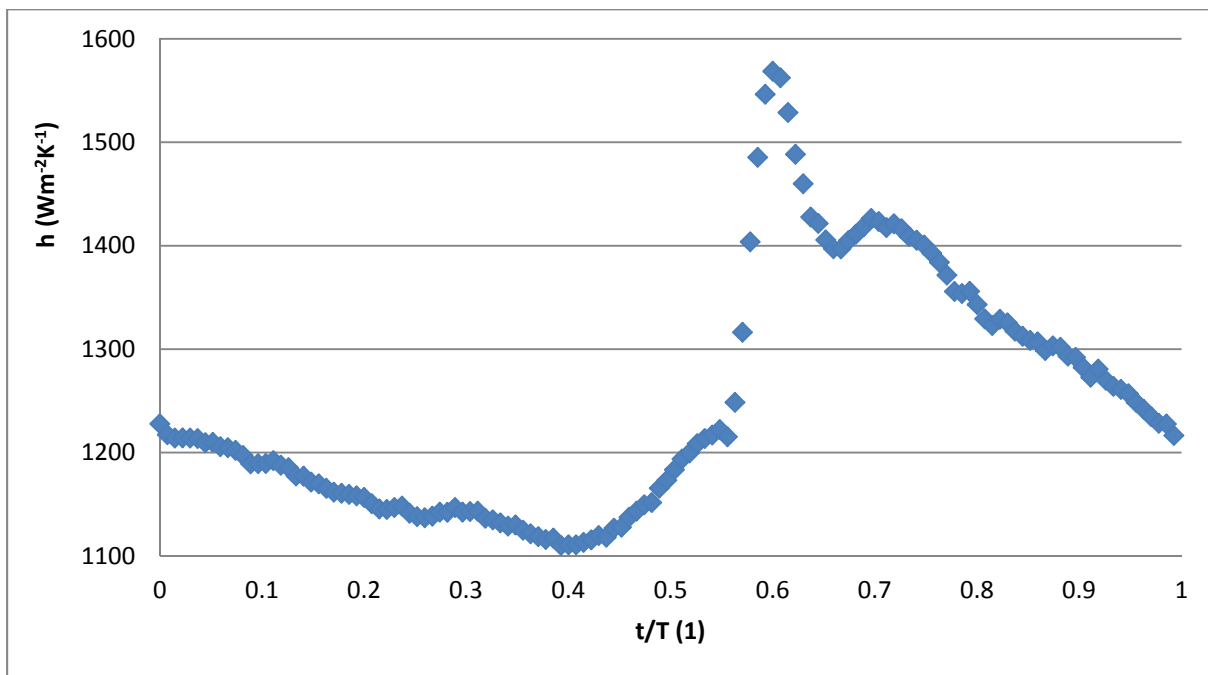
Graf 13: Porovnání průměrných hodnot součinitele přestupu tepla v závislosti na vzdálenosti od osy trysky. Teplota desky 42°C (přehřátí sondy 0,05), pro dané vzdálenosti trysky od desky



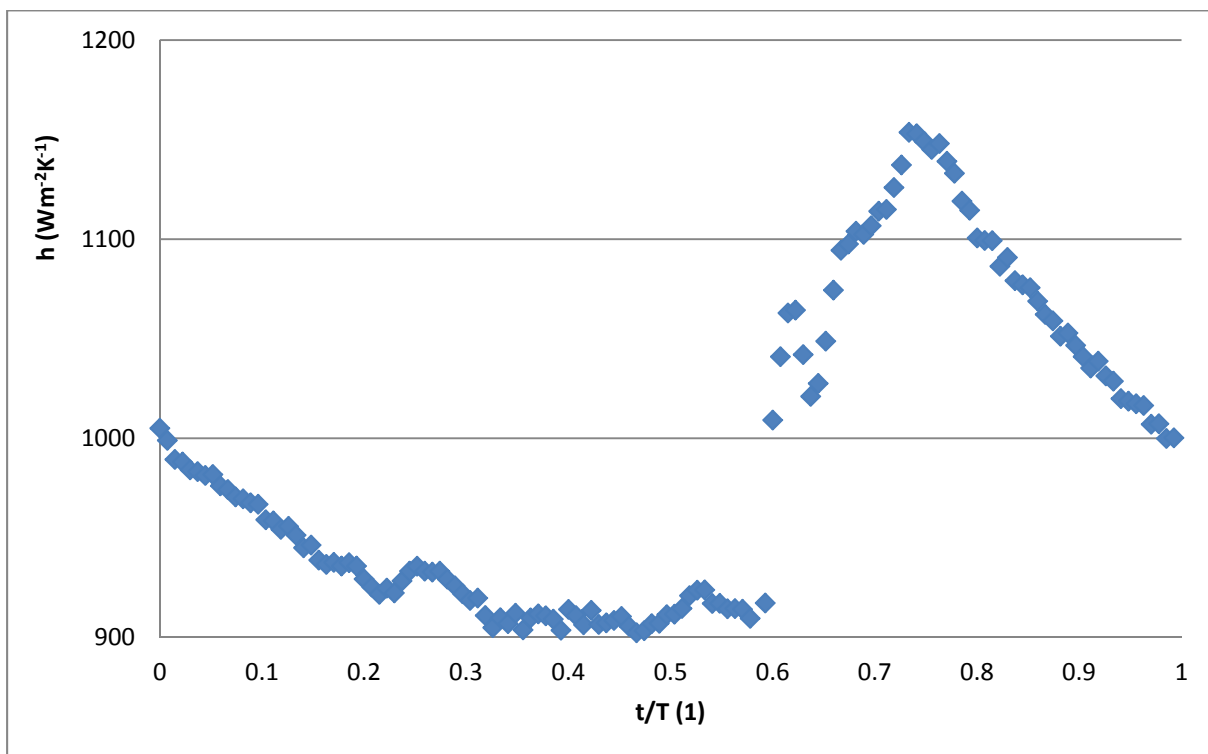
Graf 14: časový průběh součinitele přestupu tepla syntetizovaného proudu, v ose trysky, při vzdálenosti trysky a desky 20mm, výkon trysky 3W, teplota desky 42°C (přehřátí sondy 0,05)



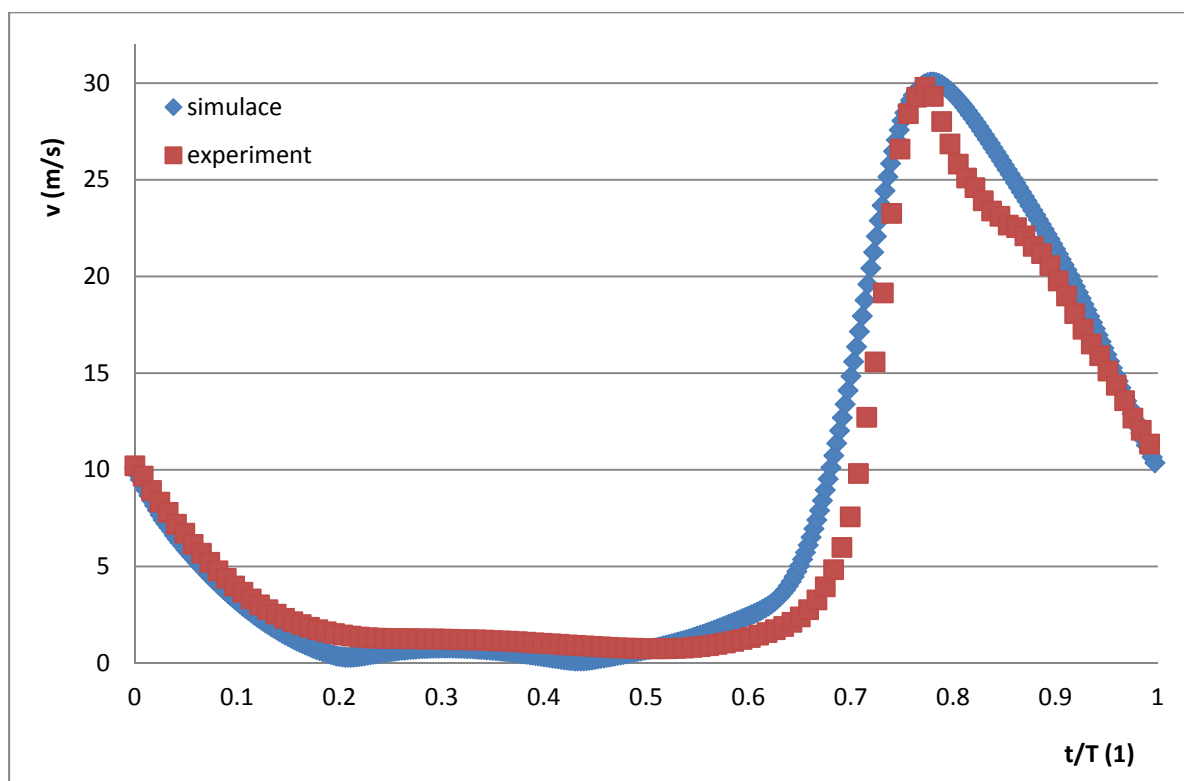
Graf 15: časový průběh součinitele přestupu tepla syntetizovaného proudu, 4,5mm od osy trysky, při vzdálenosti trysky a desky 20mm, výkon trysky 3W, teplota desky 42°C (přehřátí sondy 0,05)



Graf 16: časový průběh součinitele přestupu tepla syntetizovaného proudu, 10,5mm od osy trysky, při vzdálenosti trysky a desky 20mm, výkon trysky 3W, teplota desky 42°C (přehřátí sondy 0,05)



Graf 17: časový průběh součinitele přestupu tepla syntetizovaného proudu, 16,5mm od osy trysky, při vzdálenosti trysky a desky 20mm, výkon trysky 3W, teplota desky 42°C (přehřátí sondy 0,05)



Graf 18: Porovnání průběhu rychlosti mezi experimentem a simulací pro syntetizovaný proud. Výkon trysky 5W, v ose trysky ve vzdálenosti 10mm od trysky