

# MĚŘENÍ SOUČiniteLE PŘESTUPU TEPLA PŘI IMPAKTNÍM PROUDĚNÍ

## Diplomová práce

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



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Červa**  
Osobní číslo: **S12000428**  
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 numerické 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: **cca 15 stran**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 45 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

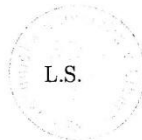
- [1] LIENHARDT, J., H., LIENDHARDT, J.,H., 2005. *A Heat Transfer Textbook*. Phlogiston Press, MIT.
- [2] RIEGER, F., ŠESTÁK, J., 1996. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Praha: ČVUT.
- [3] Ansys Fluent. *FLUENT 6.3 User's Guide*.
- [4] BRUNN, H., H., 1995. *Hot-wire anemometry: principles and signal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

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

Datum zadání diplomové práce: **25. února 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2016**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



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

V Liberci dne 25. února 2015

## 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: 24.5.2015

Podpis:



## **Anotace**

V poslední době přenos tepla impaktním prouděním získává značnou pozornost, protože spousta aplikací využívá jeho velkých tepelných toků při ohřevu nebo chlazení. Existuje celá řada parametrů, která má vliv na rychlost přenosu tepla. Pro návrh a optimalizaci chlazení nebo ohřevu tryskou je třeba tyto parametry charakterizovat. V této práci je srovnání hodnot získaných jak numerickou simulací, tak i měřením. Pro měření bylo sestaveno experimentální zařízení, kterým byly zjištěny hodnoty součinitele přestupu tepla na ploše pod tryskou a v její těsné blízkosti. Tryska byla tvořena pěti rovnoběžnými otvory, z nichž proudil suchý vzduch kolmo na vyhřívanou desku osazenou čidlem teploty a součinitele přestupu tepla. Zkoumány byly hodnoty pro tři různé vzdálenosti trysky od desky a pro tři různé průtoky vzduchu. Ze získaných dat můžeme porovnat numerickou simulaci s měřením a určit nastavení parametrů pro požadované hodnoty součinitele přestupu tepla na chlazení nebo ohřev.

## **Klíčová slova**

Impaktní proudění, součinitel přestupu tepla

## **Annotation**

Recently impinging convection heat transfer is gaining considerable attention, because a lot of applications are using its large heat flows in heating or cooling. There are many parameters that affect the rate of heat transfer. For the design and optimization of cooling or heating by a nozzle it is necessary to characterize these parameters. This study compares the values obtained by both numerical simulations and measurements. For the measurement an experimental device was built, by which the values of the heat transfer coefficient on the surface below the nozzle and in close proximity were determined.

The nozzle was formed by five parallel holes, out of which was flowing dry air perpendicularly onto the heating plate fitted with a temperature sensor and heat transfer coefficient. The values were examined for three different distances of the nozzle from the plate and for three different airflows. From the collected data numerical simulations can be compared with measurements to determine the parameters for the desired value of heat transfer coefficient for cooling or heating.

## **Key Words**

Heat transfer coefficient, impact of flow

## **Poděkování**

Velmi rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří mi pomáhali při vzniku této práce. Především Doc. Ing. Tomáši Vítovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za cenné rady, připomínky při vypracování této práce a metodické vedení.

## Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>13</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>14</b>
<b>Seznam grafů</b> .....	<b>15</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>17</b>
<b>1. Teorie výpočtu přestupu tepla</b> .....	<b>18</b>
1.1 Rozdělení konvekce podle povahy proudění .....	18
1.1.1 Přirozená konvekce.....	18
1.1.2 Nucená konvekce.....	19
1.2 Druhy proudění kapaliny .....	20
1.3 Geometrie ploch.....	21
1.4 Fyzikální vlastnosti kapalin .....	21
1.5 Součinitel přestupu tepla $\alpha$ .....	21
1.6 Diferenciální rovnice energie pro konvekci.....	22
1.7 Diferenciální rovnice pohybové (Navier – Stokesovy) .....	23
1.8 Diferenciální rovnice kontinuity .....	23
1.9 OP pro konvekci .....	24
1.10 Řešení úloh přenosu tepla konvekci .....	25
1.11 Podobnost při nucené konvekci .....	25
1.12 Postup při aplikaci teorie podobnosti.....	30
1.13 Impaktní proudění.....	30
1.14 Geometrické uspořádání trysek.....	32
1.15 Přenos tepla konvekci .....	33
1.16 Doporučené vztahy pro osamocenou kruhovou trysku.....	34
1.17 Doporučené vztahy pro osamocenou šterbinovou trysku .....	35
<b>2. Rozbor úlohy</b> .....	<b>36</b>
2.1 Popis senzoru Omega HFS – 4 .....	40
2.2 Dewetron DW 5000 .....	43



2.3 Rychlost proudění suchého vzduchu .....	43
2.4 Nejistoty měření.....	47
<b>3. Výsledky měření .....</b>	<b>50</b>
<b>4. CFD model .....</b>	<b>54</b>
<b>Závěr .....</b>	<b>60</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>61</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>64</b>
<b>Příloha A – Tabulky naměřených hodnot.....</b>	<b>65</b>
<b>Příloha B – Spojnicové grafy naměřených hodnot – zobrazení ve směru y .....</b>	<b>69</b>
<b>Příloha C – Spojnicové grafy naměřených hodnot – zobrazení ve směru x .....</b>	<b>74</b>
<b>Příloha D – Prostorový sloupový graf .....</b>	<b>79</b>

## Seznam zkratek

<i>aj.</i>	a jiné	
<i>atd.</i>	a tak dále	
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
$\alpha_M$	součinitel přestupu tepla modelu	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
$\alpha_D$	součinitel přestupu tepla díla	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
$C$	konstanta funkce	(1)
CFD	počítačová dynamika tekutin	
$c_L$	měřítka délek	(1)
$c_\lambda$	měřítka tepelné vodivosti	(1)
$c_\alpha$	měřítka součinitele přestupu tepla	(1)
$c_T$	měřítka teploty	(1)
$D$	průměr trysky	(m)
$D_h$	charakteristický rozměr kruhové trysky	(m)
DR	diferenciální rovnice	
$\delta$	tloušťka dynamické mezní vrstvy	(m)
$\delta_T$	tloušťka tepelné mezní vrstvy	(m)
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
$\lambda_M$	součinitel tepelné vodivosti modelu	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
$\lambda_D$	součinitel tepelné vodivosti díla	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
$\varsigma$	přepočtová konstanta senzoru	$(\mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2)$
$Eu$	Eulerovo číslo	(1)
$f$	funkce	
$F_I$	výpočtový koeficient	(1)
$g$	tíhové zrychlení	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
$G$	výpočtový koeficient	(1)
<i>grad</i>	gradient	
$H$	vzdálenost trysky od povrchu	(m)
$k$	koeficient rozšíření	(1)
$L$	charakteristický rozměr	(m)
$M$	konstanta funkce	(1)
$M_F$	faktor vlivu teplot	(1)
$\dot{m}$	hmotnostní průtok	$(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$
$m$	konstanta funkce	(1)
$\Delta m$	rozdíl hmotností	(kg)

$n$	konstanta funkce	(1)
$n$	počet měření	(1)
$Nu$	Nusseltovo číslo	(1)
$O$	obvod	(m)
OP	okrajová podmínka	
$p$	tlak	(Pa)
$\Delta p$	rozdíl tlaku	(Pa)
$Pe$	Pecletovo číslo	(1)
Pozn.	poznámka	
Př.	příklad	
$Pr$	Prandtlovo číslo	(1)
$Q$	teplo	(J)
$\rightarrow$ $q$	plošná hustota tepelného toku	(W · m <sup>-2</sup> )
$r$	poloměr válce	(m)
$r$	měrná plynová konstanta	(J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )
$Re$	Reynoldsovo číslo	(1)
$\rho$	měrná hmotnost	(kg · m <sup>-3</sup> )
$S$	plocha trysky	(m <sup>2</sup> )
$T$	teplota	(K)
$T^*$	určující teplota	(K)
$T_D$	teplota díla	(K)
$t_e$	teplota proudu tekutiny	(°C)
$T_M$	teplota modelu	(K)
$T_s$	teplota povrchu stěny	(K)
$t_s$	teplota povrchu stěny	(°C)
TUL	Technická univerzita Liberec	
$T_w$	teplota povrchu stěny	(K)
$T_\infty$	teplota proudu tekutiny	(K)
$\tau$	čas	(s)
$u$	standardní nejistota	(1)
$U$	rozšířená standardní nejistota	(1)
$U$	napětí	(V)
$u_A$	standardní nejistota typu A	(1)
$u_B$	standardní nejistota typu B	(1)
$V$	objem	(m <sup>3</sup> )
$\nu$	kinematická viskozita	(m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )

$W$	šířka trysky	(m)
$w$	rychlost proudění	(m · s <sup>-1</sup> )
$w_e$	rychlost proudění na výstupu z trysky	(m · s <sup>-1</sup> )
$w_x$	rychlost proudění ve směru x	(m · s <sup>-1</sup> )
$w_y$	rychlost proudění ve směru y	(m · s <sup>-1</sup> )
$w_z$	rychlost proudění ve směru z	(m · s <sup>-1</sup> )
$X$	bezrozměrná souřadnice	(1)
$x_0$	skutečná hodnota	(1)
$\bar{x}$	střední hodnota	(1)
$Y$	bezrozměrná souřadnice	(1)
$y_M$	rozměr modelu	(m)
$y_D$	rozměr díla	(m)
$Z$	bezrozměrná souřadnice	(1)
$z$	přesnost měřicího přístroje	(1)

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Naměřené rychlosti proudění .....	43
Tabulka 2 - Tabulka hmotnostních toků ovlivněných nastavením škrtícího ventilu.....	45
Tabulka 3 - Hmotnostní toky a rychlosti proudění vzduchu pro dané nastavení redukčního ventilu .....	46
Tabulka 4 - Tabulka naměřených napětí .....	48
Tabulka 5 - Přepočtené hodnoty pro hmotnostní tok vzduchu $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ a 100 mm vzdálenost od trysky .....	50
Tabulka 6 - Průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla pro dané nastavení parametrů ..	60
Tabulka 7 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu $0,0575 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .....	65
Tabulka 8 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .....	65
Tabulka 9 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .....	66
Tabulka 10 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu $0,0575 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .....	66
Tabulka 11 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .....	67
Tabulka 12 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .....	67
Tabulka 13 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu $0,0575 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .....	67
Tabulka 14 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .....	68
Tabulka 15 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .....	68

## Seznam obrázků

Obrázek 1- Konvekce při volném proudění .....	19
Obrázek 2 - Konvekce při nuceném proudění .....	19
Obrázek 3- Mezní vrstvy při obtékání desky .....	20
Obrázek 4 - Působení jednoduché kruhové nebo štěrbinové trysky na plochu .....	32
Obrázek 5 - a) Kruhová tryska, b) Štěrbínová tryska .....	32
Obrázek 6 - Rozložení lokálního Nusseltova čísla jednoduché kruhové popř. štěrbinové trysky pro a) velkou, b)malou relativní vzdálenost od plochy .....	34
Obrázek 7- Tryska s pěti štěrbinovými otvory .....	36
Obrázek 8 - Experimentální měřící zařízení.....	37
Obrázek 9 - Senzor OMEGA HFS4 .....	38
Obrázek 10- Vyhřívaná měřící deska se senzorem .....	38
Obrázek 11 - Topení na měřící desce .....	39
Obrázek 12 - Dewetron DEWE 5000 .....	39
Obrázek 13 - Měření vybrané oblasti .....	40
Obrázek 14 - Konstrukce senzoru .....	41
Obrázek 15 - Vrtulkový anemometr Testo 416 .....	44
Obrázek 16 - Detail sítě.....	55
Obrázek 17 - CFD vypočtené hodnoty součinitele přestupu tepla .....	58
Obrázek 18 - Linie shodné s měřením.....	59

## Seznam grafů

Graf 1 - Faktor vlivu teplot.....	42
Graf 2 - Hmotnostní toky tryskou .....	46
Graf 3 - Hodnoty součinitele přestupu tepla na měřené ploše – prostorový sloupový graf	51
Graf 4 – Hodnoty součinitele přestupu tepla na měřené ploše – spojnicový graf – zobrazení spojnic ve směru y .....	52
Graf 5 - Hodnoty součinitele přestupu tepla na měřené ploše – spojnicový graf – zobrazení spojnic ve směru x .....	52
Graf 6 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,0575 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru y .....	69
Graf 7 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,076 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru y .....	69
Graf 8 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,1 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru y .....	70
Graf 9 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,0575 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru y .....	70
Graf 10 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,076 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru y .....	71
Graf 11 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,1 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru y .....	71
Graf 12 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,0575 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru y .....	72
Graf 13 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,076 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru y .....	72
Graf 14 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,1 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru y .....	73
Graf 15 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,0575 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru x .....	74
Graf 16 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,076 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru x .....	74

Graf 17 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,1 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru x .....	75
Graf 18 - naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,0575 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru x .....	75
Graf 19 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,076 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru x .....	76
Graf 20 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,1 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru x .....	76
Graf 21 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,0575 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru x .....	77
Graf 22 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,076 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru x .....	77
Graf 23 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,1 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení spojnic ve směru x .....	78
Graf 24 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,076 kg • s <sup>-1</sup> , zobrazení v prostorovém sloupovém grafu .....	79



## Úvod

Diplomová práce se zabývá ohřevem nebo chlazením předmětů vzduchovými proudy. Mezi nejefektivnější způsoby přenosu tepla patří impaktní proudění. Jedná se o proudění vzduchu z trysky na předmět. Tento způsob se využívá v mnoha průmyslových aplikacích. Např.: ohřev či chlazení v hutním či sklářském průmyslu, sušení v potravinářském, papírenském průmyslu...

Cílem diplomové práce je porovnat hodnoty součinitele přestupu tepla na ploše pod tryskou získané měřením na testovacím zařízení s hodnotami získanými numerickou simulací v programu Ansys Fluent. V našem případě proudí vzduch kolmo k ochlazovanému nebo ohřivanému povrchu. Tryska je tvořena pěti štěrbinovými otvory o šířce 7 mm a délce 17,7 mm vzdálenými od sebe 50 mm, které jsou vůči sobě rovnoběžné a pootočené o 30° oproti směru posunu měřicí sondy. Měření i numerické simulace jsou provedeny pro tři vzdálenosti trysky od povrchu (50 mm, 100 mm a 150 mm) a pro tři hmotnostní průtoky ( $0,0575 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Z výsledků měření můžeme určit nastavení parametrů (vzdálenost trysky, rychlost proudění, poloha pod tryskou) pro potřebné hodnoty součinitele přestupu tepla. Dále můžeme určit správnost numerické simulace v programu Ansys Fluent.

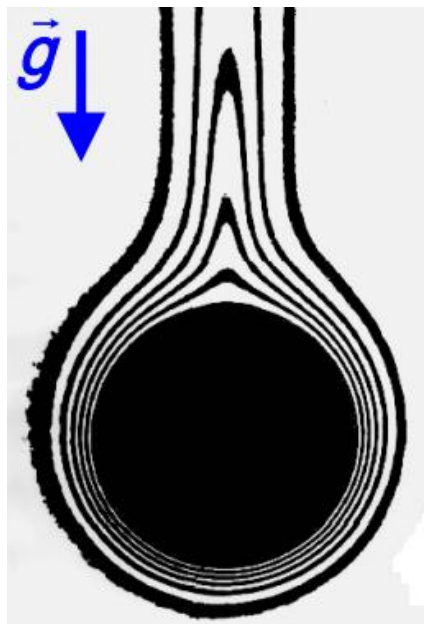
# 1. Teorie výpočtu přestupu tepla

Konvekcí nazýváme sdílení tepla v proudících tekutinách. Konvekce představuje současné sdílení tepla vedením (molekulární transport tepla) a prouděním tekutiny (molární transport tepla). Podíly sdílení tepla vedením a prouděním tekutiny na celkovém transportu tepla jsou různé a záleží především na druhu proudění a fyzikálních vlastnostech tekutiny. Rámcově možno říci, že čím intenzivnější je pohyb molekul a shluků molekul, tím zanedbatelnější je transport tepla kondukcí v tekutině.

## 1.1 Rozdělení konvekce podle povahy proudění

### 1.1.1 Přirozená konvekce

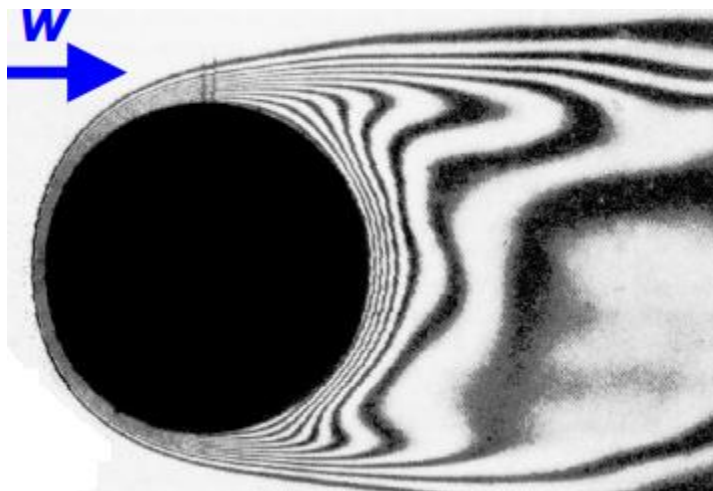
Přirozenou konvekcí nazýváme proudění, které vzniká vlivem rozdílu hustot ohřátých a studených částic kapaliny. Vznik a intenzita tohoto volného pohybu závisí na rozdílu teplot a rozsahu prostoru, v němž konvekce probíhá, viz Obrázek 1.



Obrázek 1- Konvekce při volném proudění [22]

### 1.1.2 Nucená konvekce

Nuceným pohybem kapaliny nazýváme proudění, které vzniká působením vnějších účinků, např. účinkem větru, čerpadla nebo ventilátoru. Podmínky tohoto pohybu závisí na druhu a fyzikálních vlastnostech kapaliny, na její teplotě a rychlosti proudění, na tvaru a rozměrech kanálu, v němž se děje proudění, viz Obrázek 2.

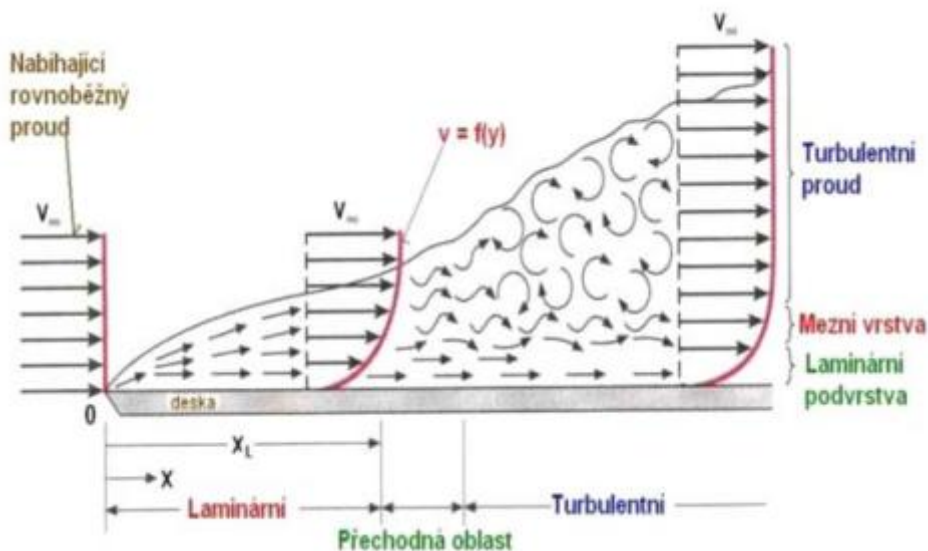


Obrázek 2 - Konvekce při nuceném proudění [22]

V obecném případě může nastávat nucené proudění současně s volným. Poměrný vliv tohoto volného pohybu tím větší, čím menší je rychlost nuceného proudění. Při velkých rychlostech je vliv volného proudění zanedbatelný.

## 1.2 Druhy proudění kapaliny

Chování tekutin při proudění je důležitou součástí mnoha přírodních dějů a je též klíčovým momentem v četných technických aplikacích. Jednou z nejdůležitějších charakteristik tekutiny proudící ve smykové oblasti je stav tohoto proudění: laminární, turbulentní nebo přechodový, viz Obrázek 3.



Obrázek 3- Mezní vrstvy při obtékání desky [21]

Přenos tepla má v laminární oblasti charakter převážně molekulární. Při hodnotách  $Re$  vyšších než kritických se proudění mění na turbulentní, které hodnoty součinitele přestupu tepla zvyšuje.

Kritická rychlost není konstantní. Má různé hodnoty pro různé kapaliny a geometrické podmínky. Při turbulentním proudění nemusí být pohyb celé kapaliny neuspořádaný. Kolem stěny omezující proud se může vytvořit tenká vrstva kapaliny s pohybem

laminárním. Je to tzv. laminární podvrstva. Tloušťka této podvrstvy závisí na střední průtokové rychlosti a s jejím vzrůstem se zmenšuje.

Druh proudění má velmi značný vliv na přestup tepla, poněvadž stanoví podmínky, za kterých se děje sdílení tepla.

### 1.3 Geometrie ploch

Rozlišujeme mezi řešením tzv. vnitřní úlohy (konvektivní přenos v potrubí a uzavřených proudovodech) a vnější úlohy (obtékání trubek, trubkových svazků, desek, kulových a jiných součástí atd.). V každém případě je nutné určit nejméně jeden charakteristický rozměr  $L$ , kterým může být např. průměr potrubí, jeho délka, průměr válce nebo koule, délka obtékané desky.

### 1.4 Fyzikální vlastnosti kapalin

U různých kapalin probíhá přestup tepla různě podle jejich fyzikálních vlastností. Přímý vliv na průběh pochodu mají tyto fyzikální parametry: Tepelná vodivost, měrné teplo, hustota, měrný objem, tepelná vodivost a vazkost. Pro každou kapalinu mají tyto parametry určitou velikost, která je zpravidla funkcí teploty a někdy i tlaku.

### 1.5 Součinitel přestupu tepla $\alpha$

Množství tepla sděleného stykem může být stanoveno na základě Fourierova zákona:

$$Q = -\lambda \cdot \text{grad } T \cdot \tau \cdot S \quad (\text{J}) \quad (1-1),$$

$\lambda$  se nazývá tepelná vodivost ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Použití tohoto vztahu není však pro praktické výpočty možné. K řešení rovnice (1-1) je nutno znát hodnotu teplotního gradientu u stěny a jeho průběh podél celé ohřívací plochy  $S$ , což však není předem známo. Proto se pro

zjednodušení u praktických výpočtů vyjadřuje množství tepla podle Newtonova zákona pro přestup tepla:

$$Q = \alpha \cdot (T - T_s) \cdot S \cdot \tau \quad (\text{J}) \quad (1-2).$$

Součinitel  $\alpha$  tohoto vzorce se nazývá součinitelem přestupu tepla. Velikostí tohoto součinitele se určují podmínky přecházení tepla z tekutiny na povrch tuhého tělesa. Ze vzorce (1-2) plyne rozměr součinitele  $\alpha$ : ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Součinitel přestupu udává tudíž množství tepla přestupujícího jednotkou povrchu při spádu 1K mezi teplotou tekutiny a povrchu tělesa.

Použití Newtonova vzorce nevede zásadně k žádnému zjednodušení. Avšak celá složitost se soustředí na jednu veličinu – součinitel přestupu tepla.

Proto se při zkouškách stanoví hodnota součinitele přestupu tepla a jeho závislost na různých faktorech:

$$\alpha = \alpha(l, \rho, p, w, v, \lambda, \tau, T, g, \dots) \quad (1-3).$$

## 1.6 Diferenciální rovnice energie pro konvekci

Vycházíme z obecné DR vedení tepla bez vnitřních zdrojů

$$\frac{dT}{d\tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1-4),$$

a za totální diferenciál  $dT/d\tau$  dosadíme

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1-5).$$

Pro stacionární konvekci je  $\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$  (1-6),

DR energie pro stacionární konvekci bez vnitřních zdrojů bude mít tvar:

$$w_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1-7).$$

## 1.7 Diferenciální rovnice pohybové (Navier – Stokesovy)

Pro 3D konvekci (pro směry x, y, z)

$$w_x \cdot \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_x}{\partial \tau} = \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + g_x \quad (1-8),$$

$$w_x \cdot \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_y}{\partial \tau} = \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + g_y \quad (1-9),$$

$$w_x \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_z}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial \tau} = \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + g_z \quad (1-10).$$

## 1.8 Diferenciální rovnice kontinuity

Diferenciální rovnice kontinuity pro stlačitelnou tekutinu.

Pro nestacionární 3D konvekci

$$\frac{\partial (\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w_z)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 0 \quad (1-11),$$

pro stacionární 3D konvekci

$$\frac{\partial (\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w_z)}{\partial z} = 0 \quad (1-12),$$

pro stacionární 2D konvekci

$$\frac{\partial (\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho w_y)}{\partial y} = 0 \quad (1-13),$$

DR kontinuity pro nestlačitelnou tekutinu

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0 \quad (1-14).$$

## 1.9 OP pro konvekci

- OP 1. druhu, Dirichletova

Teplota stěny  $T_S$  jako funkce času:  $T(t, x = 0) = T_S(t)$  (K) (1-15),

- OP 2. druhu, Neumannova

Hustota tepelného toku  $\vec{q}$  na stěně jako funkce času:

$$\vec{q}(t, x = 0) = \vec{q}_S(t) = -\lambda \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1-16),$$

- OP 3. druhu, Fourierova.

Teplo převedené z/do tělesa kondukcí = teplo odvedenému/přivedenému prostředím konvekcí:

$$\lambda \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha \cdot (T_f - T_S) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1-17).$$

U konvekce může být

- $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$  (1-18) na povrchu desky,



- $\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = 0$  (1-19) na povrchu válce,
- aj. včetně podmínek pro rychlosti.

## 1.10 Řešení úloh přenosu tepla konvekcí

Musíme řešit současně:

DR energie + pohybové + kontinuity + OP teplotních a rychlostních polí.

Pro řešení přestupu tepla je třeba následně použít DR přestupu tepla.

Metody řešení:

- Exaktní řešení DR pro konvekci tepla (jen pro jednoduché úlohy)
- Přibližné řešení DR pro konvekci (předpoklad teplotních profilů ve tvaru polynomu, exponenciální funkce..., vhodné pro mezní vrstvy)
- Numerické řešení DR pro konvekci (i složité úlohy, aplikace počítačů)
- Experimentální řešení přenosu tepla konvekcí včetně využití analogových metod (přesné, složité, drahé)
- Teorie podobnosti pro řešení DR konvekce (nutná znalost podobného řešení vyjádřeného pomocí podobnostních čísel).

## 1.11 Podobnost při nucené konvekci

Teorie podobnosti při konvekci umožní velice jednoduše inženýrským způsobem získat rozložení teplotních polí, nebo přímo součinitel přestupu tepla  $\alpha$ .

Potřebná podobnostní čísla při nucené konvekci odvodíme:

- Z DR energie

$$w_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1-20),$$

- Z DR pohybových

$$w_x \cdot \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_x}{\partial y} = \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1-21),$$

- Z DR kontinuity

$$\frac{\partial (\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho w_y)}{\partial y} = 0 \quad (1-22),$$

- Z DR přestupu tepla

při řešení  $\alpha$

$$\alpha \cdot (T_w - T_\infty) = -\lambda \cdot \left( \frac{dT}{dy} \right)_w \quad (1-23),$$

Zavedeme indexy  $D$  pro dílo,  $M$  pro model

Zavedeme měřítko délek  $c_L \Rightarrow y_D = c_L \cdot y_M, L_D = c_L \cdot L_M,$

A další měřítka  $c_\alpha \Rightarrow \alpha_D = c_\alpha \cdot \alpha_M,$

$c_T \Rightarrow T_D = c_T \cdot T_M$   $c_\lambda \Rightarrow \lambda_D = c_\lambda \cdot \lambda_M,$

DR přestupu tepla pro dílo

$$\alpha_D \cdot (T_W - T_\infty)_D = -\lambda_D \cdot \left( \frac{dT_D}{dy_D} \right)_W \quad (1-24),$$

Upravená rovnice pro dílo

$$c_\alpha \cdot \alpha_M \cdot c_T \cdot (T_W - T_\infty)_M = -c_\lambda \cdot \lambda_M \cdot \frac{c_T}{c_L} \cdot \left( \frac{dT_M}{dy_M} \right)_W \quad (1-25),$$

DR přestupu tepla pro model

$$\alpha_M \cdot (T_W - T_\infty)_M = -\lambda_M \cdot \left( \frac{dT_M}{dy_M} \right)_W \quad (1-26),$$

(1.25) a (1.26) podělíme a dostaneme

$$c_\alpha \cdot c_{T=c_\lambda} \cdot \frac{c_T}{c_L} \Rightarrow \frac{c_\alpha \cdot c_L}{c_\lambda} = 1 \quad (1-27).$$

Po dosazení za měřítko dostaneme

$$\frac{\frac{\alpha_D \cdot L_D}{\alpha_M \cdot L_M}}{\frac{\lambda_D}{\lambda_M}} = 1 \Rightarrow \frac{\alpha_D \cdot L_D}{\lambda_D} = \frac{\alpha_M \cdot L_M}{\lambda_M} \quad (1-28).$$

Podobný přestup tepla je pro  $\alpha \cdot L / \lambda$  stejné na modelu i díle. Tento podíl je označován jako Nusseltovo číslo.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (1) \quad (1-29).$$

Podobnostní čísla z DR pohybových

$$w_x \cdot \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_x}{\partial y} = \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1-30).$$

Z levé strany rovnice (1-30) a z prvního členu na pravé straně dostaneme Reynoldsovo číslo.

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad (1) \quad (1-31),$$

$Re$  je bezrozměrná rychlost.

Z levé strany rovnice (1-31) a z druhého členu na pravé straně dostaneme Eulerovo číslo.

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2} \quad (1) \quad (1-32),$$

$Eu$  je bezrozměrný tlakový rozdíl.

Podobnostní číslo z DR energetické

$$w_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1-33),$$

Z levé strany rovnice a z pravé strany rovnice (1-33) dostaneme Pecletovo číslo.

$$Pe = \frac{w \cdot L}{a} \quad (1) \quad (1-34),$$

$Pe$  je poměrem přenosu tepla prouděním a vedením při konvekci.

Výsledky řešení DR nebo experimentů se vyjadřují prostřednictvím kritériálních rovnic.

$Nu = f(Re, Eu, Pe, X, Y, Z)$  (1) (1-35) obecná kritériální rovnice pro nucenou konvekci,

$X = x/L$   $Y = y/L$   $Z = z/L$  (1-36) bezrozměrné souřadnice.

Rychlost je obsažena v  $Re$  a  $Pe$ , a proto je vhodné jedno z těchto kritérií vyloučit. Platí:

$$Pe = \frac{w \cdot L}{a} = \frac{w \cdot L}{v} \cdot \frac{v}{a} = Re \cdot Pr \quad (1) \quad (1-37).$$

Je zřejmé, že Reynoldsovo číslo a Pecletovo číslo jsou navzájem vázány, tzv. Prandtlovým číslem.

$$Pr = \frac{v}{a} \quad (1) \quad (1-38),$$

$Pr$  je měřítkem podobnosti rychlostních a teplotních polí.

$Pr$  je fyzikální vlastnost, jelikož je funkcí jen fyzikálních vlastností a lze jej nalézt v tabulkách.

- Pro plyny  $Pr \approx 1$ ,  $Pr_{vzduchu} = 0,72$
- Pro kapaliny  $Pr > 1$
- Pro tekuté kovy  $Pr \ll 1$ .

Pozn.: Při laminárním režimu proudění přibližně platí  $\delta/\delta_T \approx \sqrt[3]{Pr}$  takže pro  $Pr = 1$  je tloušťka dynamické  $\delta$  a tepelné mezní vrstvy  $\delta_T$  stejná  $w = f(\Delta p)$ ,  $\Delta p = f(w) \Rightarrow$  z dalších úvah lze vynechat Eulerovo číslo, jelikož  $Eu = f(Re)$ .

Kriteriální rovnice pro nucenou konvekci přejde nyní do tvaru:  $Nu = f(Re, Pr, X, Y, Z)$ .

Kriteriální rovnice pro nucenou konvekci pro podobné geometrické útvary má tvar:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (1) \quad (1-39).$$

Kriteriální rovnici vyjadřujeme často pomocí mocninné funkce

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (1) \quad (1-40).$$

Konstanty  $C$ ,  $m$ ,  $n$  (nebo také konstanty pro jiný typ funkce) jsou výsledkem řešení DR nebo předmětem experimentálního výzkumu a lze je obvykle nalézt pro konkrétní geometrické útvary v literatuře.

- Pro laminární proudění  $m = 0,5$
- Pro turbulentní proudění  $m = 0,8$ .

## 1.12 Postup při aplikaci teorie podobnosti

Cílem použití teorie podobnosti je určit  $\alpha$

- Z literatury zjistíme kritériální rovnici pro daný objekt – pro danou geometrii, pro lokální či střední hodnoty, pro laminární nebo turbulentní proudění, pro žadáný rozsah  $Re$
- Z literatury zjistíme charakteristický rozměr  $L$  a určující teplotu  $T^*$ .

$$Pr, \nu, \lambda, \gamma = f(T^*)$$

$$T^* = (T_W + T_\infty) / 2 \quad \text{nebo} \quad T^* = T_W, T^* = T_\infty \quad (K) \quad (1-41),$$

- Z definic vypočteme  $Re$
- Z kritériální rovnice určíme  $Nu$
- Z Nusseltova čísla vypočteme  $\alpha$
- Z  $\alpha$  lze počítat tepelný tok konvekcí.

## 1.13 Impaktní proudění

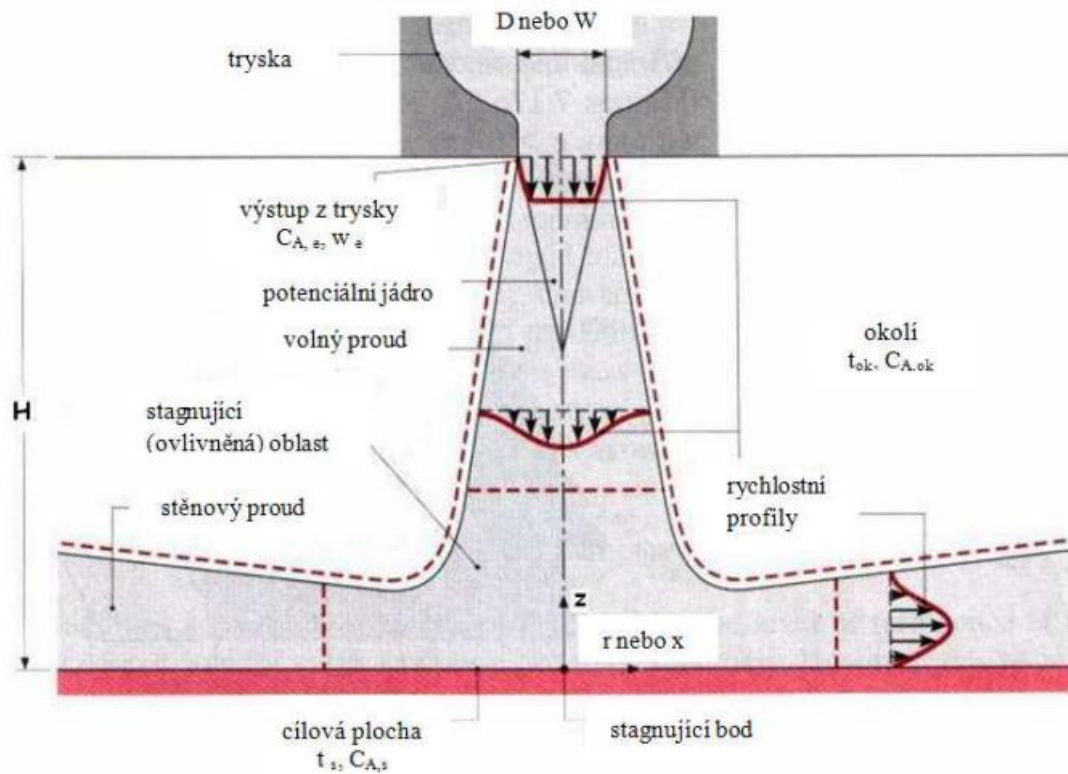
Impaktní proud nebo skupina takových proudů namířených na plochu mohou být užity k dosažení zvětšení konvektivního zahřívání, chlazení, nebo sušení.

Jak je ukázáno na Obrázek 4, proud vzduchu typicky vytéká do klidového okolí z kruhové trysky o průměru  $D$  nebo ze štěrbinové trysky o šířce  $W$ . Proudění na výstupu z trysky je charakteristické rovnoměrným rychlostním profilem. Se zvětšující se vzdáleností od výstupu způsobuje výměna hybnosti mezi proudem a okolím rozšířené volné hranice

proudu a potenciální jádro, ve kterém je udržována rovnoměrná výstupní rychlost, se zužuje. Po proudu potenciálního jádra je rychlostní profil nerovnoměrný přes celý příčný řez proudu a maximální (osová) rychlost klesá se vzrůstající vzdálenosti od výstupu trysky. Oblast proudu, která je neovlivněna působením cílové plochy, se nazývá volný proud.

Ve stagnující nebo ovlivněné oblasti ovlivňuje cílová plocha proud, a ten je zpomalován ve směru normály  $z$  a zrychlován v příčném směru  $r$  nebo  $x$ . Proud nadále strhává vzduch z okolí a zrychlující proud ve stagnující oblasti se přeměňuje na zpomalovaný stěnový proud.

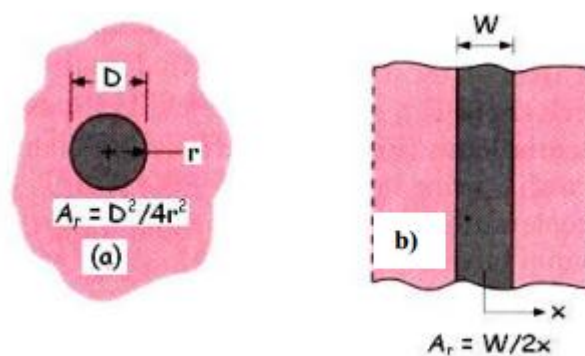
Se zvětšující se hodnotou  $r$  nebo  $x$  dochází ke zvětšování složek rychlosti souběžných s plochou z nulové hodnoty do určitého maxima a následně k poklesu na nulovou hodnotu. Rychlostní profily stěnového proudu jsou charakterizovány nulovou rychlostí na hranicích proudu s ovlivněnou plochou a s okolím. Pokud je  $t_s \neq t_e$  dochází k přenosu tepla ve stagnující oblasti i v oblasti stěnového proudu.



Obrázek 4 - Působení jednoduché kruhové nebo štěrbinové trysky na plochu [5]

### 1.14 Geometrické uspořádání trysek

Půdorys jednoduché kruhové a štěrbinové trysky je znázorněn na Obrázek 5. Pro osamocené trysky je lokální a střední součinitel přestupu tepla konvekcí nezávislý na  $r$  a  $x$ .



Obrázek 5 - a) Kruhová tryska, b) Štěrbinová tryska [5]



## 1.15 Přenos tepla konvekcí

V závěrech, které následují, je předpokládáno, že proud vzduchu vystupuje z trysky s rovnoměrnou rychlostí  $w_e$  a teplotou  $t_e$ . Tepelná rovnováha s okolím se předpokládá při  $t_s = t_e$ , zatímco přenos tepla konvekcí nastává při rozdílné teplotě  $t_s \neq t_e$ . Newtonův ochlazovací zákon je pak:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (t_s - t_e) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1-42),$$

Pro jednoduchou kruhovou nebo štěrbinovou trysku má rozložení lokálního Nusseltova čísla charakteristické tvary zobrazené na Obrázek 6. Charakteristický rozměr je hydraulický průměr trysky  $D_h$  definovaný jako:

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{O} \quad (\text{m}) \quad (1-43),$$

kde  $O$  je smáčený obvod. Odtud je charakteristický rozměr pro kruhovou trysku  $D_h = D$  a pro štěrbinovou trysku při předpokladu  $L \gg W$  je  $D_h = 2W$ . Z toho vyplývá, že pro kruhovou trysku je:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} \quad (1) \quad (1-44),$$

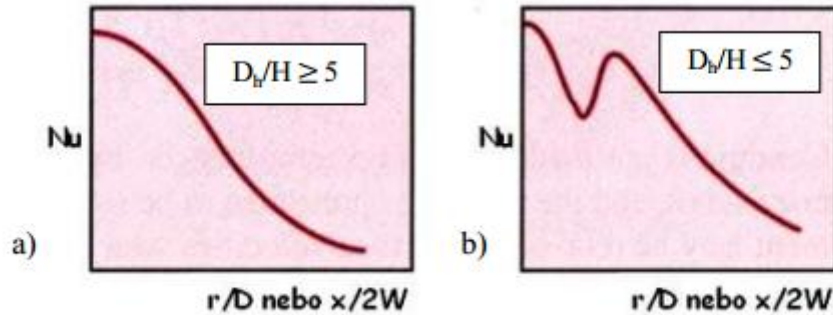
a pro štěrbinovou trysku:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot 2 \cdot W}{\lambda} \quad (1) \quad (1-45).$$

Pro velký poměr  $H/D_h$  (velká vzdálenost povrchu od trysky) obr. 6 a) je rozložení charakterizováno křivkou zvonovitého tvaru, pro které  $Nu$  monotónně klesá z maximální hodnoty, kterou má ve stagnujícím bodě  $r/D$  ( $x/2 \cdot W$ ) = 0.

Pro malý poměr  $H/D_h$ , obr. 6 b) je rozložení charakteristické druhým maximem, jehož hodnota vzrůstá se zvětšujícím se Reynoldsovým číslem a může přesáhnout první maximum. Prahový poměr  $H/D_h \approx 5$ , pod kterým se objevuje druhé maximum, je neurčitě spojován s délkou potenciálního jádra. Výskyt druhého maxima je přisuzován prudkému

zvýšení úrovně turbulence, které je doprovázeno přechodem ze zrychlující stagnující oblasti proudu na zpomalený stěnový proud. Sekundární maxima jsou rovněž přiřazena vzájemnému působení stěnového proudu na soustavu.



Obrázek 6 - Rozložení lokálního Nusseltova čísla jednoduché kruhové popř. štěrbinové trysky pro a) velkou, b) malou relativní vzdálenost od plochy [5]

Střední Nusseltova čísla mohou být dosažena integrací lokálních výsledků přes příslušnou plochu povrchu. Pro jednoduché trysky se předpokládá odpovídající vztah přenosu tepla ve tvaru:

$$Nu = f \left( Re, Pr, \frac{r \text{ (nebo } x)}{D_h}, \frac{H}{D_h} \right) \quad (1) \quad (1-46),$$

kde

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D_h}{\lambda} \quad (1) \quad (1-47),$$

$$Re = \frac{w_e \cdot D_h}{\nu} \quad (1) \quad (1-48),$$

a  $D_h = D$  pro kruhovou trysku nebo  $D_h = 2 \cdot W$  pro štěrbinovou trysku.

## 1.16 Doporučené vztahy pro osamocenou kruhovou trysku

$$\frac{Nu}{Pr^{0,42}} = G \cdot \left( \frac{r}{D} \cdot \frac{H}{D} \right) \cdot F_1(Re) \quad (1) \quad (1-49),$$

$$G = \frac{D}{r} \cdot \frac{1 - 1,1 \cdot \frac{D}{r}}{1 + 0,1 \cdot \left(\frac{H}{D} - 6\right) \cdot \frac{D}{r}} \quad (1) \quad (1-50),$$

$$F_1 = 2 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + 0,005 \cdot Re^{0,55})^{\frac{1}{2}} \quad (1) \quad (1-51).$$

Tyto vztahy platí za podmínek:

$$\left| \begin{array}{l} 2000 \leq Re \leq 400000 \\ 2 \leq \frac{H}{D} \leq 12 \\ 2,5 \leq \frac{r}{D} \leq 7,5 \end{array} \right|$$

### 1.17 Doporučené vztahy pro osamocenou štěrbinovou trysku

$$\frac{Nu}{Pr^{0,42}} = \frac{3,06}{\frac{x}{W} + \frac{H}{W} + 2,78} Re^m \quad (1) \quad (1-52),$$

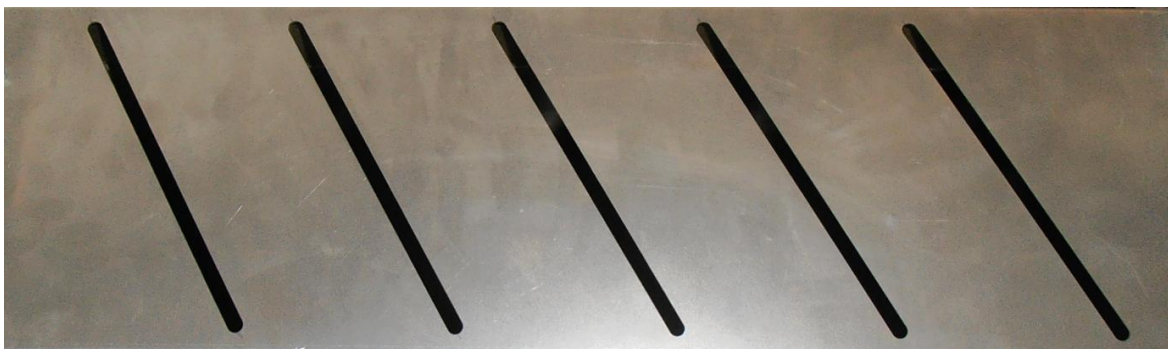
$$m = 0,695 - \left[ \left( \frac{x}{2W} \right) + \left( \frac{H}{2W} \right)^{1,33} + 3,06 \right]^{-1} \quad (1) \quad (1-53).$$

Uvedené vztahy platí za následujících podmínek:

$$\left| \begin{array}{l} 3000 \leq Re \leq 90000 \\ 2 \leq \frac{H}{W} \leq 10 \\ 4 \leq \frac{x}{W} \leq 20 \end{array} \right|$$

## 2. Rozbor úlohy

Úkolem měření bylo zjistit hodnoty součinitele přestupu tepla na ploše 400 mm ve směru  $y$  a 280 mm ve směru  $x$  ofukované impaktním proudem suchého vzduchu vycházejícího z trysky s pěti štěrbinovými otvory o šířce 7 mm a délce 177 mm vzdálených 50 mm od sebe, viz Obrázek 7. Měly by být vidět rozdíly mezi místy pod tělesem trysky a mimo trysku, mezi místy přímo pod štěrbinou a mezi štěrbinami. Bylo třeba provést devět měření (pro tři různé vzdálenosti: 50 mm, 100 mm a 150 mm a pro tři různé průtoky vzduchu:  $0,057 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $0,075 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $0,1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ , což odpovídá rychlostem proudění:  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $10,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



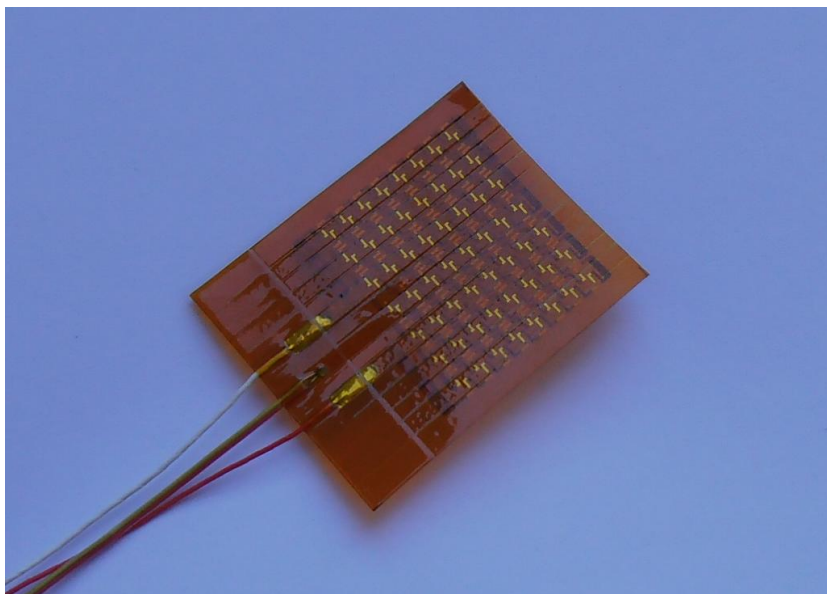
Obrázek 7- Tryska s pěti štěrbinovými otvory

Pro pokusy bylo sestaveno experimentální měřicí zařízení dle stávajících návrhů, viz Obrázek 8. Na zařízení byla upevněna ofukovací tryska a deska pod měřicí sondu. Suchý vzduch na pokus zajistil šroubový kompresor Krohne s vymrazovačkou. Vzduch byl ukládán do tří tlakových nádrží. Dvou o objemech  $5 \text{ m}^3$  a jedné o objemu  $4 \text{ m}^3$  (celkem  $14 \text{ m}^3$ ). Maximální přetlak dosahoval šesti barů. Pro konstantní průtok vzduchu byl použit redukční ventil, který redukoval přetlak do trysky na hodnoty do 0,2 bar. Pro měření součinitele přestupu tepla byl použit senzor OMEGA HFS4, viz Obrázek 9. Na senzoru se nachází čidlo teploty a hustoty tepelného toku. Senzor byl přilepen na horní stranu hliníkové desky, viz Obrázek 10, která byla zesponu vyhřívána topným tělesem, viz Obrázek 11. Záznam hodnot ze sondy zajišťovala výpočetní jednotka Dewetron DEWE 5000, viz Obrázek 12. Měření probíhalo v sedmi bodech na ose  $x$  a v deseti bodech na ose  $y$ . Krok posunu sondy byl 40 mm. Z jednoho měření v celé ploše (70 bodů) byly vybrány oblasti s největšími rozdíly. Další měření probíhalo jednou ve směru  $x$  (pod osou

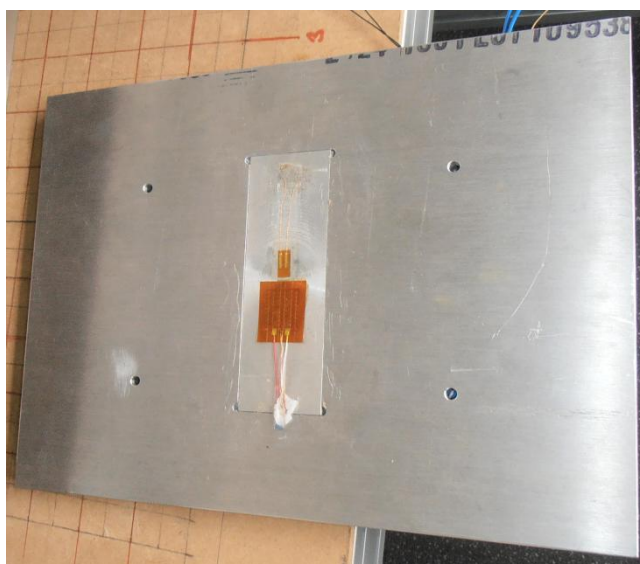
trysky) a dvakrát ve směru  $y$  (první měření směřovalo přímo pod štěrbinu a druhé mezi dvě štěrbinu), viz Obrázek 13. Na Dewetronu byl nastaven záznam hodnot po 0,1 s. V každém měřicím bodě zůstala sonda 3 s až 5 s. Z naměřených hodnot byl vytvořen aritmetický průměr. Zaznamenávalo se napětí a teplota. Z těchto hodnot se dle návodu k sondě Omega HFS4 provedl přepočet na součinitel přestupu tepla.



Obrázek 8 - Experimentální měřicí zařízení



*Obrázek 9 - Senzor OMEGA HFS4*



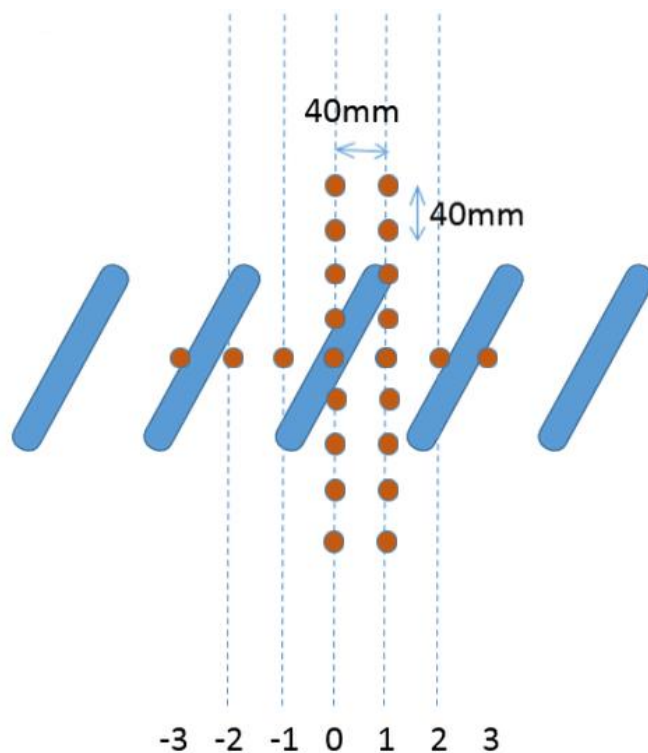
*Obrázek 10- Vyhřívaná měřicí deska se senzorem*



*Obrázek 11 - Topení na měřicí desce*



*Obrázek 12 - Dewetron DEWE 5000*

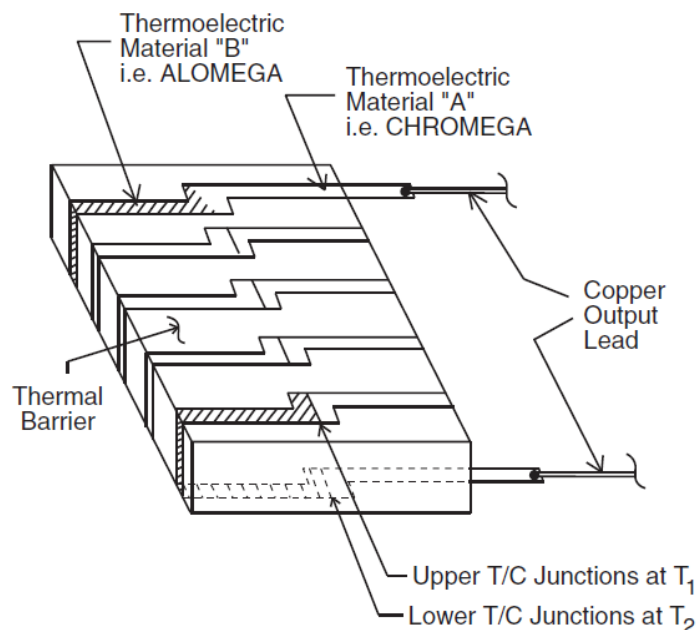


Obrázek 13 - Měření vybrané oblasti

## 2.1 Popis senzoru Omega HFS – 4

Senzor Omega HFS-4 je navržen k měření tepelného toku z nebo do desky s minimálním ovlivněním tepelného toku modelu. Teplotní spád generuje na termočlánek s definovaným tepelným mostem napětí, které je funkcí tepelné energie. Čidlo lze připojit na voltmetr s rozsahem mikro Volt, pro pořízení časového průběhu na zařízení se záznamem.





Obrázek 14 - Konstrukce senzoru

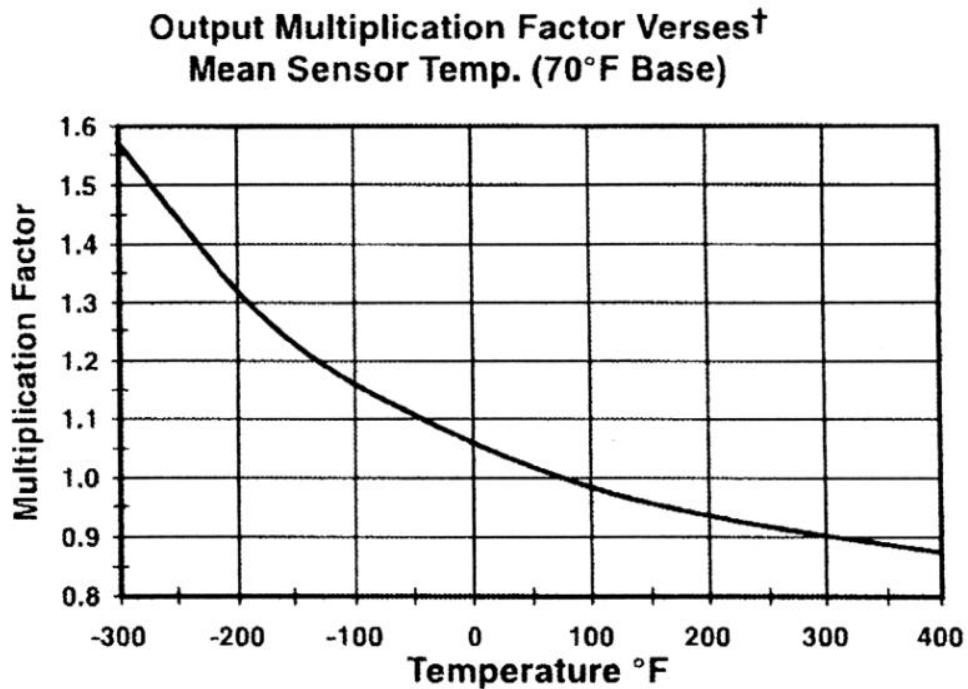
Zdroj: kalibrační list senzoru Omega HFS-4

Díky tenkému profilu a flexibilitě může být snímač použit na ploché nebo zakřivené povrchy různých materiálů. Pro upevnění lze použít konvenční epoxidová lepidla, popřípadě polyesterovou nebo epoxidovou oboustrannou lepicí pásku na senzory.

Výstupní signál je generován následujícím způsobem: Senzor je umístěn v těsném kontaktu s povrchem, pro který je třeba tepelný výkon vypočítat. Senzorem musí protékat stejné množství energie jako skrz povrch, na který je přiložen. Teplotní gradient vzniklý na bariéře je přímo úměrný rychlosti přenosu tepla. Duální termočlánky změří velikost tohoto gradientu a poskytují kalibrovaný napěťový výstup snadno čitelný na jakémkoli mikro-voltmetru.

Ke každému senzoru je dodán kalibrační list, na kterém jsou uvedeny přepočtové hodnoty. Na použitém senzoru při 70°F, což odpovídá 21,11°C, byl výstup  $\zeta = 1,9 \mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$ .

Nominální tepelné vlastnosti senzorů jsou uvedeny v grafu pro umožnění odhadu vlivu snímače v rozsahu možných teplot použití, viz Graf 1.



*Graf 1 - Faktor vlivu teplot*

Zdroj: Kalibrační list senzoru Omega HFS-4

Jelikož se při měření teploty pohybovaly okolo 40°C, což odpovídá 104°F, tak lze z grafu odečíst multiplication factor  $M_F = 0,98$ , který uvažujeme při výpočtech.

Těmito výpočty byla získána hustota tepelného toku. Pro výpočet součinitele přestupu tepla je třeba ještě znát rozdíl teploty povrchu tělesa a teploty proudícího vzduchu.

Př: Při pokusu bylo naměřeno napětí  $U$  0,001498V. Teplota povrchu tělesa  $t_s$  37,7°C a teplota vzduchu  $t_e$  20°C.

$$\alpha = \frac{U \cdot 1000000}{\zeta \cdot M_F \cdot (t_s - t_e)} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (2-1),$$

$$\alpha = \frac{U \cdot 1000000}{\zeta \cdot M_F \cdot (t_s - t_e)} = \frac{0,001498 \cdot 1000000}{1,9 \cdot 0,98 \cdot (37,7 - 20)} = 45,45 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}).$$

## 2.2 Dewetron DW 5000

Dewetron DEWE 5000 je univerzální měřicí přístroj na bázi PC pro měření, ale zároveň i pro analýzu a prezentaci výsledků. Ukládá stovky signálů na pevný disk rychlostí až  $100 \text{ MB} \cdot \text{s}^{-1}$ . Umožňuje online analýzu dat s časovým záznamem.

## 2.3 Rychlost proudění suchého vzduchu

První metoda určení rychlosti proudění vzduchu byla měření vrtulkovým anemometrem Testo 416, viz Obrázek 15. Rychlost byla měřena přímo pod štěrbinami trysky. Redukční ventil byl nastaven na tři otáčky. Měřením bylo zjištěno, že rychlost proudění pod otvory trysky je různá. Hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 1. Otvor číslo 1 je nejbližší a otvor číslo 5 je nejdál od vstupu vzduchu do trysky. Narůstající rychlost proudění směrem od vstupu vzduchu do trysky byla potvrzena měřením součinitele přestupu tepla, který narůstal směrem k otvoru číslo 5.

*Tabulka 1 - Naměřené rychlosti proudění*

otvor číslo	1	2	3	4	5
rychlost ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	12,1	13,2	14,1	14,4	15,7



Obrázek 15 - Vrtulkový anemometr Testo 416 [10]

Druhé měření rychlosti proudění bylo provedeno opět vrtulkovým anemometrem Testo 416. Tentokrát byla rychlost proudění měřena na hadici přivádějící vzduch k trysce. Redukční ventil byl taktéž nastaven na 3 otáčky. Redukce na konci vstupní hadice má průměr 40 mm. V tomto místě byla naměřena rychlost proudění  $68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pomocí rovnice kontinuity byla rychlost přepočítána na rychlost proudění z otvorů v trysce viz rovnice 2-2.

$$w = \frac{w_x \cdot S_x}{S} = \frac{w_x \cdot \frac{\pi \cdot d_x^2}{4}}{S} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2-2),$$

$$w = \frac{w_x \cdot S_x}{S} = \frac{w_x \cdot \frac{\pi \cdot d_x^2}{4}}{S} = \frac{68 \cdot \frac{\pi \cdot 40^2}{4}}{6,1424 \cdot 10^{-3}} = 13,91. \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}).$$

Výpočet plochy trysek

$$S = n \cdot \left( a \cdot b + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \quad (\text{m}^2) \quad (2-3),$$

$$S = n \cdot \left( a \cdot b + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 5 \cdot \left( 0,177 \cdot 0,007 + \frac{\pi \cdot 0,007^2}{4} \right) = 6,1424 \cdot 10^{-3} \quad (\text{m}^2).$$

Třetí způsob určení rychlosti proudění vzduchu z trysek byl výpočtem pomocí základní stavové rovnice a rovnice kontinuity. Ze tří tlakových nádob o objemu 14 m<sup>3</sup> byl odpouštěn vzduch při daném nastavení redukčního ventilu. Byl měřen čas, za který poklesne tlak o 50 kPa nebo 75 kPa. Zároveň byla měřena teplota vzduchu. Ze známých hodnot byla pomocí rovnice kontinuity vypočtena hmotnost vzduchu v nádržích před a po odpouštění. Rozdílem těchto hmotností byla vypočtena hmotnost vypuštěného vzduchu. Následně se vypočetl hmotnostní tok  $\dot{m}$  (kg · s<sup>-1</sup>) tak, že se rozdíl hmotností  $\Delta m$  (kg) vydělil časem odpouštění. Hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 2.

$$m_1 = \frac{p_1 \cdot V}{r \cdot T_1} \text{ (kg) (2-4),}$$

$$m_1 = \frac{p_1 \cdot V}{r \cdot T_1} = \frac{475000 \cdot 14}{287 \cdot 297} = 78,02 \text{ (kg),}$$

$$\Delta m = m_1 - m_2 \text{ (kg) (2-5),}$$

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 78,02 - 65,92 = 12,10 \text{ (kg),}$$

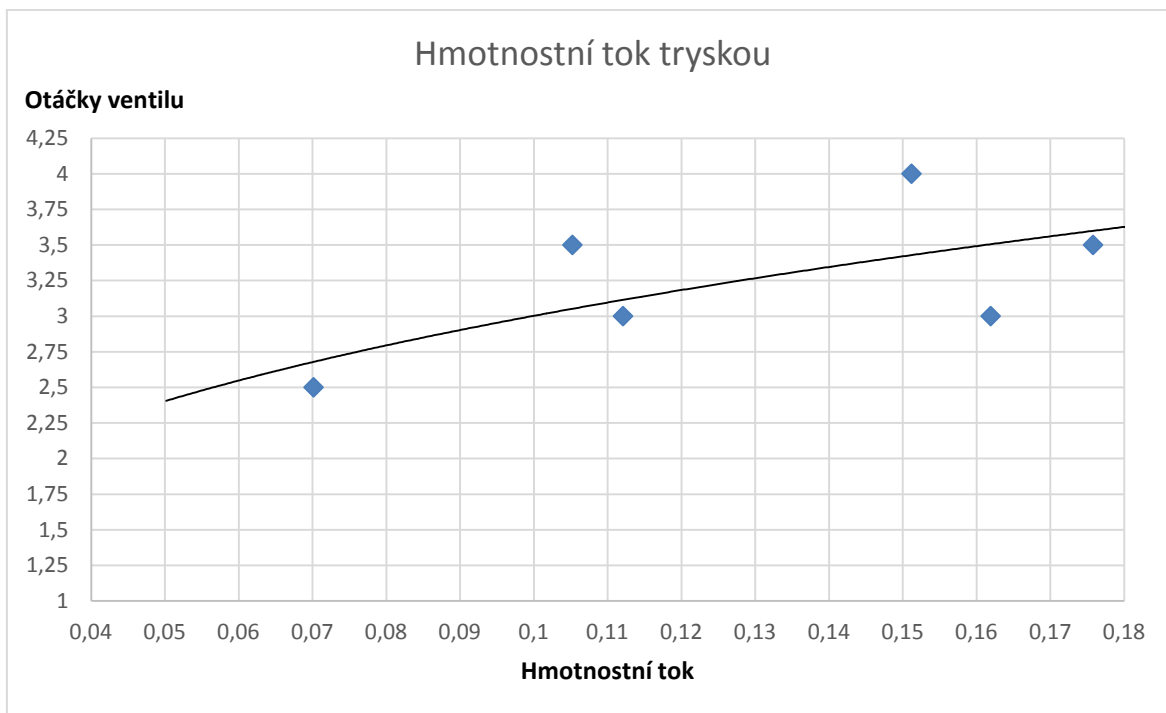
$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\tau} \text{ (kg} \cdot \text{s}^{-1}\text{) (2-6),}$$

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\tau} = \frac{12,10}{80} = 0,15 \text{ (kg} \cdot \text{s}^{-1}\text{).}$$

Tabulka 2 - Tabulka hmotnostních toků ovlivněných nastavením škrtícího ventilu

otáčky ventilu	p1 (kPa)	p2 (kPa)	$\tau$ (s)	T1 (K)	T2 (K)	m1 (kg)	m2 (kg)	$\Delta m$ (kg)	$\dot{m}$ (kg · s <sup>-1</sup> )
4	475	400	80	297	296	78,02	65,92	12,10	0,15
3	400	350	70	296	294	65,92	58,072	7,85	0,11
3,5	300	250	78	292	291	50,12	41,91	8,21	0,11
3	550	500	49	297	296	90,33	82,40	7,93	0,16
3,5	500	450	44	296	294	82,40	74,66	7,74	0,18
2,5	450	400	115	294	293	74,66	66,59	8,07	0,07

Vypočtené hodnoty byly vloženy do Graf 2 a proloženy spojnici trendu.



Graf 2 - Hmotnostní toky tryskou

Ze spojnice trendu byly odečteny hodnoty hmotnostního toku pro 2,5 otáčky, 2,75 otáčky a 3 otáčky redukčního ventilu, viz Tabulka 3. Výpočet rychlosti proudění z otvorů trysky byl vypočten dle vzorce (2-7)

$$w = \frac{\dot{m} \cdot r \cdot T}{p \cdot S} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2-7),$$

$$w = \frac{\dot{m} \cdot r \cdot T}{p \cdot S} = \frac{0,1 \cdot 287 \cdot 298}{100000 \cdot 0,0061424} = 13,92 \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}).$$

Tabulka 3 - Hmotnostní toky a rychlosti proudění vzduchu pro dané nastavení redukčního ventilu

otáčky ventilu	$\dot{m}$ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	w (m/s)
2,5	0,0575	8,01
2,75	0,076	10,58
3	0,1	13,92

Ve všech třech způsobech měření nebo výpočtu rychlosti pro tři otáčky ventilu vyšla přibližně stejná hodnota a to cca  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 2.4 Nejistoty měření

Nejistota měření je parametr přiřazený k výsledku měření, udávající interval hodnot měřené veličiny kolem výsledku měření, který obsahuje skutečnou hodnotu  $x_0$  měřené veličiny.

Nejistota měření zahrnuje obecně mnoho složek. Některé z nich lze vyhodnotit na základě statistického rozložení výsledků série měření a charakterizovat výběrovou směrodatnou odchylkou. Nejistota se však nevztahuje pouze k výsledkům měření, ale také na měřidla, použité konstanty, korekce atd.

Nejistoty jsou určovány na základě statistického přístupu. Předpokládá se určité rozdělení pravděpodobnosti, které popisuje, jak se může naměřená hodnota měřené veličiny lišit od skutečné hodnoty. Z tohoto rozdělení pravděpodobnosti můžeme určit pravděpodobnost, s jakou se v intervalu daném nejistotou skutečná hodnota může nacházet.

Mírou nejistoty je směrodatná odchylka udávané hodnoty (odhadu skutečné hodnoty). Takto vyjádřená nejistota se označuje jako standardní nejistota  $u$  a udává rozsah hodnot  $\langle -u, +u \rangle$  okolo naměřené (stanovené) hodnoty, ve kterém se s danou pravděpodobností nachází skutečná hodnota.

Standardní nejistoty se podle zdrojů, ze kterých vznikají, dělí na standardní nejistoty typu  $A$  a standardní nejistoty typu  $B$ .

**Standardní nejistoty typu  $A$  ( $u_A$ )** jsou způsobovány náhodnými vlivy, jejichž příčiny nejsou známy. Stanovují se z opakovaných měření určité hodnoty dané veličiny za stále stejných podmínek na základě statistického přístupu. Charakteristické pro nejistotu typu  $A$  je, že se její hodnota zmenšuje se zvětšujícím se počtem opakovaných měření.

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-8).$$

**Standardní nejistoty typu B ( $u_B$ )** vznikají ze známých a odhadnutelných příčin. Mohou pocházet z různých zdrojů. Jejich určení vychází z odhadu systematických chyb naměřených hodnot. Standardní nejistota typu B je dána odmocninou ze součtu kvadrátů nejistot od jednotlivých zdrojů. Hodnoty standardní nejistoty typu B nezávisí na počtu opakovaných měření.

Zdroji standardních nejistot typu B ( $u_B$ ) jsou nedokonalosti způsobené použitými měřicími přístroji a měřicí technikou, použitými měřicími metodami, použitými konstantami, podmínkami, za kterých měření probíhá, nedostatečnými teoretickými znalostmi nebo nedostatečnými praktickými zkušenostmi.

$$u_B = z \cdot k \quad (2-9).$$

Shodný přístup k stanovení nejistot typu A i B umožňuje sloučit všechny standardní nejistoty (tj. typu A a B) do jediné hodnoty. Sumací kvadrátů standardních nejistot typů A a B se dostane kvadrát kombinované standardní nejistoty  $u$ , která je dána vztahem

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2-10).$$

V praxi se doporučuje udávat nejistoty intervalem, u kterého je jen malá pravděpodobnost, že bude překročen. Proto se zavádí rozšířená standardní nejistota  $U$ , která je dána vztahem

$$U = k \cdot u \quad (2-11),$$

kde  $k$  je koeficient rozšíření (koeficient pokrytí). Konvenční hodnota  $k$  se obvykle volí 2. Při  $k = 2$  je  $U = 2 \cdot u$ , což při normálním rozdělení pravděpodobnosti znamená, že skutečná hodnota leží s pravděpodobností 95 % v intervalu, vymezeném rozšířenou nejistotou.

*Tabulka 4 - Tabulka naměřených napětí*

měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$
<b>U (V)</b>	0,002197	0,001831	0,002136	0,001984	0,002045	0,001801	0,001862	0,001587	0,00177	0,001617	0,001846



Př.: naměřené hodnoty napětí v bodě  $x_0, y_0$ , zaznamenáno 10 hodnot, chyba senzoru  $6,5 \cdot 10^{-6}$ , koeficient rozšíření  $k=2$  (pro četnost výskytu 95%).

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 6,6 \cdot 10^{-5} \text{ (V)},$$

$$u_B = 6,5 \cdot 10^{-6} \cdot 2 = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ (V)},$$

$$u = \sqrt{(6,6 \cdot 10^{-5})^2 + (1,3 \cdot 10^{-5})^2} = 6,74 \cdot 10^{-5} \text{ (V)},$$

$$U = 2 \cdot 6,74 \cdot 10^{-5} = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ (V)}$$

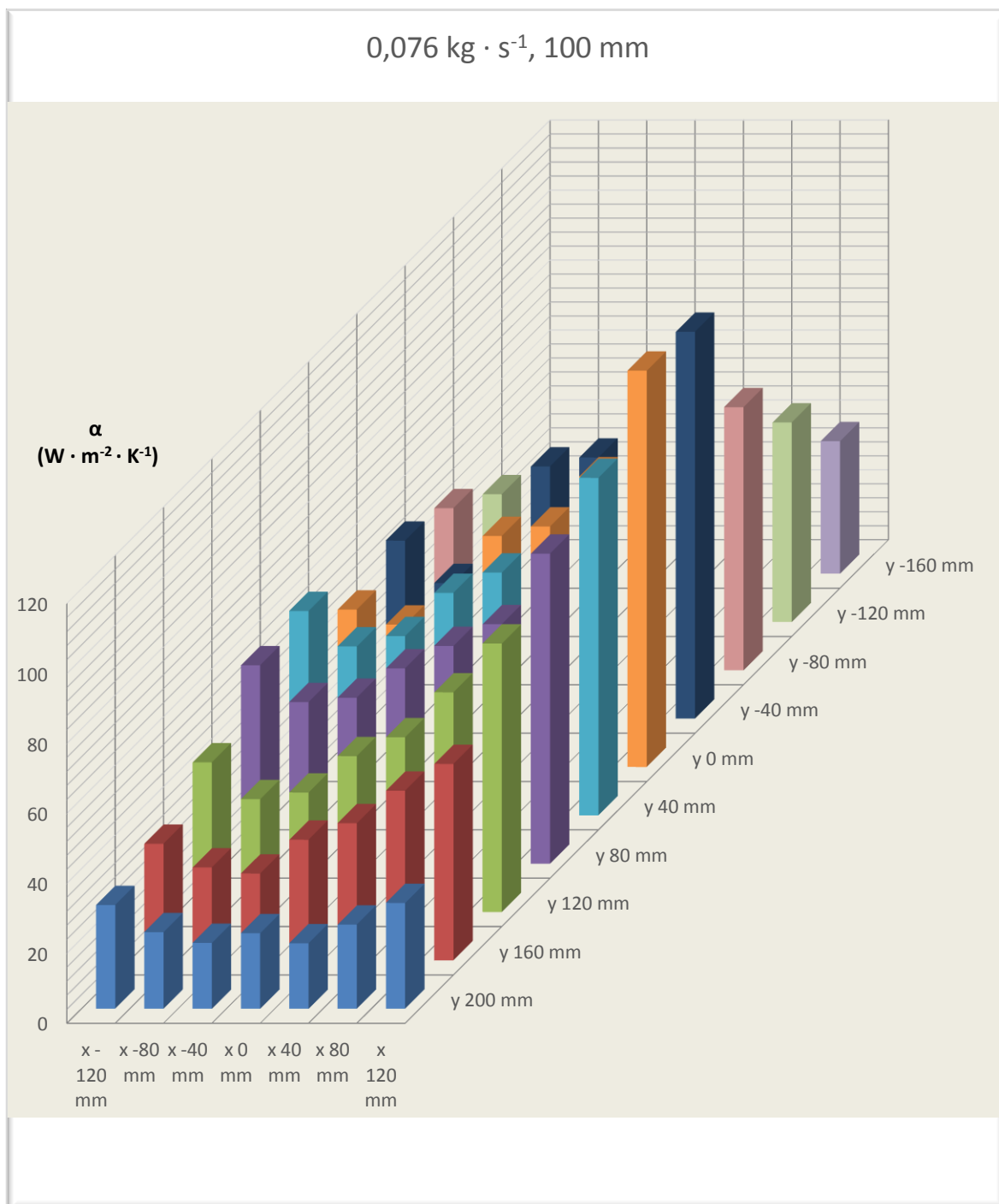
Naměřené napětí je  $1,9 \cdot 10^{-3} \pm 1,35 \cdot 10^{-4}$  (V).

### 3. Výsledky měření

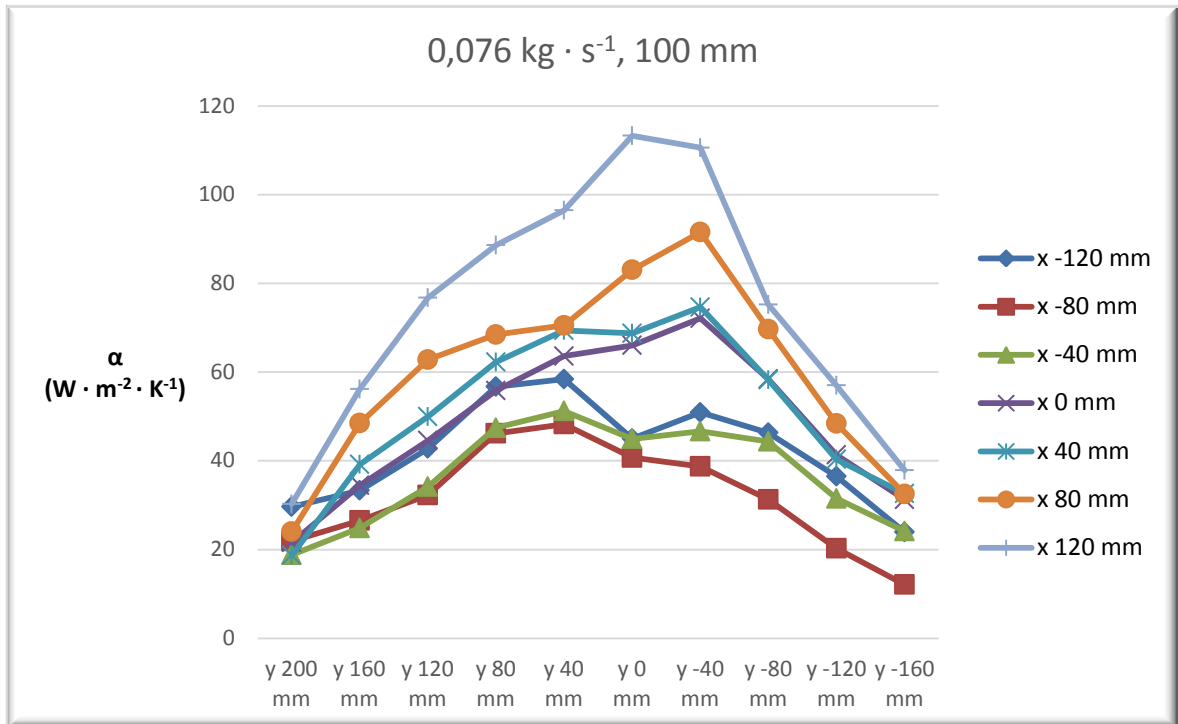
Nejprve bylo provedeno měření celé plochy pro hmotnostní tok vzduchu  $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , což odpovídá rychlosti proudění  $10,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a vzdálenost trysky od měřicí plochy  $100 \text{ mm}$ . Přepočtené naměřené hodnoty jsou zaznamenány v Tabulka 5 a v prostorovém sloupcovém grafu, viz Graf 3 a ve spojnicovém grafu, viz Graf 4 a viz Graf 5.

Tabulka 5 - Přepočtené hodnoty pro hmotnostní tok vzduchu  $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $100 \text{ mm}$  vzdálenost od trysky

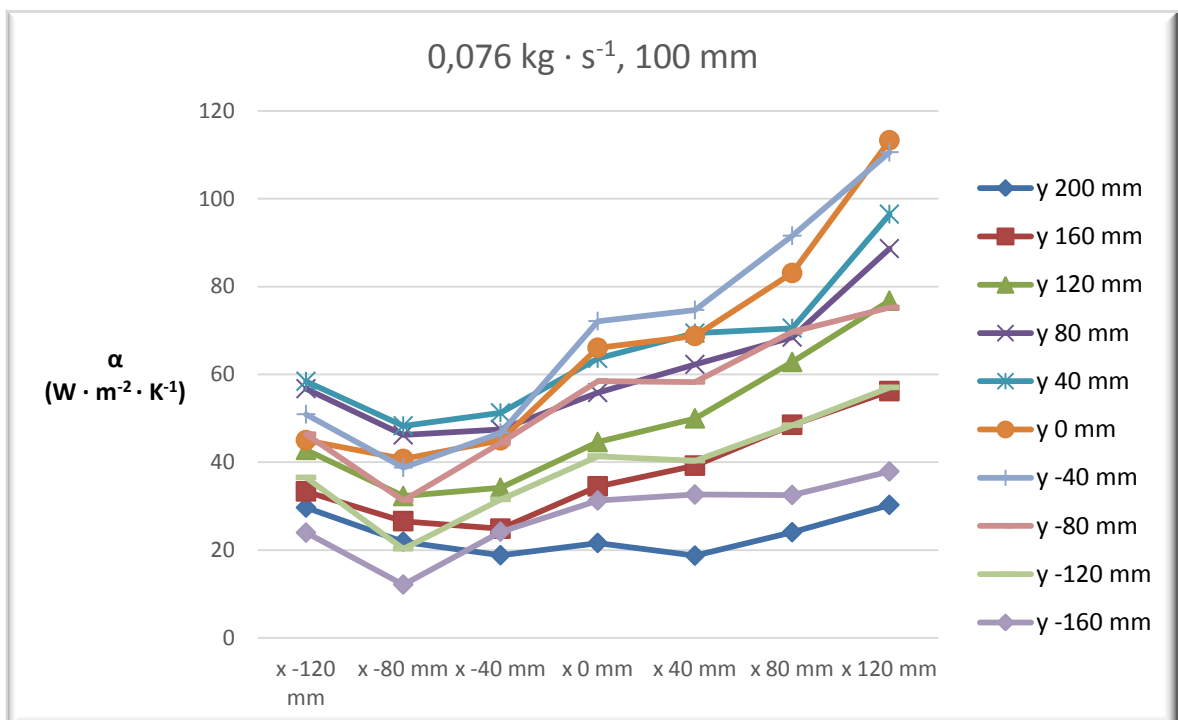
→	x -120 mm	x -80 mm	x -40 mm	x 0 mm	x 40 mm	x 80 mm	x 120 mm
↓	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
y 200 mm	29,64967	21,89911	18,80121	21,58667	18,69992	24,03497	30,25275
y 160 mm	33,34061	26,55839	24,84148	34,48663	39,19963	48,508	56,17341
y 120 mm	42,78816	32,27585	34,17678	44,5825	49,96841	62,81123	76,76749
y 80 mm	56,72661	46,19365	47,44952	55,83524	62,25718	68,46507	88,63256
y 40 mm	58,40917	48,28537	51,24176	63,6083	69,3917	70,52711	96,48573
y 0 mm	44,99952	40,71789	44,97451	66,04204	68,74696	83,07719	113,3045
y -40 mm	50,90455	38,74409	46,67473	72,11991	74,66087	91,5763	110,5956
y -80 mm	46,34016	31,29043	44,37326	58,47271	58,2708	69,67556	75,22646
y -120 mm	36,4988	20,27185	31,50375	41,35218	40,34443	48,41519	57,02127
y -160 mm	23,94361	12,11463	24,15279	31,26295	32,62401	32,50796	37,87017



Graf 3 - Hodnoty součinitele přestupu tepla na měřené ploše – prostorový sloupový graf



Graf 4 – Hodnoty součinitele přestupu tepla na měřené ploše – spojnicový graf – zobrazení spojnic ve směru y



Graf 5 - Hodnoty součinitele přestupu tepla na měřené ploše – spojnicový graf – zobrazení spojnic ve směru x

Z grafů je patrné, že nejvyšší hodnoty součinitele přestupu tepla jsou dosahovány přímo pod tryskou (v řadách  $y$   $-40$  mm až  $y$   $40$  mm). Ve směru  $x$  je dosahována nejvyšší hodnota součinitele přestupu tepla v řadě  $x$   $120$  mm. Což je pod otvorem trysky nejdále od vstupu vzduchu do trysky. Jak je vidět na Obrázek 8 - Experimentální měřicí zařízení. Tento výsledek má dva důvody. První je, že vzduch vstupující do trysky se musí ohýbat o  $90^\circ$  směrem dolů, aby mohl vystoupit ven. U nejbližšího otvoru je poloměr ohnutí proudu vzduchu největší, tudíž tímto otvorem proudí vzduch nesnadněji a nejrychleji. Druhým důvodem je, že na okraji trysky může vzduch měřicí plochu opouštět nejen ve směru  $y$ , ale také ve směru  $x$ . Díky lepšímu odvodu vzduchu jsou hodnoty v krajních  $x$ -ových řadách ( $x$   $120$  mm a  $x$   $-120$  mm) vyšší.

Z prvního měření bylo usouzeno, že nejdůležitější oblast pro měření je ve středu trysky pro hodnoty  $y$   $0$  mm a hodnoty procházející přímo pod štěrbinou a přesně mezi štěrbinami ( $x$   $0$  mm a  $x$   $40$  mm), viz Obrázek 13 - Měření vybrané oblasti. Dále nebudeme uvažovat hodnoty  $y$   $200$  mm a  $y$   $-160$  mm, protože v těchto místech se nenachází celá měřicí deska pod tryskou a na její hraně vzniká překážka v proudění. Což by vedlo k nepřesným výsledkům.

## 4. CFD model

Software počítačové dynamiky tekutin (CFD) umožňuje numerické řešení základních fyzikálních rovnic. Základní fyzikální zákony popisující proudění jsou zákony zachování hmotnosti, hybnosti, tepla případně dalších skalárních veličin. Jsou vyjádřeny Navier-Stokesovými rovnicemi spolu s rovnicí kontinuity. Popisují laminární i turbulentní režim proudění. Řešením těchto rovnic v několika tisících definovaných bodech na výpočtové síti, vytvořené tak, aby se blížila geometrii modelované složky zařízení nebo systému, jsou programy CFD schopny účinně simulovat základní děje, jako je tok tekutin, přenos hmoty a tepla.

Proces numerické simulace sestává z těchto základních kroků.

**Preprocessing** je přípravná fáze numerické simulace. Tento krok sestává ve vykreslení geometrie, její úpravy a zjednodušování. Do tohoto kroku také patří příprava výpočetní sítě.

**Processing** je fáze definování a samotné řešení simulace. V tomto kroku jsou definovány všechny okrajové podmínky a nastaveny veškeré parametry řešení včetně samotného numerického řešení úlohy.

**Postprocessing** je fáze analýzy výsledků simulace. Součástí tohoto kroku je vytváření grafických výstupů (kolorovaných obrázků), získání důležitých parametrů a další podobné kroky.

Co se týče náročnosti je nejzrůsáhlejším krokem preprocessing. V tomto kroku je nutné precizně připravit geometrii, odstranit všechny zanedbatelné entity. Také tvorba výpočtové sítě je jeden ze zásadních kroků, který silně ovlivňuje preciznost a délku výpočtu.

### Geometrický model

Geometrický model byl vytvořen v programu CAD podle dodané trysky s pěti štěrbinovými otvory o šířce 7 mm a délce 177 mm vzdálených 50 mm od sebe, viz Obrázek 7.

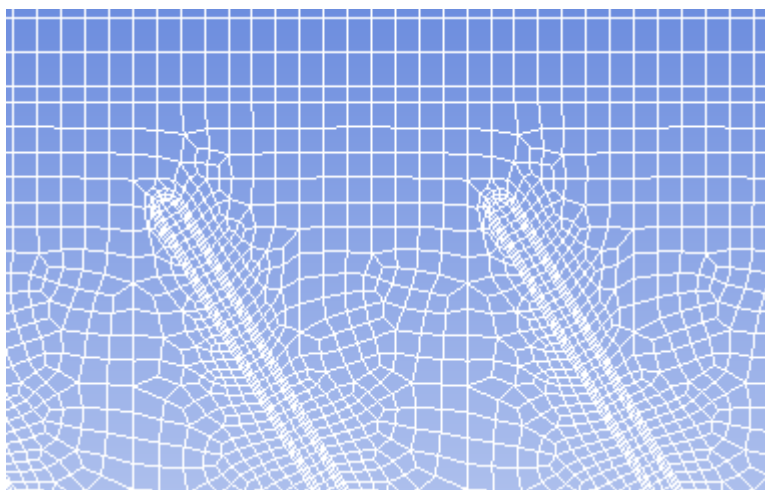
## Tvorba sítě

Sít' představuje systém rozdělení výpočtové oblasti na dílčí na sebe navazující buňky. Lze říci, že výpočtová oblast pokrytá sítí je základem matematického modelování. Neboť samostatný matematický model (systém matematických vztahů) je pouze „pasivním“ nástrojem, který nabývá smyslu až ve chvíli, kdy je aplikován na konkrétní problém (výpočtovou oblast pokrytou sítí).

Počet buněk patří k hlavním limitujícím faktorům současného matematického modelování. U mnohých praktických úloh se počty buněk výpočtové oblasti pohybují v řádu milionů či mnohdy i desítek milionů. Nejsou to zanedbatelná čísla, neboť v každé z buněk je počítáno mnoho různých veličin. Proto je cílem každého řešitele, s ohledem na budoucí čas výpočtu, redukovat počet buněk na nutné minimum.

Použití nestrukturované sítě umožňuje vytvořit hustou sít' pouze v určitých místech. Tím je celkově snížen nárok na výpočetní zdroje, a detailně je možné řešit pouze oblasti, které jsou objektem zájmu.

V programu meshing je načtena geometrie modelu vytvořeného v CAD programu. Pro lepší orientaci a následnou práci se sítí byly pojmenovány jednotlivé plochy geometrie. Pojmenování bylo shodné s názvy okrajových podmínek. Následně byl vybrán prostor, ve kterém proudí vzduch a byla vytvořena sít'.



Obrázek 16 - Detail sítě

## Okrajové podmínky

Okrajové podmínky definují plochy, které ohraničují výpočtovou oblast. Pět základních typů okrajových podmínek:

- Vstupní okrajová podmínka představuje plochu nebo plochy výpočtové oblasti, kterou vstupuje do oblasti tekutina – v modelu použita velocity inlet
- Výstupní okrajová podmínka - představuje plochu nebo plochy výpočtové oblasti, kterou vystupuje z oblasti tekutina – v modelu použita pressure outlet
- Stěnová okrajová podmínka -představuje plochu nebo plochy výpočtové oblasti, které reprezentuje pevný povrch, či plochy, kterými nemůže protékat kapalina. Tyto stěny jsou dokonale nepropustné – v modelu použita wall
- Symetrická okrajová podmínka je zvláštní druh stěnové okrajové podmínky, která je používána jako dělicí rovina v případě, že výpočtová oblast obsahuje jednu nebo více rovin symetrie. V tom případě není nutné řešit celou oblast, ale pouze polovinu či čtvrtinu apod.
- Periodická okrajová podmínka. Tuto podmínku musí vždy tvořit identické plochy v páru.

## Definice výpočetní oblasti

Nastavení modelu

- energy – on
- viscous – SST k- $\omega$ .

Volba materiálu

- fluid – air (pro proudící vzduch)
- solid – aluminium (pro měřicí desku).

Okrajové podmínky

- vstup – rychlost proudění  $10,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , teplota 293K



- výstup – nastavení tlaku 0 Pa
- wall – materiál hliník, teplota 313 K (pro měřicí desku).

referenční hodnoty – tlak, teplota, hustota, kinematická viskozita, rychlost, plocha, délka.

### **Inicializace úlohy**

Každou úlohu je nutné před výpočtem inicializovat, to znamená do výpočtové oblasti definovat počáteční podmínku, která je nezbytná pro spuštění úlohy. Inicializovat je nezbytné všechny počítané veličiny. Pro jednoduché úlohy (naš případ), je možné ponechat automatické inicializace.

### **Výpočet**

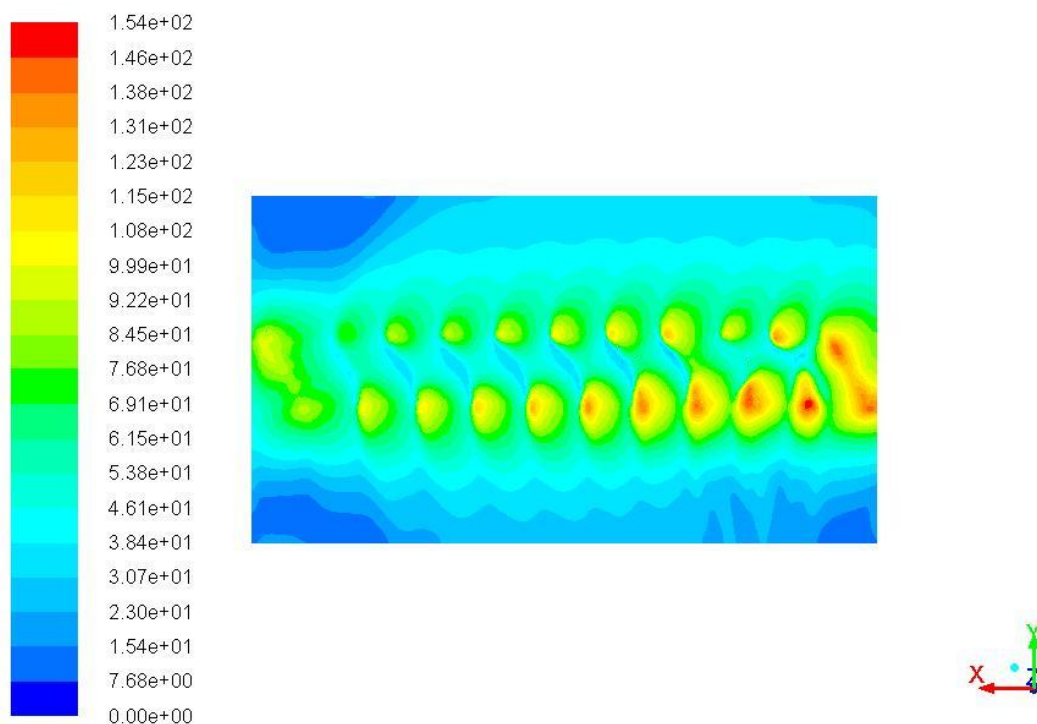
Při simulaci proudění pomocí programu Fluent je velmi důležité získat konvergentní řešení. Mírou konvergence jsou reziduály, které představují maximum rozdílu dvou odpovídajících si veličin ve stejném bodě sítě ve dvou po sobě následujících iteracích. Residuály jsou vyhodnocovány pro všechny počítané veličiny v každém kroku iterace a zobrazovány pro vybrané veličiny. Reziduály lze vyhodnocovat graficky v grafu nebo číselně v tabulce v každém kroku iterace. Snižující se hodnota reziduálu svědčí o dobře konvergující úloze.

### **Zobrazení výsledku**

Pro zobrazení grafického výsledku je třeba zvolit záložku *Graphics and animations* následně vybrat *Contours of wall fluxes* a *Surface Heat transfer coefficient*. Výsledné hodnoty potřebujeme v rovině měřicí desky. Výsledek, viz Obrázek 17, se zobrazí tlačítkem *Display*.

Pro získání hodnoty součinitele přestupu tepla pro porovnání s měřením je třeba nadefinovat si na rovině měřicí desky linie, viz Obrázek 18, ve kterých probíhalo měření. Pro výpis hodnot je třeba zvolit záložku *Plots*, následně vybrat *XY plot*. Zvolit nadefinované linie měření. Hodnoty pro další zpracování lze uložit do textového souboru pomocí *Write to file*.

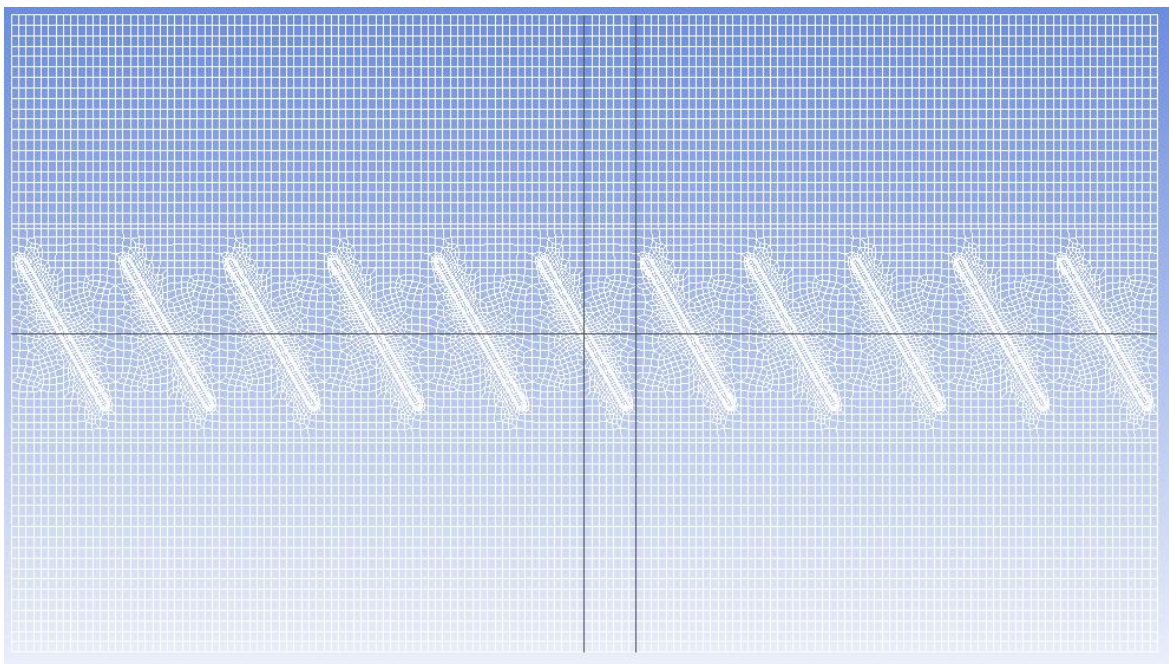
Z hodnot součinitele přestupu tepla v liniích, ve kterých probíhalo měření získaných z programu Ansys Fluent, byl vypočten aritmetický průměr. Jeho hodnota je  $54,34 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ .



Contours of Surface Heat Transfer Coef. (w/m2-k)

May 16, 2015  
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, sstk)

Obrázek 17 - CFD vypočtené hodnoty součinitele přestupu tepla



Obrázek 18 - Linie shodné s měřením

## Závěr

Z naměřených hodnot pro vzdálenosti 50 mm, 100 mm, 150 mm a pro tři různé průtoky vzduchu:  $0,057 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $0,075 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , byla vytvořena tabulka průměrných hodnot součinitele přestupu tepla pro nastavení jednotlivých parametrů viz. Tabulka 6.

Tabulka 6 - Průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla pro dané nastavení parametrů

Z →	50 mm	100 mm	150 mm
↓ m	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
<b>0,0575 <math>\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}</math></b>	64,68675	55,9666	42,37484
<b>0,076 <math>\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}</math></b>	90,15194	56,2087	55,41648
<b>0,1 <math>\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}</math></b>	98,08247	67,72722	66,80811

Díky získaným údajům si můžeme navolit nastavení parametrů (hmotnostní průtoky, vzdálenost trysky od předmětu) pro potřebné chladicí nebo ohřívací výkony.

Naměřené hodnoty pro průtok  $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  a vzdálenost trysky od měřicí plochy 100 mm byly porovnány s CFD výpočtem. Zatímco nejvyšší naměřená hodnota součinitele přestupu tepla byla  $113,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , pomocí metody CFD jsme dospěli k hodnotě  $154 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Tento rozdíl byl zapříčiněn rozměrem měřicí sondy ( $35,1 \text{ mm} \cdot 28,5 \text{ mm}$ ), jelikož naměřené hodnoty se na této ploše průměrují. Zatímco metoda CFD zobrazuje hodnoty v bodech. Pokud budeme uvažovat průměrné hodnoty na celé měřené ploše, vyšla metoda CFD srovnatelně s naměřenými hodnotami (měření  $56,21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , CFD  $54,34 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Vzhledem k malým rozdílům hodnot měření oproti hodnotám získaným metodou CFD, můžeme tímto způsobem získávat hodnoty součinitele přestupu tepla pro další nastavení parametrů.

## Seznam použité literatury

1. Ansys\_help. *VirginiaTech* [online]. 2013 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: [http://www.arc.vt.edu/ansys\\_help/flu\\_tg/flu\\_tg.html](http://www.arc.vt.edu/ansys_help/flu_tg/flu_tg.html)
2. BEHNIA, M., S. PARNEIX a P. DURBIN. *Accurate modeling of impinging jet heat transfer* [online]. 1997 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://ctr.stanford.edu/ResBriefs97/behnia.pdf>
3. BLEJCHAŘ, Tomáš. *Turbulence Modelování proudění - CFX* [online]. 2010 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: [http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence\\_ESF\\_v4.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence_ESF_v4.pdf)
4. DEWETRON: DEWE-5000. *Power-Technology* [online]. 2015 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.power-technology.com/products/dewe-5000/>
5. GUSNAROVÁ, Hana. *Sušení mokřých povrchů vzduchovými proudy* [online]. Brno, 2010 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28784](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28784).  
Diplomová práce
6. HO, CHIH-MING a Nagy NOSSEIR. *Dynamics of an impinging jet. Part 1. The feedback phenomenon* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: [http://ho.seas.ucla.edu/wp-content/uploads/2011/04/Dynamics\\_of\\_an\\_Impinging\\_Jet\\_Part1\\_JFM\\_1981.pdf](http://ho.seas.ucla.edu/wp-content/uploads/2011/04/Dynamics_of_an_Impinging_Jet_Part1_JFM_1981.pdf)
7. CHUNG, Y.M., K.H. LUO a N.D. SANDHAM. *Numerical study of momentum and heat transfer in unsteady impinging jets* [online]. 2002 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: [http://www.eng.warwick.ac.uk/staff/ymc/Publications/Chung\\_etal2002-IJHFF.pdf](http://www.eng.warwick.ac.uk/staff/ymc/Publications/Chung_etal2002-IJHFF.pdf)
8. KAVIANY, Massoud. *Principles of heat transfer*. New York: John Wiley & Sons, 2002. ISBN 0-471-43463-9.
9. KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX* [online]. 1. vydání. Ostrava, 2008 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>

10. *Měřicí přístroje: Anemometry* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.eu/Anemometry/Vtulkovy-anemometr-testo-416>
11. MICHEJEV, M.A. *Základy sdílení tepla*. Praha: Průmyslové nakladatelství, 1952.
12. *Nejistoty měření a zpracování výsledků* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <https://vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/uhrovah/docs/kapitola4.pdf>
13. O'DONOVAN, a MURRAY. *Jet impingement heat transfer – Part I: Mean and root-mean-square heat transfer and velocity distributions* [online]. 2007 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://home.eps.hw.ac.uk/~tso1/Papers/307.pdf>
14. O'DONOVAN, Tadhg. *FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER OF AN IMPINGING AIR JET* [online]. 2005 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://home.eps.hw.ac.uk/~tso1/Thesis.pdf>
15. Počítačová dynamika tekutin. *Chemagazín* [online]. 2009, (2) [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: [http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin\\_2010/file/chxix\\_2\\_cl6.pdf](http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin_2010/file/chxix_2_cl6.pdf)
16. SAZIMA, Miroslav. *Sdílení tepla*. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1982.
17. SONNTAG, Richard, Claus BORGNAKKE a Gordon WYLEN. *Fundamentals of Thermodynamics*. Danvers: John Wiley & Sons, 2003. ISBN 0-471-15232-3.
18. STŘEDA, Ivo, Miroslav SAZIMA a Jiří DOUBRAVA. *Termomechanika*. 3. vydání. Praha: České vysoké učení v Praze, 1992.
19. ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. 3. vydání. Praha: České vysoké učení technické, 2004. ISBN 80-01-02933-6.
20. TESAŘ, Václav. *Pressure-Driven Microfluidics*. Norwood: Artech House, 2007. ISBN 1-59693-134-5.
21. *VSCHT* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: [https://vscht.cz/uchi/ped/hydoteplo/materialy/obtekani\\_teles.pdf](https://vscht.cz/uchi/ped/hydoteplo/materialy/obtekani_teles.pdf)
22. VUT [online]. [cit. 2014-09-23]. Dostupné z: [http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/17\\_Konvekce.pdf](http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/17_Konvekce.pdf)

23. ZÁCHA, Pavel. *Turbulentní proudění* [online]. 2011 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z:  
<http://energetika.cvut.cz/files/FLUENT%20-%20prednaska%203%20Zacha%20%28LS%202014%29.pdf>
24. ZUCKERMAN, N. a N. LIOR. *Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, and Numerical Modeling* [online]. 2006 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z:  
<http://www.seas.upenn.edu/~lior/lior%20papers/Jet%20Impingement%20Heat%20Transfer%20Ch06-P020039.pdf>

## Seznam příloh

Příloha A	– Tabulky naměřených hodnot .....	65
Příloha B	– Spojnicové grafy naměřených hodnot – zobrazení ve směru y.....	69
Příloha C	– Spojnicové grafy naměřených hodnot – zobrazení ve směru x.....	74
Příloha D	– Prostorový sloupový graf .....	79



## Příloha A – Tabulky naměřených hodnot

Tabulka 7 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,0575 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

→	x -120 mm	x -80 mm	x -40 mm	x 0 mm	x 40 mm	x 80 mm	x 120 mm
↓	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
y 160 mm				1,488678	31,33383		
y 120 mm				30,99101	65,57876		
y 80 mm				56,13271	93,343		
y 40 mm				59,0317	98,51034		
y 0 mm				73,11437	91,93789		
y -40 mm				86,60662	150,2193		
y -80 mm				57,87531	73,04771		
y -120 mm				29,4529	36,32386		
y 0 mm	45,44802	46,56379	47,72069	63,78601	66,63727	64,11863	91,55801

Tabulka 8 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

→	x -120 mm	x -80 mm	x -40 mm	x 0 mm	x 40 mm	x 80 mm	x 120 mm
↓	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
y 160 mm				21,97302	50,88251		
y 120 mm				60,40144	83,04288		
y 80 mm				93,24365	110,7049		
y 40 mm				95,00769	112,9028		
y 0 mm				110,8918	113,6587		
y -40 mm				126,0897	170,0149		
y -80 mm				94,48907	90,16648		
y -120 mm				59,47411	49,48741		
y 0 mm	81,02501	83,85268	82,65947	98,88207	103,9156	98,32285	129,8895

Tabulka 9 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu  
 $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

→	x -120 mm	x -80 mm	x -40 mm	x 0 mm	x 40 mm	x 80 mm	x 120 mm
↓	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$
y 160 mm				24,64951	55,268		
y 120 mm				68,10748	88,15024		
y 80 mm				100,1562	118,1141		
y 40 mm				106,586	128,5507		
y 0 mm				122,9024	121,8337		
y -40 mm				133,1859	188,8919		
y -80 mm				101,3558	96,31971		
y -120 mm				62,78703	52,46089		
y 0 mm	91,97777	98,10859	95,68773	115,8287	119,822	115,7143	149,328

Tabulka 10 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu  
 $0,0575 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

→	x -120 mm	x -80 mm	x -40 mm	x 0 mm	x 40 mm	x 80 mm	x 120 mm
↓	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$
y 160 mm				38,84971	41,00317		
y 120 mm				43,71851	47,72319		
y 80 mm				57,58125	58,42335		
y 40 mm				67,73686	67,0696		
y 0 mm				65,69893	67,15182		
y -40 mm				74,45646	66,3654		
y -80 mm				62,14368	53,59828		
y -120 mm				44,60735	39,33806		
y 0 mm	49,91826	55,35429	61,17962	61,81407	62,71614	75,08898	96,9426

Tabulka 11 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

→	x -120 mm	x -80 mm	x -40 mm	x 0 mm	x 40 mm	x 80 mm	x 120 mm
↓	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
y 160 mm	33,34061	26,55839	24,84148	34,48663	39,19963	48,508	56,17341
y 120 mm	42,78816	32,27585	34,17678	44,5825	49,96841	62,81123	76,76749
y 80 mm	56,72661	46,19365	47,44952	55,83524	62,25718	68,46507	88,63256
y 40 mm	58,40917	48,28537	51,24176	63,6083	69,3917	70,52711	96,48573
y 0 mm	44,99952	40,71789	44,97451	66,04204	68,74696	83,07719	113,3045
y -40 mm	50,90455	38,74409	46,67473	72,11991	74,66087	91,5763	110,5956
y -80 mm	46,34016	31,29043	44,37326	58,47271	58,2708	69,67556	75,22646
y -120 mm	36,4988	20,27185	31,50375	41,35218	40,34443	48,41519	57,02127

Tabulka 12 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

→	x -120 mm	x -80 mm	x -40 mm	x 0 mm	x 40 mm	x 80 mm	x 120 mm
↓	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
y 160 mm				24,64951	55,268		
y 120 mm				68,10748	88,15024		
y 80 mm				100,1562	118,1141		
y 40 mm				106,586	128,5507		
y 0 mm				122,9024	121,8337		
y -40 mm				133,1859	188,8919		
y -80 mm				101,3558	96,31971		
y -120 mm				62,78703	52,46089		
y 0 mm	91,97777	98,10859	95,68773	115,8287	119,822	115,7143	149,328

Tabulka 13 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,0575 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

→	x -120 mm	x -80 mm	x -40 mm	x 0 mm	x 40 mm	x 80 mm	x 120 mm
↓	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
y 160 mm				30,80774	38,82409		
y 120 mm				34,36579	43,06562		
y 80 mm				38,39024	47,53932		
y 40 mm				44,19582	54,22584		
y 0 mm				45,00926	56,81339		
y -40 mm				43,82146	52,45777		
y -80 mm				36,66246	43,23777		
y -120 mm				30,3589	38,22202		
y 0 mm	38,40996	39,73851	44,95607	45,40982	51,78504	62,50209	67,1758

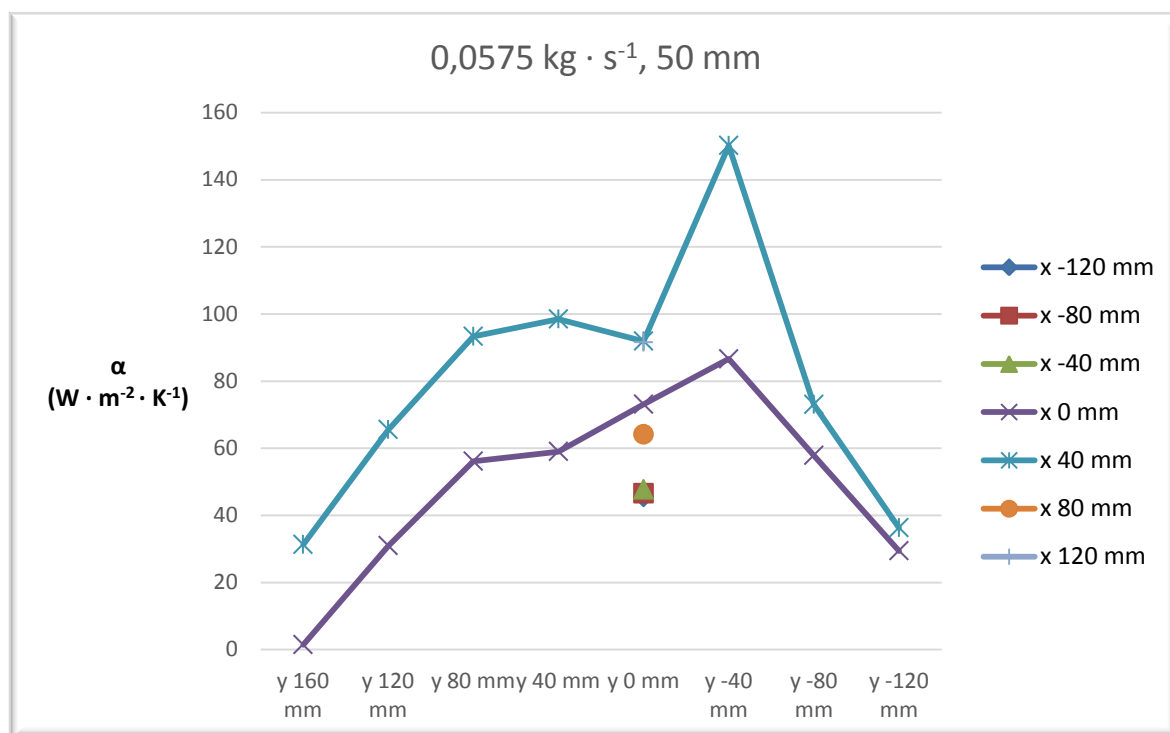
Tabulka 14 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu  
 $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

→	x -120 mm	x -80 mm	x -40 mm	x 0 mm	x 40 mm	x 80 mm	x 120 mm
↓	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$
y 160 mm				50,64796	44,08986		
y 120 mm				45,73431	55,05186		
y 80 mm				50,97299	60,80938		
y 40 mm				65,41627	62,38294		
y 0 mm				69,11415	66,57505		
y -40 mm				57,13446	59,54086		
y -80 mm				53,31029	54,98683		
y -120 mm				44,84711	46,04933		
y 0 mm	54,8018	56,80619	61,07598	61,16688	69,07267	84,68397	92,75955

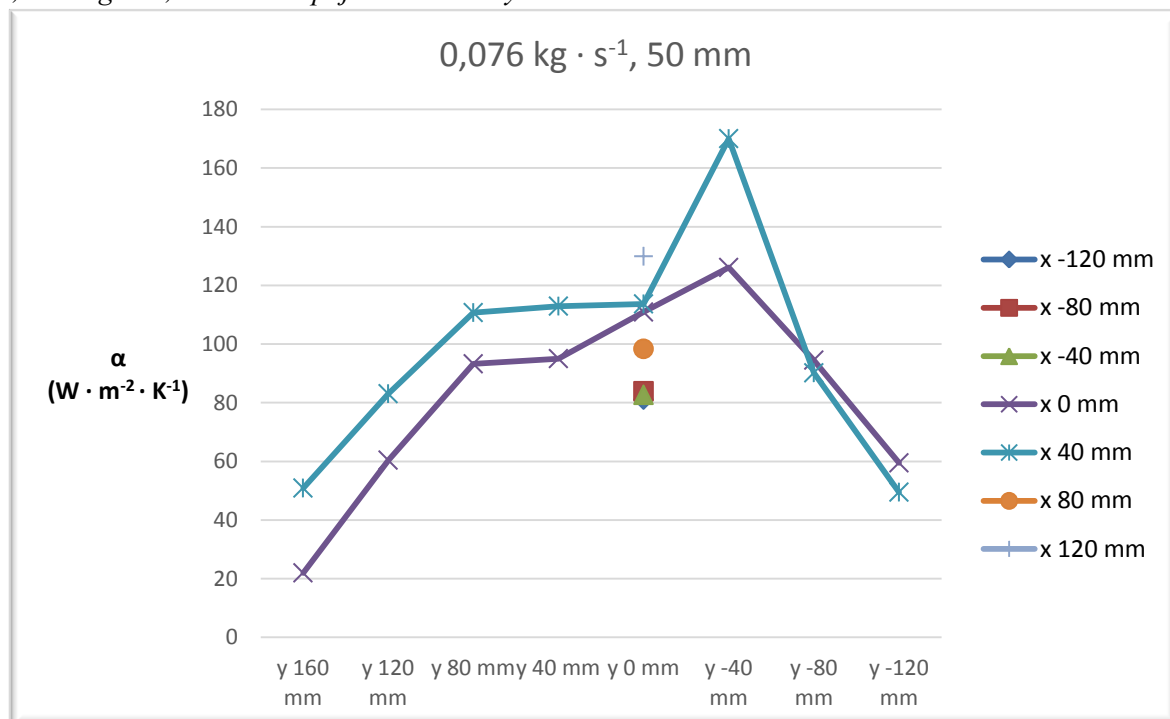
Tabulka 15 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu  
 $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

→	x -120 mm	x -80 mm	x -40 mm	x 0 mm	x 40 mm	x 80 mm	x 120 mm
↓	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$	$\frac{\alpha}{(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}$
y 160 mm				53,55153	54,02995		
y 120 mm				59,59491	62,52571		
y 80 mm				65,46347	68,81624		
y 40 mm				71,46554	82,01914		
y 0 mm				73,56793	84,01176		
y -40 mm				71,39311	78,39457		
y -80 mm				63,32657	70,9205		
y -120 mm				54,73719	55,1116		
y 0 mm	69,17912	66,91392	77,90714	76,1915	81,14753	95,26655	107,7176

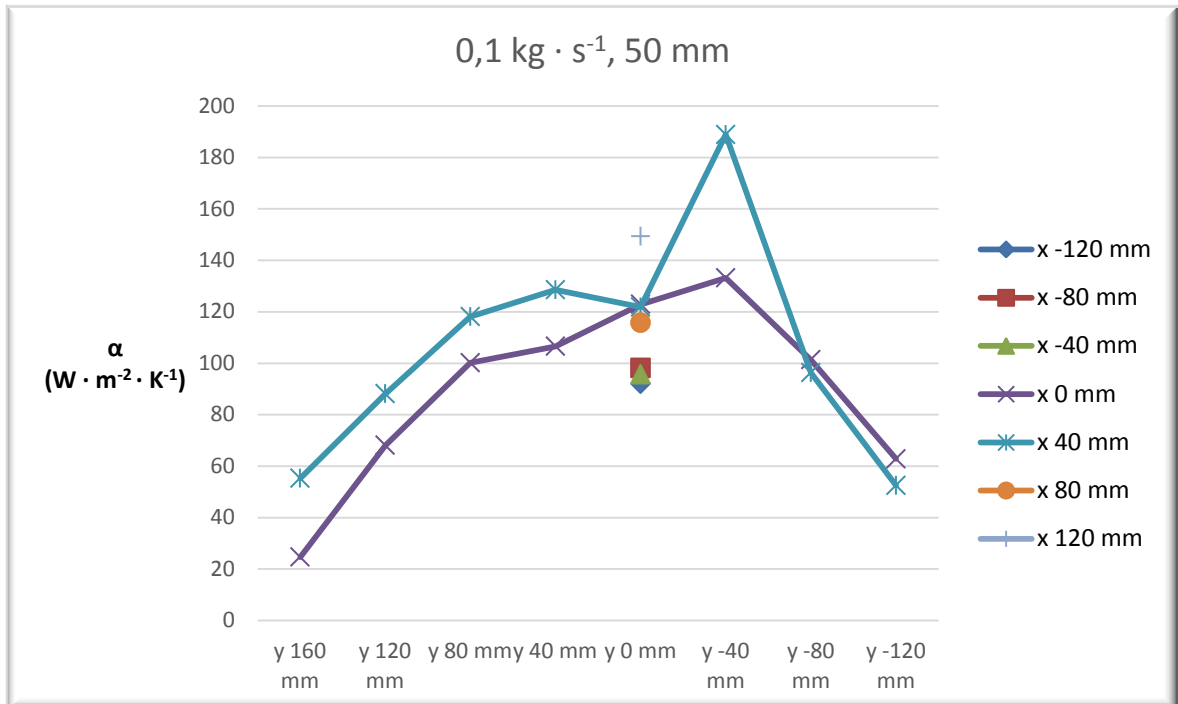
**Příloha B – Spojnicové grafy naměřených hodnot – zobrazení ve směru y**



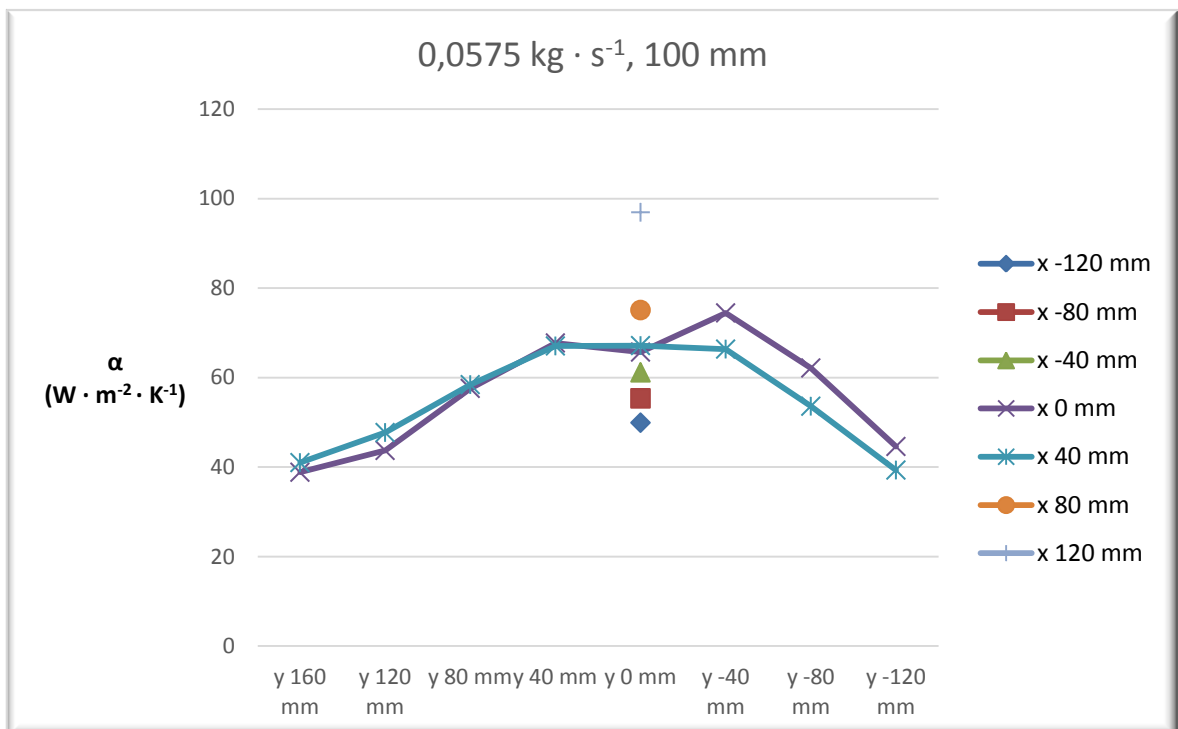
Graf 6 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,0575 kg · s<sup>-1</sup>, zobrazení spojnic ve směru y



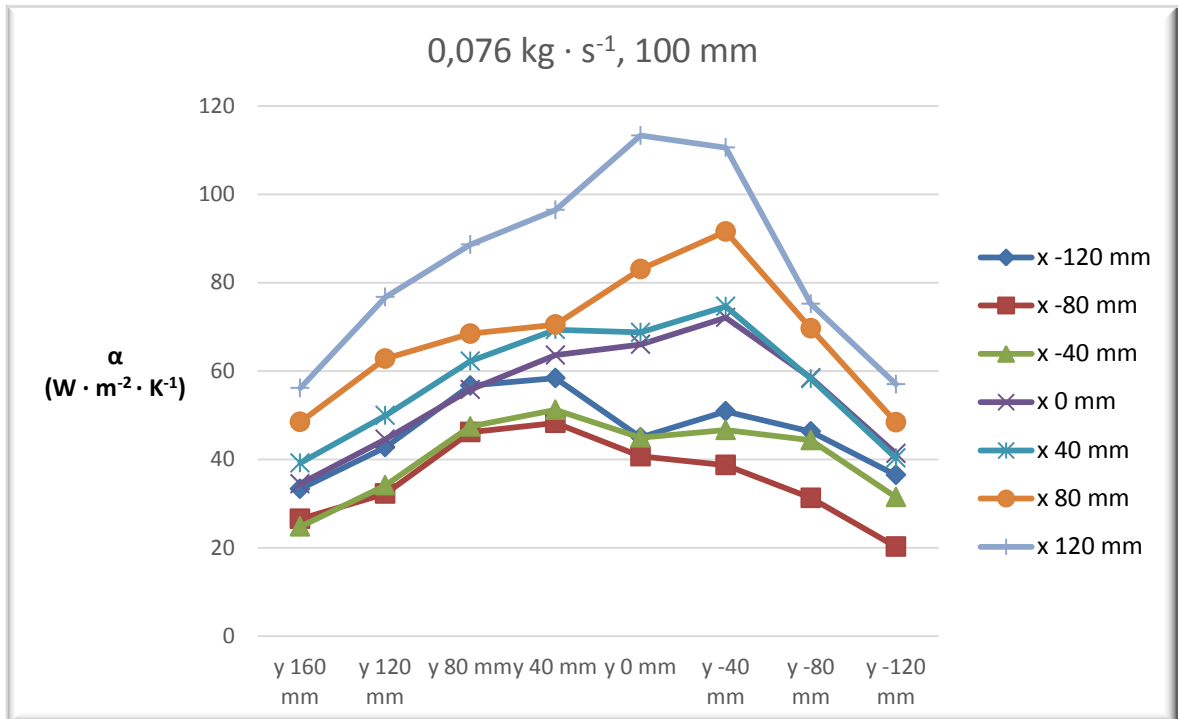
Graf 7 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,076 kg · s<sup>-1</sup>, zobrazení spojnic ve směru y



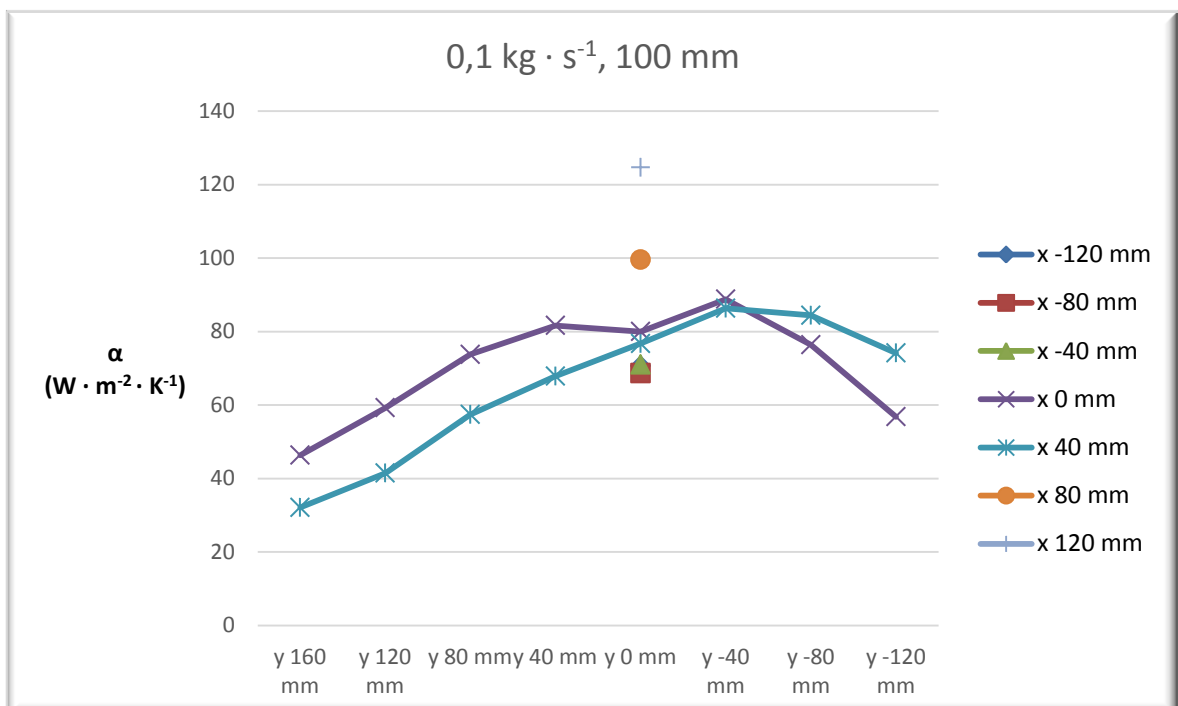
Graf 8 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojnic ve směru  $y$



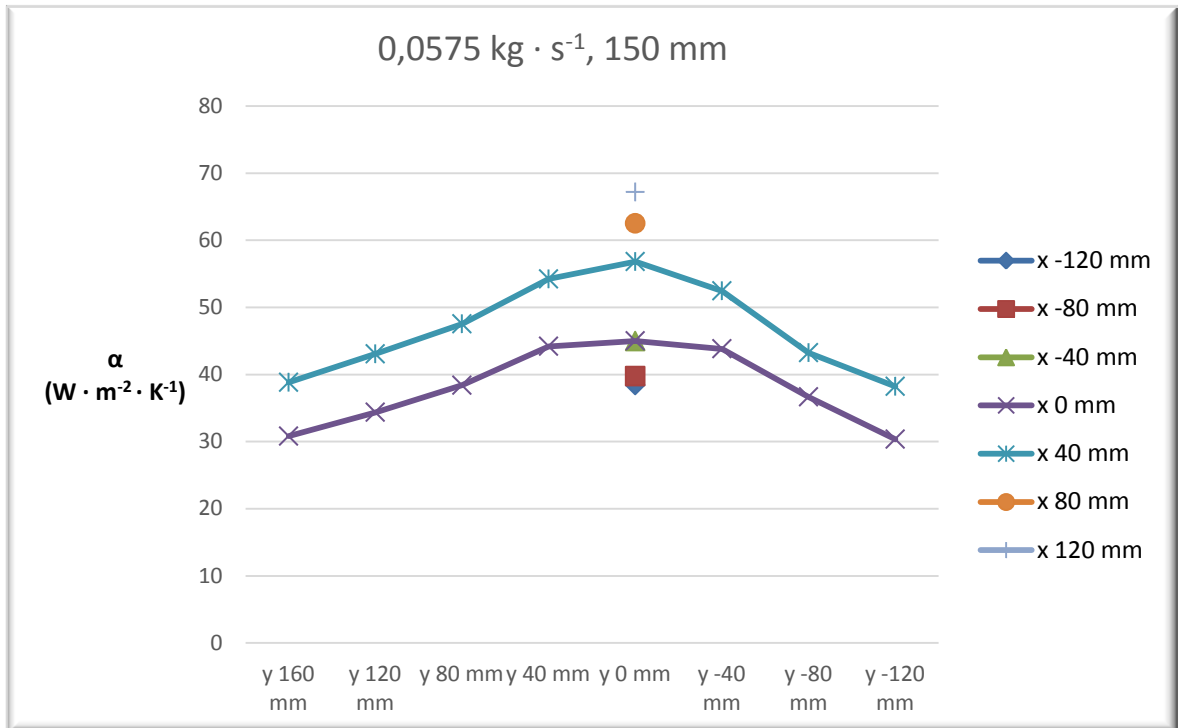
Graf 9 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,0575 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojnic ve směru  $y$



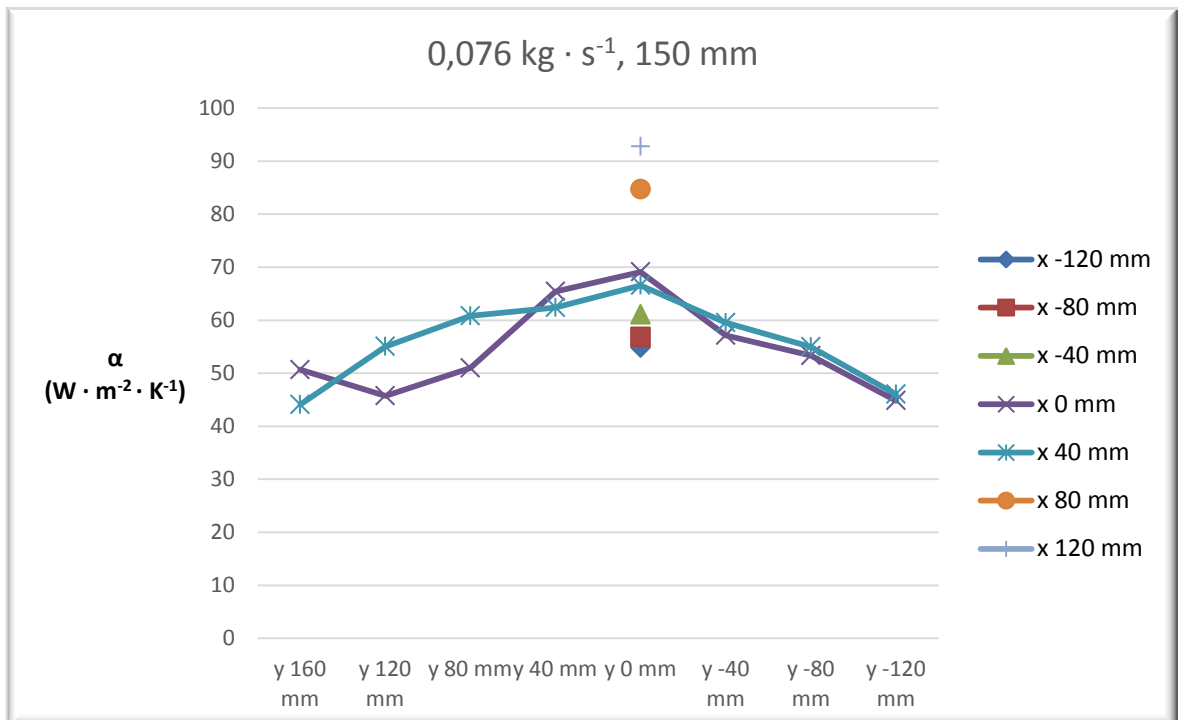
Graf 10 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojnic ve směru y



Graf 11 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojnic ve směru y

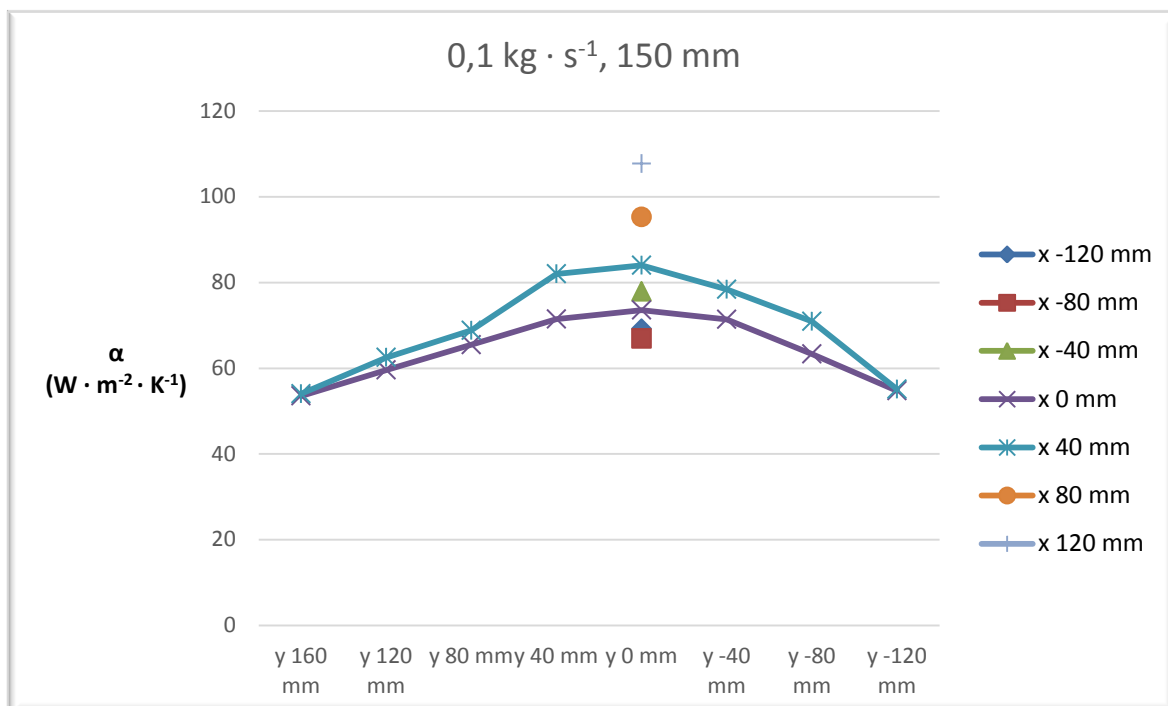


Graf 12 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,0575 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojnic ve směru y



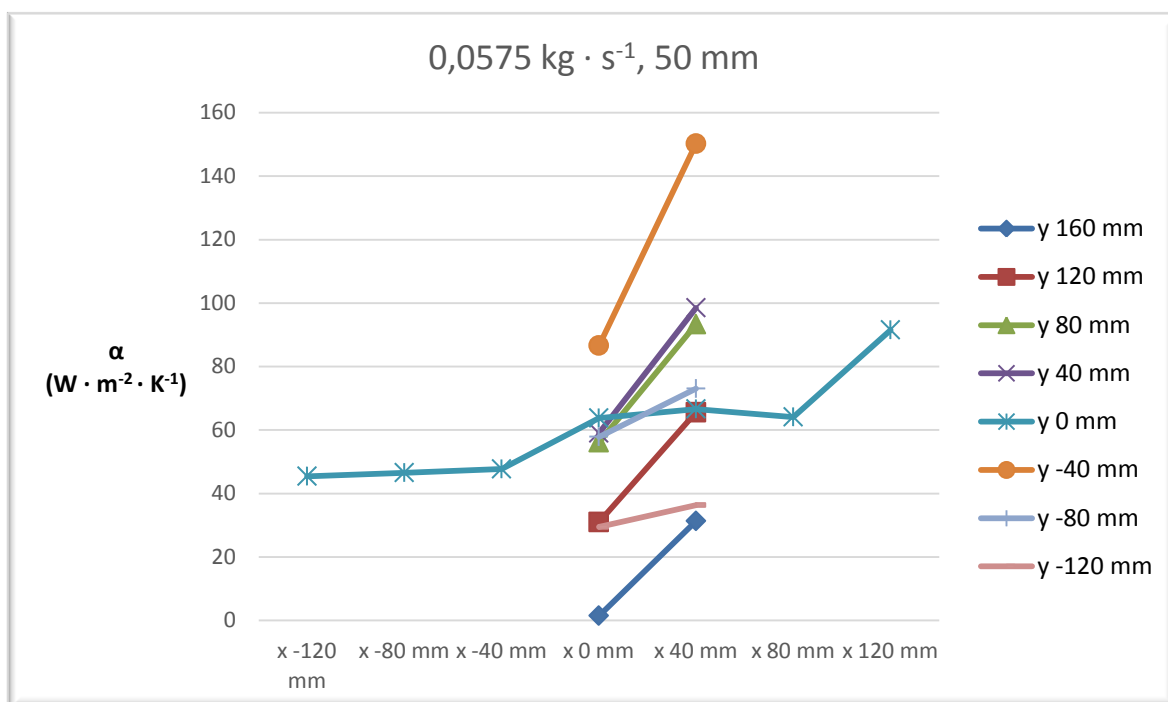
Graf 13 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojnic ve směru y



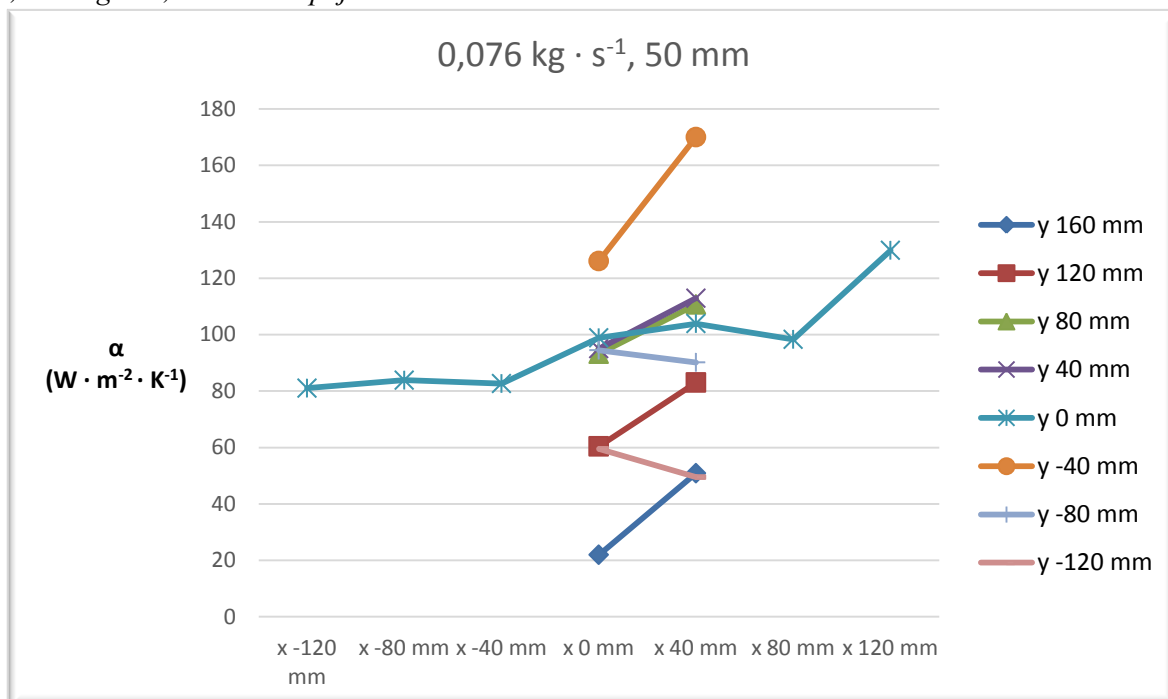


Graf 14 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojnic ve směru y

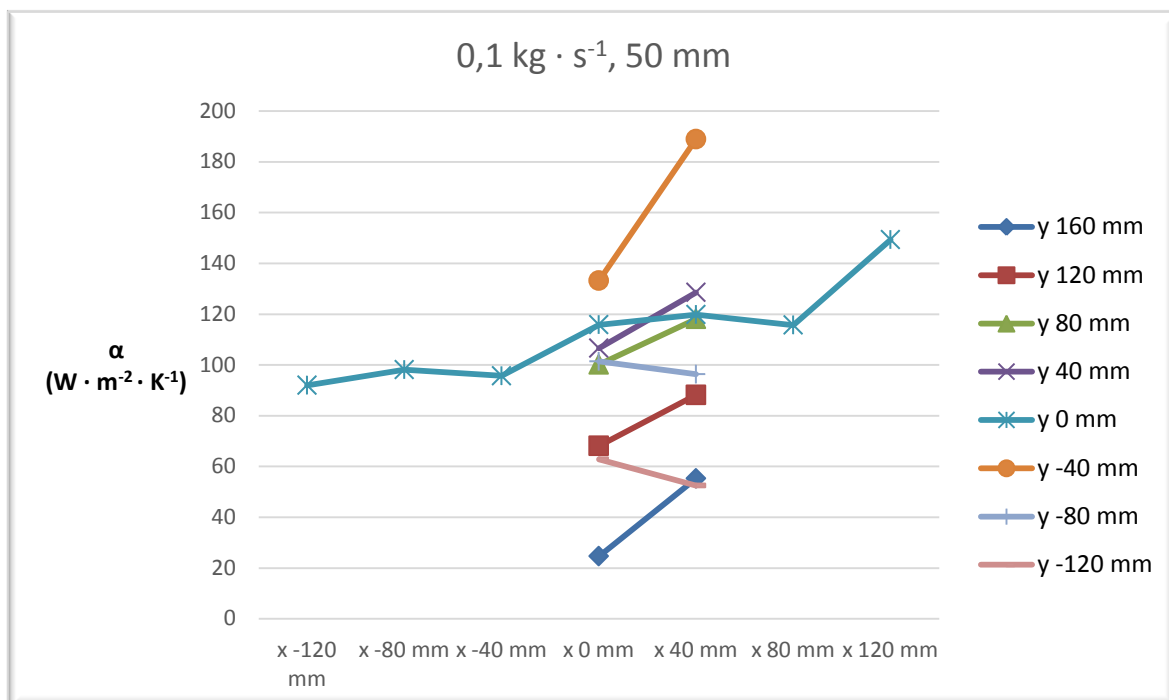
**Příloha C – Spojnicové grafy naměřených hodnot – zobrazení ve směru x**



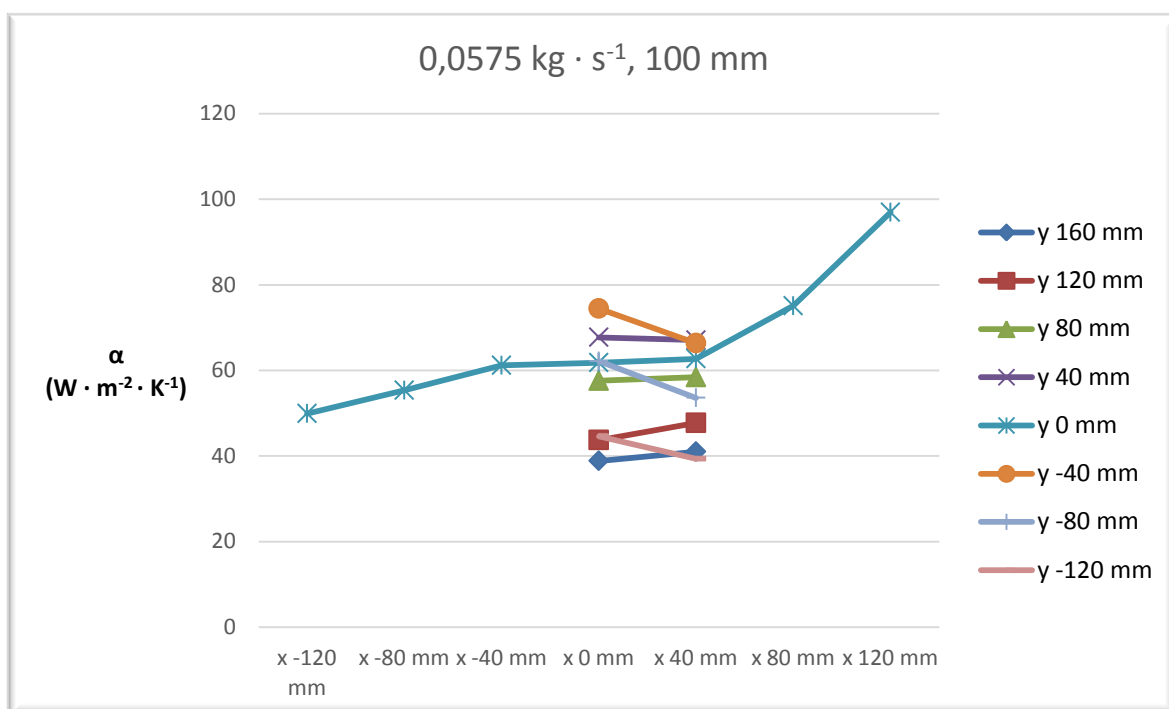
Graf 15 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,0575 kg · s<sup>-1</sup>, zobrazení spojnic ve směru x



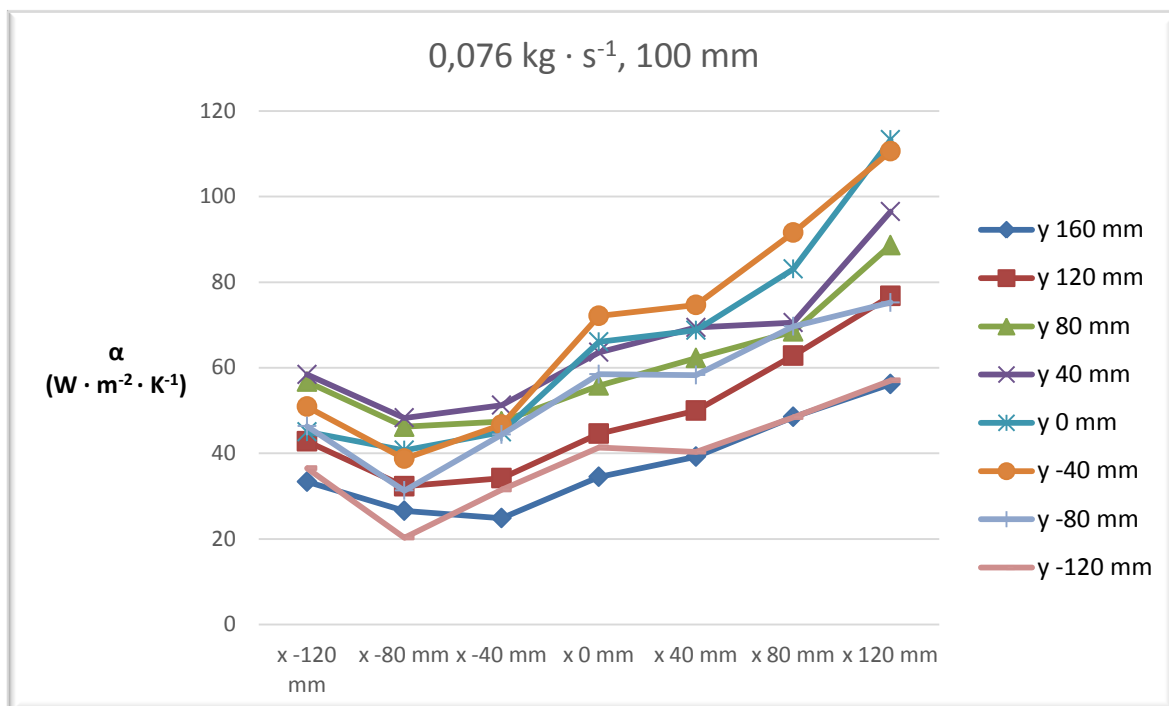
Graf 16 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu 0,076 kg · s<sup>-1</sup>, zobrazení spojnic ve směru x



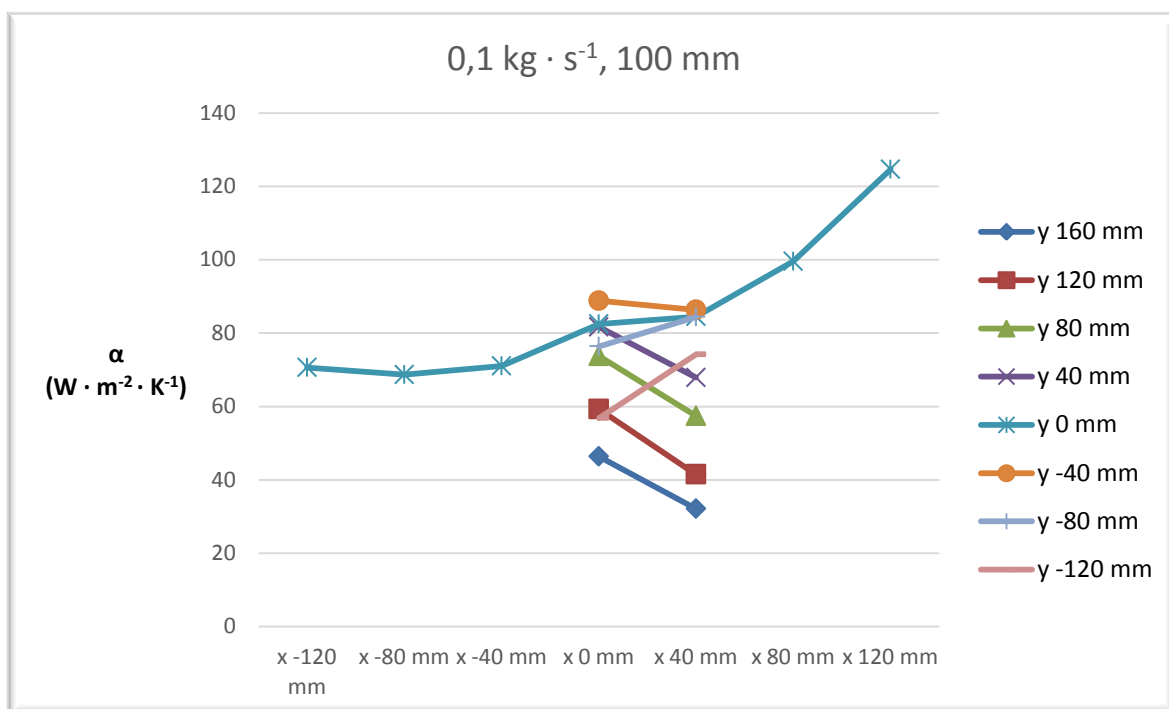
Graf 17 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 50 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojnic ve směru  $x$



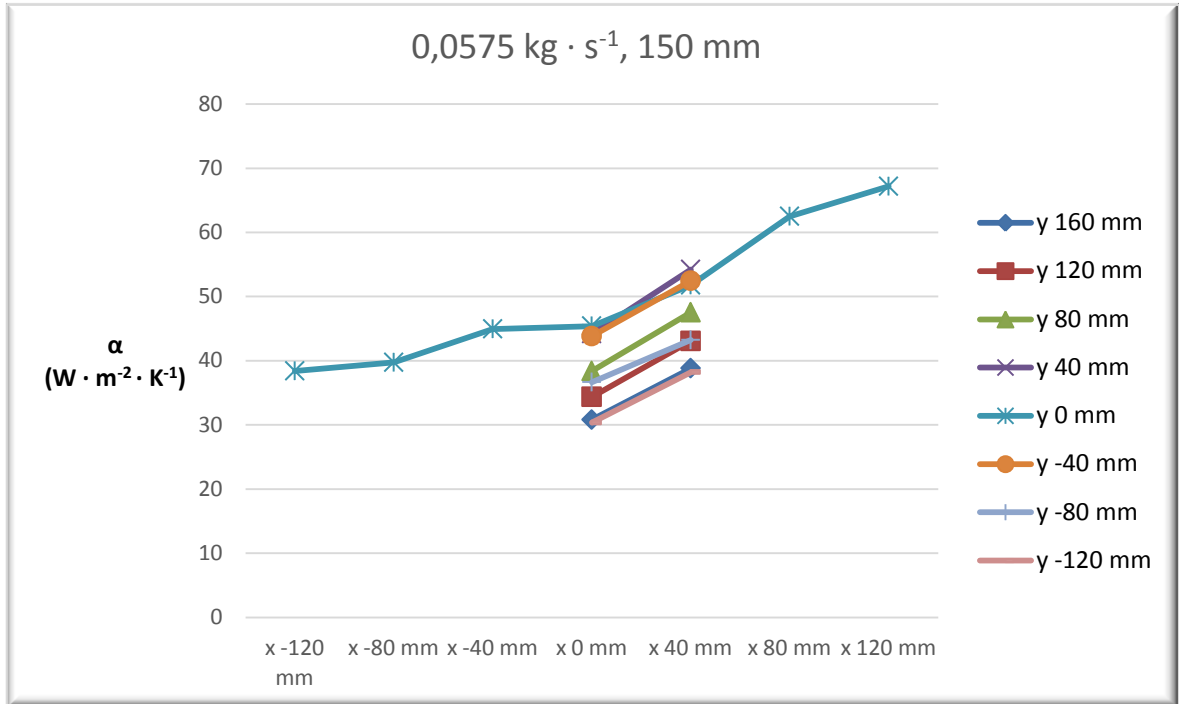
Graf 18 - naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,0575 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojnic ve směru  $x$



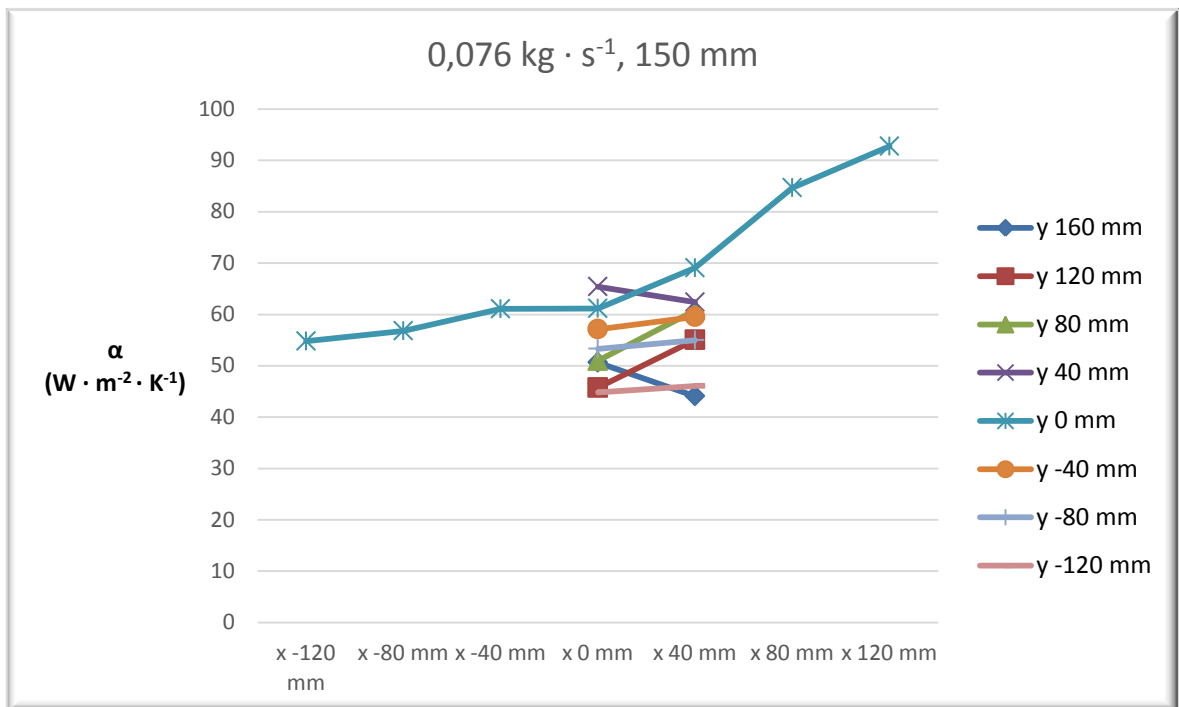
Graf 19 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojníc ve směru  $x$



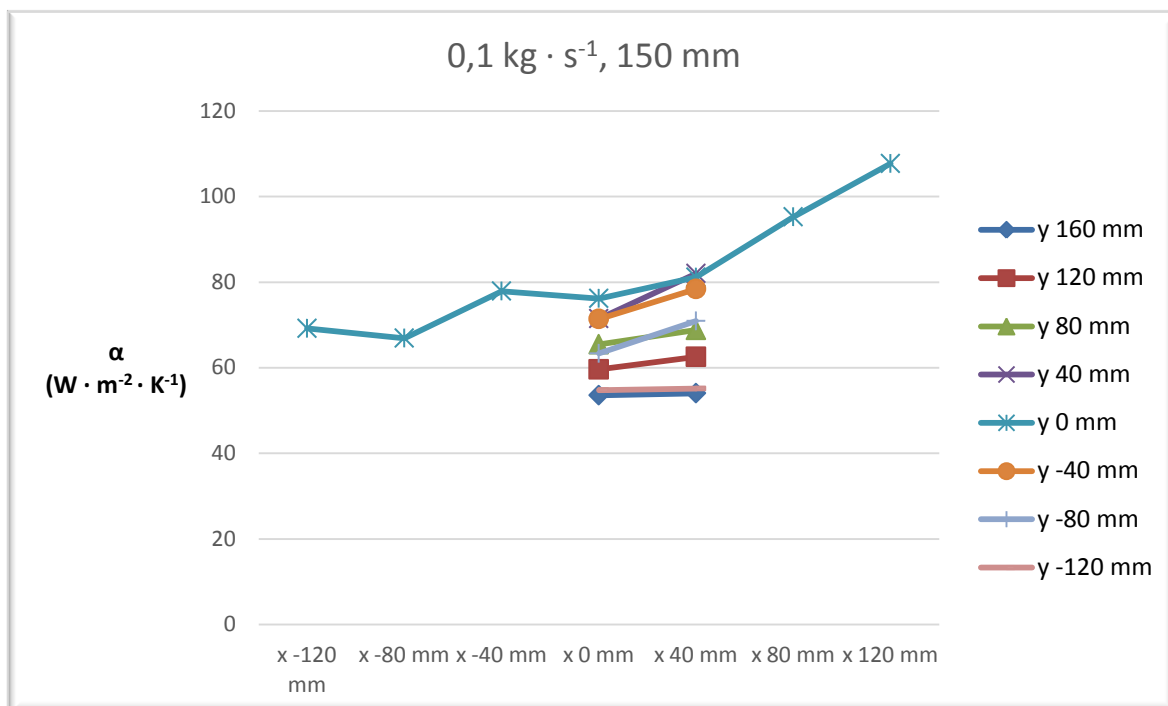
Graf 20 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojníc ve směru  $x$



Graf 21 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,0575 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojnic ve směru  $x$

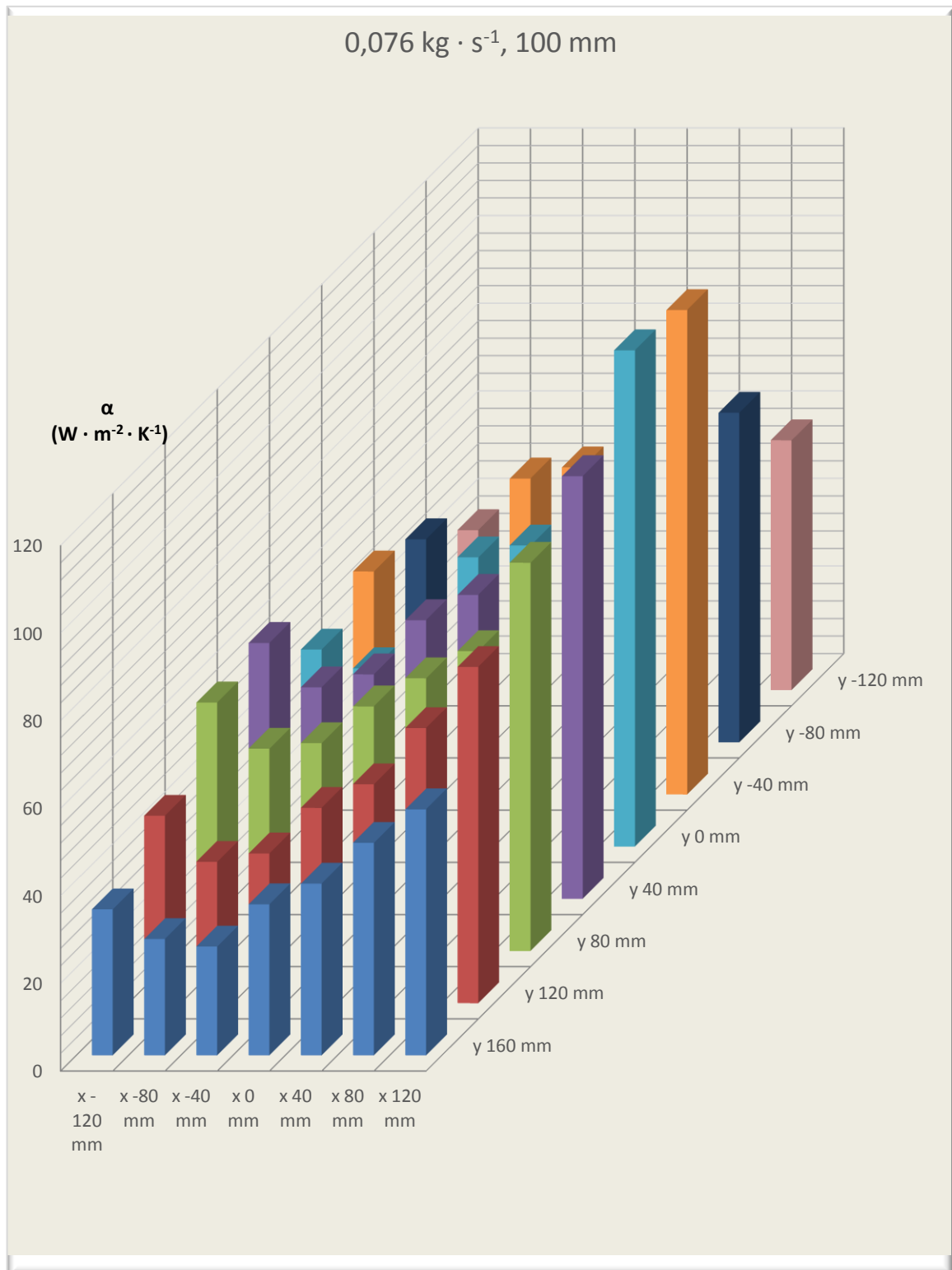


Graf 22 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojnic ve směru  $x$



Graf 23 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 150 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení spojnic ve směru x

## Příloha D – Prostorový sloupový graf



Graf 24 - Naměřené hodnoty ve vzdálenosti 100 mm při hmotnostním toku vzduchu  $0,076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , zobrazení v prostorovém sloupovém grafu