

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Katedra energetických zařízení



Petr Jonáš

Sdílení tepla v horizontálně orientované vzduchové dutině
(Heat transfer in horizontally oriented air enclosure)

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaroslav Šulc, CSc.

Konzultant bakalářské práce:

Rozsah práce:	54 stran
Počet stran:	54
Počet obrázků:	7
Počet tabulek:	36
Počet grafů:	16
Počet příloh:	0

Liberec 2009

Anotace

V této práci byly zjišťovány tepelně izolační vlastnosti izolačního materiálu styrofoam ve spojení s horizontálně orientovanou vzduchovou dutinou. Dále byly vyšetřovány jevy, jež s tímto procesem souvisí. Hodnoty naměřené přístrojem Lambda HFM 436/1E byly ověřeny numerickými výpočty.

Annotation

The main point of this thesis was to investigate thermal-insulating characteristics of material styrofoam along with horizontally oriented air enclosure. Heat transfer mechanisms participating in heat transfer in air enclosure were considered. Experimentally determined results obtained by Lambda HFM 436/1E measuring device were compared with analytically determined results.

Poděkování

Chtěl bych na tomto místě co nejsrdečněji poděkovat doc. Ing. Jaroslavovi Šulcovi, CSc. za odborné vedení a podnětné připomínky při zpracování předkládané bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za jejich podporu a pomoc při mém studiu.

Klíčová slova

Sdílení tepla

Horizontálně orientovaná vzduchová vrstva

Vedení

Sálení

Proudění

Emisivita

View faktor

Key words

Heat transfer

Horizontally oriented air enclosure

Conduction

Radiation

Convection

Emissivity

View faktor

Prohlášení

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

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

Užiji-li bakalářskou 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.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

Signature

Obsah

1	Úvod	11
2	Lambda HFM 436/1E.....	12
2.1	Princip a postup měření	12
3	Vedení tepla.....	16
4	Měření.....	18
4.1	Styrofoamová deska	20
4.2	Vzduchová dutina.....	21
4.3	Celkový součinitel sdílení tepla.....	24
4.4	Sálání	29
4.4.1	Ověření velikosti vlivu sálání na proces sdílení tepla	33
	Vliv emisivity na tepelný tok při sálání.....	33
5	Numerické výpočty jednotlivých mechanismů	35
6	Numerické výpočty ve vzduchové dutině	38
7	Závislost jednotlivých mechanismů na tloušťce vzduchové vrstvy za stejné teploty spodní desky	44
8	Ověření přesnosti měření.....	49
8.1	Vliv nízkých teplot na naměřené závislosti.....	49
8.2	Vliv proudění způsobeného únikem vzduchu neutěsněnými částmi měřicího přístroje.....	50
8.2.1	Ověření pomocí rámečku se dnem	50
8.2.2	Ověření pomocí shodného nastavení pro měření s rámečkem a bez dna	51
9	Ovlivnění přesnosti numerických výpočtů	52
10	Závěr.....	53
	Seznam literatury	54

Seznam použitých symbolů a veličin

označení	význam	jednotka
\dot{Q}	tepelný tok	[W]
A	plocha měřeného úseku	[m ²]
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
$\Delta T, \Delta t$	rozdíl teplot na deskách	[K]
d	vzdálenost desek	[m]
N	hodnota určená kalibrací	[W.mV ⁻¹]
V	výstupní signál	[mV]
λ_{vzd}	celkový součinitel sdílení tepla ve vzduchové dutině	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
S _{vzd}	vzdálenost styrofoamových desek	[m]
λ_{nam}	celkový součinitel sdílení tepla naměřený přístrojem	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
s	celková tloušťka sestavy	[m]
S _{st}	tloušťka styrofoamové desky	[m]
λ_{st1}	součinitel tepelné vodivosti styrofoamové desky při teplotě t ₁	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_{st2}	součinitel tepelné vodivosti styrofoamové desky při teplotě t ₂	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
\dot{q}_c	celkový měrný tepelný tok	[W.m ⁻²]
T _x	teplota na vnitřní straně horní styrofoamové desky	[K]
T ₁	teplota na horní desce přístroje	[K]
λ_{st}	součinitel tepelné vodivosti styrofoamu	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
T _y	teplota na vnitřní straně spodní styrofoamové desky	[K]
T ₂	teplota na spodní desce přístroje	[K]
Ra	Rayleighovo číslo	[-]

Gr	Grashofovo číslo	[-]
Pr	Prandtlovo číslo	[-]
γ_v	součinitel objemové roztažnosti	[K ⁻¹]
L	charakteristický rozměr	[m]
ν	kinetická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
c_p	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
η	dynamická viskozita	[kg. m ⁻¹ .s ⁻¹]
H	hustota zářivého toku dopadajícího na povrch	[W.m ⁻²]
B	celkový tok zářivé energie vyzářený povrchem	[W.m ⁻²]
F ₁₋₂	view faktor	[-]
ρ	odrazivost	[-]
α	pohltivost	[-]
τ	průteplivost	[-]
σ	Stefan-Boltzmanova konstanta	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
e_b	hustota zářivého toku	[W.m ⁻²]
ε	emisivita povrchu desek přístroje	[-]
ε_{st}	emisivita styrofoamu	[-]
λ_{20}	celkový součinitel sdílení tepla při střední teplotě 20°C	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
t_{20}	střední teplota 20°C	[°C]

1 Úvod

V dnešní době, v níž cena energií neustále stoupá, je zapotřebí, snažit se minimalizovat tepelné ztráty. Proto jsem si jako téma bakalářské práce zvolil problematiku, jež s touto potřebou velmi úzce souvisí.

Cílem práce bylo měřením zjistit, jak se ovlivní izolační vlastnosti běžně používaného izolačního materiálu ve spojení se vzduchovou dutinou. K testům byl zvolen styrofoam, protože se jedná o moderní materiál vyrobený na bázi polystyrenu. Pro své izolační vlastnosti je obvykle používán k tepelné izolaci obytných budov. Pro styrofoam je uváděna hodnota součinitele tepelné vodivosti $\lambda_{st}=0,032 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [1] a běžně uváděné hodnoty součinitele tepelné vodivosti vzduchu se pohybují okolo $\lambda_{vzd} = 0,024 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Úkolem bylo tedy ověřit předpoklad, že vzduchová dutina uvnitř testovaného materiálu zlepší jeho izolační vlastnosti. Bylo očekáváno, že naměřená hodnota se bude nacházet někde mezi hodnotami součinitelů tepelné vodivosti vzduchu a styrofoamu. K testování byl využit přístroj Lambda HFM 436/1E, jež umožňuje měřit součinitele tepelné vodivosti jednoduchých i složených materiálů.

2 Lambda HFM 436/1E

Pro provedení testů byl zvolen přístroj Lambda HFM 436/1E. Jedním z důvodů bylo, že tento přístroj je ve vlastnictví fakulty strojní TUL. Druhým důvodem bylo, že přístroje z řady Lambda HFM 436 umožňují měřit součinitele tepelné vodivosti izolačních materiálů v rozsahu hodnot 0,005-0,5 W/(m.K), při teplotách od -30°C do 90°C, pro tepelné odpory 0,1-8 m².K.W⁻¹. Pro tuto práci je tedy vybraný přístroj vyhovující, protože výše uvedené rozsahy umožňují měřit hodnoty λ pro vzduch o teoretických tloušťkách 5 mm-4 m.

Lambda HFM 436/1E umožňuje měřit vzorky o rozměrech do 300mm x 300mm a tloušťky do 100mm. Snímaná oblast je uprostřed testovaného vzorku zhruba o rozměru 100mm x 100mm. Jedná se tedy o optimální zařízení na měření součinitele tepelné vodivosti izolačních materiálů. Přesnost měření je s chybou 2,5%.



Obrázek 1 – Přístroj Lambda HFM 436/1E; zdroj [vlastní]

2.1 Princip a postup měření

Přístroj HFM 436 Lambda je založen na relativním principu měření, proto je nezbytné, před prvním měřením přístroj nejdříve kalibrovat. Kalibrace se provádí na vzorku dodaném dodavatelem. V případě testování v rámci této práce se jedná o materiál SRM 1450c, jehož parametry byly zjištěny institutem NIST.

Použité zařízení umožňuje měřit závislosti součinitele tepelné vodivosti na střední teplotě, rozdílu teplot na krajních vrstvách a tloušťce materiálu. Jako tloušťka materiálu je

považována vzdálenost horní pohyblivé a spodní nepohyblivé desky. Tato vzdálenost je určena pomocí snímače LVDT.

Hodnoty součinitele tepelné vodivosti se zjišťují na základě vztahu:

$$\dot{Q} = \lambda A \frac{\Delta T}{d} \quad (1)$$

kde je: \dot{Q} tepelný tok

A plocha měřeného úseku (102mm x 102mm)

λ součinitel tepelné vodivosti

ΔT rozdíl teplot na deskách

d vzdálenost desek

Výstupní signál je měřen v milivoltech, proto je nutné přiřadit dané hodnotě hodnotu odpovídajícího tepelného toku.

$$\dot{Q} = NV \quad (2)$$

kde je: N hodnota určená kalibrací

V výstupní signál

Pak platí:

$$\lambda = N \frac{Vd}{\Delta T} \quad (3)$$

Měřicí zařízení Lambda HFM 436/1E má k dispozici externí chladič, jež pomáhá při dochlazování na nižší teploty (viz obr. 2).



Obr. 2: Lambda HFM 436/1E včetně chladičného zařízení; zdroj [vlastní]

Při testování je mezi dvě vyhřívané desky (obr. 3), vložen vzorek. Teploty desek jsou kontrolovány Peltierovým systémem.



Obr. 3: Prostor pro měření testovaných vzorků; zdroj [vlastní]

Během celého měření mohou být hodnoty zaznamenány a vytištěny na připojené tiskárně v předem nadefinovaných intervalech. Další možností je využít jako výstup zobrazování přímo monitoru připojeného počítače (obr. 4). Software QLab umožňuje také výstup včetně grafů závislostí součinitele tepelné vodivosti, střední teploty a teplotního rozdílu na čase.

Po dosažení teplotní rovnováhy se výsledné hodnoty zanesou do tabulky, která je vytištěna, a pokračuje se v dalším měření.



Obr. 4: Kompletní zapojení přístroje Lambda 436/1E ; zdroj [vlastní]

Podkladem pro tuto kapitolu byly hlavně zdroje[2], [3].

3 Vedení tepla

Vedení tepla je nejčastější způsob šíření tepla v pevných tělesech, jejichž různé části mají různé teploty. Teplo se vedením šíří také v kapalinách a plynech, kde se však uplatňuje také přenos tepla prouděním.

Vedení (kondukce) tepla je jeden ze způsobů šíření tepla v tělesech, při kterém částice látky v oblasti s vyšší střední kinetickou energií předávají část své pohybové energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší střední kinetickou energií. Částice se přitom nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh.

Vedení tepla lze rozdělit na:

- ustálené (stacionární) vedení tepla - teplotní rozdíl mezi jednotlivými částmi tělesa se v čase;
- neustálené (nestacionární) vedení tepla - teplotní rozdíly mezi jednotlivými částmi tělesa, mezi kterými se teplo přenáší, se postupně vyrovnávají.

Rychlost vedení tepla určuje tzv. tepelnou vodivost. K porovnávání látek podle jejich tepelné vodivosti slouží veličina součinitel tepelné vodivosti. Podle tohoto součinitele se látky dělí na:

- tepelné vodiče - látky s vysokou rychlostí vedení tepla a velkým součinitelem tepelné vodivosti;
- tepelné izolanty - látky s nízkou rychlostí vedení tepla a malým součinitelem tepelné vodivosti.

Pro vedení tepla využívá rovnice Fourierova zákona

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad } t \quad (4)$$

Ze vztahu (4) je vidět, že průběh teploty v rovinné desce je při ustáleném proudění tepla lineární.

Pokud se těleso (např. deska), kterým teplo prostupuje, skládá z n vrstev o různé tepelné vodivosti λ_q a tloušťce d_q pro q -tou vrstvu pak platí, že za ustáleného stavu musí být hustota tepelného proudu ve všech vrstvách stejná (5).

$$q = \frac{\lambda_1}{d_1}(t_1 - t_2) = \frac{\lambda_2}{d_2}(t_2 - t_3) = \dots = \frac{\lambda_n}{d_n}(t_n - t_{n+1}) \quad (5)$$

Pro celkový rozdíl teplot pak je platná rovnice (6).

$$t_1 - t_{n+1} = (t_1 - t_2) + (t_2 - t_3) + \dots + (t_n - t_{n+1}) = q \frac{d_1}{\lambda_1} + q \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + q \frac{d_n}{\lambda_n} = q \sum_{k=1}^n \frac{d_k}{\lambda_k} \quad (6)$$

Hustotu tepelného toku takovou deskou lze tedy vyjádřit vztahem (7).

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{k=1}^n \frac{d_k}{\lambda_k}} \quad (7)$$

Kde podíl $\frac{d_k}{\lambda_k}$ se nazývá měrný tepelný odpor vrstvy.

Podkladem pro tuto kapitolu byly zejména zdroje [4], [5].

4 Měření

Nedílnou součástí měření byla příprava, jejíž hlavním cílem bylo zvolení vhodných prostředků k uskutečnění samotného měření. Pro měření sypkých materiálů bylo nezbytné vyrobit rámeček o rozměrech uvedených v pokynech od výrobce měřicího zařízení NETZSCH.

Ke konstrukci rámečku byl vybrán materiál styrofoam díky své nízké měrné hmotnosti ($\rho=32 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a relativně snadné zpracovatelnosti. Dalším důvodem pro výběr tohoto materiálu byla i jeho používání v praxi při izolaci obytných staveb. Jako dno rámečku byla použita aluminiová deska, jež má nízkou hmotnost, avšak zároveň disponuje pro dané účely dostatečnou pevností. Spojení čtvercového rámečku ze styrofoamu a aluminiové desky bylo provedeno za pomoci lepidla.

Pro měření součinitele tepelné vodivosti materiálu s vnitřní vzduchovou dutinou byl zvolen rovněž materiál styrofoam a to zejména pro svou snadnou zpracovatelnost a vhodné fyzikální vlastnosti, jež nevybočují z mezí daných schopnostmi přístroje.

Tabulka 1 – Přehledová tabulka vlastností; Zdroj [6]

Vlastnosti ¹⁾	Norma	Jednotky	STYROFOAM IB-A
Objemová hmotnost	EN 1602	kg/m³	32
Deklarovaná spoučinitele vodivosti²⁾ λ_D Tloušťka d = 20 mm	EN13164	W/(m·K)	0,035
d = 30 mm	EN13164	W/(m·K)	0,035
d = 40 mm	EN13164	W/(m·K)	0,035
d = 50 mm	EN13164	W/(m·K)	0,035
d = 60 mm	EN13164	W/(m·K)	0,035
d = 80 mm	EN13164	W/(m·K)	0,035
d = 100 mm	EN13164	W/(m·K)	0,036
d = 120 mm	EN13164	W/(m·K)	0,036
Napětív tlaku při 10% stlačení CE kód: CS(10Y)σ_{10}	EN 13164 EN 826	Symbol kPa	CS(10/Y)250 250
Modul elasticity - E	EN 826	kPa	10.000

Vlastnosti 1)	Norma	Jednotky	STYROFOAM IB-A
Dotvarování tlakem (50 let) při 2% stlačení ³⁾ CE kód: C(i ₁ /i ₂ /y)σc	EN 13164 EN 1606	Symbol kPa	- 80
Pevnost v tahu kolmo k rovině desky CE kód: TRσ _{mt}	EN 13164 EN 1607	Symbol kPa	TR100 ≥ 100
Faktor difúzního odporu MU_i	EN 12086	-	100
Dlouhodobá nasákavost při ponoření CE kód: WL(T)i	EN 13164	Symbol	-
	EN 12087	Vol.-%	≤1,5
Dlouhodobá nasákavost při difuzi ⁴⁾ CE kód: WD(V)i dN = 50 mm	EN 13164 EN 12088	Symbol Vol.-%	- -
	EN 12088	Vol.-%	-
dN = 100 mm	EN 12088	Vol.-%	-
dN = 200 mm	EN 12088	Vol.-%	-
Odolnost proti cyklům mráz/tání CE kód: FTi	EN 13164 EN 12091	Symbol Vol.-%	- -
Kapilarita			0
Součinitel lineární tepelné roztažnosti		mm/(m·K)	0,07
Rozměrová stabilita nebo deformace při specifické teplotě a vlhkosti CE kód: DS(TH)	EN 13164 EN 1604	Symbol %	DS(TH) ≤2
při specifické teplotě a zatížení tlakem CE kód: DLT(i)5	EN 13164 EN 1605	Symbol %	- -
Hořlavost	EN 13501-1	Eurotřída	E
Rozměry			
délka x šířka	EN 822	mm	1250 x 600
Tloušťka ⁵⁾	EN 823	mm	20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, (120)
Tolerance tloušťky ⁶⁾ CE kód: Ti	EN 13164	Třída	T1
Profil hran			rovný
Povrch			drsňý

1) Střední hodnota, pokud není uvedeno jinak

2) Výpočtová hodnota pro suché nebo pravidelně se opakující vlhké prostředí. Pro specifické aplikace by výpočtová hodnota měla být stanovena normou EN ISO 10456.

3) Výpočtová hodnota pro dlouhodobé zatížení.

4) Hodnoty pro jiné tloušťky lze získat interpolací.

5) Tloušťky v () na základě objednávky.

6) Tolerance tloušťky v třídě T1: d<50mm: -/+2 mm; 50≤d≤120mm: -2/+3mm; d>120mm: -2/+8mm.

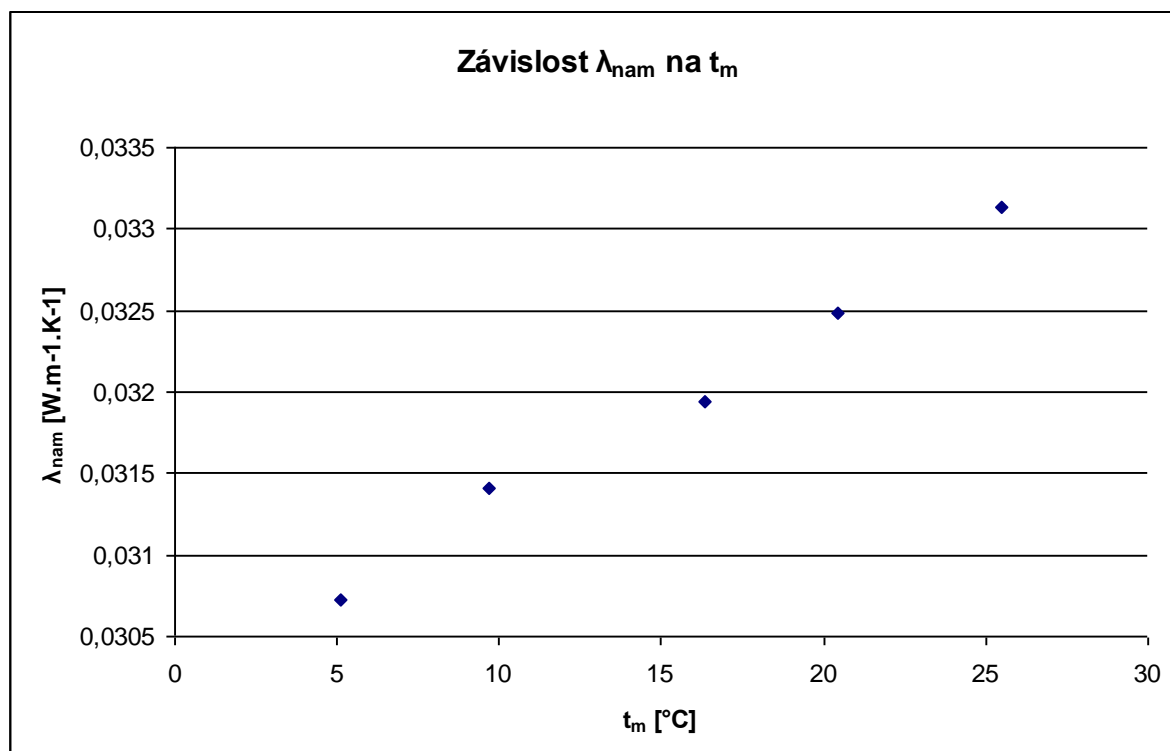
Pro sestavení samotné vzduchové dutiny byl zvolen následující postup. Byly zhotoveny rámečky stejným způsobem jako rámeček pro měření sypkých materiálů. A to o rozměrech 40 mm x 300 mm x 300 mm a 20 mm x 300 mm x 300 mm. Byly přiloženy zesponu a svrchu plné desky (též ze styrofoamu) a tím vznikly dvě vzduchové dutiny o rozdílných rozměrech.

4.1 Styrofoamová deska

Na počátku měření v rámci této práce bylo nutné změřit závislost součinitele tepelné vodivosti použité 20mm styrofoamové desky na střední teplotě t_m . Daná závislost vyjádřená pomocí co nejvhodnější funkce bude dále použita v dalších výpočtech, při zjišťování izolačních vlastností vzduchové dutiny. Zjištěné hodnoty jsou zobrazeny v tabulce a také graficky.

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty pro $d = 20\text{mm}$

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
5,12	9,94	0,030720
9,68	10,02	0,031410
16,35	10,00	0,031943
20,45	10,03	0,032480
25,51	10,02	0,033129



Obr. 5: Závislost součinitele tepelné vodivosti na velikosti střední teploty pro styrofoamovou desku

Jak je patrné z výše uvedeného obr.5, naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti styrofoamu rostou s rostoucí t_m . Daná závislost by šla vyjádřit jako lineární s rovnicí regrese (8).

$$\lambda_{nam} = 0,0302002 + 0,000114 t_m \quad (8)$$

4.2 Vzduchová dutina

U tohoto měření bylo použito výše uvedeného sestavení vzduchové dutiny za použití dvou desek z materiálu styrofoam mezi než byl umístěn rámeček. V prvním případě byl použit rámeček o výšce strany 20 mm, ve druhém 40mm. Snahou bylo určit závislost λ_{vzd} vzduchové dutiny na její tloušťce a Δt na deskách přístroje při stejné střední teplotě $t_m = 20^\circ\text{C}$. Předpoklad byl, že při uspořádání se 40 mm rámečkem by měly být naměřené hodnoty λ_{nam} nižší nežli hodnoty λ_{nam} při použití 20 mm rámečku. Zjištěné hodnoty jsou zobrazeny v tabulkách 3 a 4.

Tabulka 3 – Naměřené hodnoty pro mezeru 40 mm

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
18,31	11,59	0,055224
19,18	20,49	0,055373
20,47	29,46	0,055730

Tabulka 4 - Naměřené hodnoty pro mezeru 20 mm

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
18,28	11,56	0,042382
19,17	20,48	0,042382
20,47	29,46	0,042514

Z těchto naměřených hodnot je třeba určit celkového součinitele sdílení tepla pouze ve vzduchové dutině λ_{vzd} . Pro jeho určení vycházíme ze vztahů (9) až (12),

$$\frac{S}{\lambda_{nam}} = \frac{S_{vzd}}{\lambda_{vzd}} + \frac{S_{st}}{\lambda_{st1}} + \frac{S_{st}}{\lambda_{st2}} \quad (9)$$

$$\lambda_{vzd} = \frac{\lambda_{nam} \lambda_{st1} \lambda_{st2}}{S \lambda_{st1} \lambda_{st2} - S_{st} \lambda_{nam} (\lambda_{st1} + \lambda_{st2})} \quad (10)$$

$$\lambda_{st1} = a + b \left(\frac{T_1 + T_x}{2} \right) \quad (11)$$

$$\lambda_{st2} = a + b \left(\frac{T_y + T_2}{2} \right) \quad (12)$$

kde je

- λ_{vzd} lambda vzduchu ve vzduchové dutině;
- s_{vzd} vzdálenost styrofoamových desek;
- λ_{nam} lambda naměřená přístrojem;
- s celková tloušťka sestavy;
- s_{st} tloušťka styrofoamové desky;
- λ_{st1} lambda styrofoamové desky při teplotě t_1 ;
- λ_{st2} lambda styrofoamové desky při teplotě t_2 .

Při výpočtu teplot T_x a T_y se vycházelo ze vztahu (13),

$$\dot{q}_c = \frac{\lambda_{st}}{s_{st}} (T_1 - T_x) \quad (13)$$

kde je

- \dot{q}_c celkový měrný tepelný tok;
- T_x teplota na vnitřní straně horní styrofoamové desky;
- T_1 teplota na horní desce přístroje;
- λ_{st} součinitel tepelné vodivosti styrofoamu;
- s_{st} tloušťka styrofoamové desky ($s_{st}=0,020181\text{m}$).

Z charakteristiky závislosti λ_{st} na t_m je možné za λ_{st} dosadit:

$$\lambda_{st} = a + b \left(\frac{T_1 + T_x}{2} \right) \quad (14)$$

Pro $a = 0,0302$; $b = 0,0001$.

Poté je získán vztah (15),

$$\dot{q}_c = \frac{a + b \left(\frac{T_1 + T_x}{2} \right)}{s_{st}} (T_1 - T_x) \quad (15)$$

z něhož vyplývá, následující vztah (16).

$$T_x = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 2baT_1 + b^2T_1^2 - 2b\dot{q}_c s_{st}}}{b} \quad (16)$$

Při výpočtu hodnoty teploty na vnitřní straně spodní desky se vyšlo ze vztahu (17),

$$\dot{q}_c = \frac{\lambda_{st}}{s_{st}} (T_y - T_2) \quad (17)$$

kde je:

T_y teplota na vnitřní straně spodní styrofoamové desky;

T_2 teplota na spodní desce přístroje.

Obdobným postupem jako v předchozím případě byl získán vztah(18).

$$T_y = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 2baT_2 + b^2T_2^2 + 2b\dot{q}_c s_{st}}}{b} \quad (18)$$

Podle výše uvedených vztahů byly v programu MS Excel pro dané parametry vypočteny následující hodnoty, které jsou zaneseny v tabulkách 5 a 6.

Tabulka 5 – pro vzduchovou dutinu 20mm

t_m [°C]	20,47	19,17	18,28
t_1 [°C]	35,20	29,41	24,06
t_2 [°C]	5,74	8,93	12,50
T_x [K]	295,15	293,37	291,98
T_y [K]	291,78	290,96	290,57
λ_{vzd} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,124	0,120	0,116

Tabulka 6 - pro vzduchovou dutinu 40mm

t_m [°C]	18,31	19,18	20,44
t_1 [°C]	24,11	29,43	35,17
t_2 [°C]	12,52	8,94	5,71
T_x [K]	292,13	293,60	295,40
T_y [K]	290,48	290,75	291,47
λ_{vzd} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,198	0,202	0,211

Z vypočtených hodnot je patrné, že ve vzduchové dutině musí docházet i k jiným formám tepelné výměny nežli pouze k vedení, jelikož běžně uváděné hodnoty součinitele tepelné vodivosti vzduchu se pohybují okolo $\lambda_{vzd} = 0,0224$ W.m⁻¹.K⁻¹. Podle autorů [7], [8], kteří

tvrdí, že v daném uspořádání s teplejší horní deskou nejsou důvody pro uplatnění sdílení tepla samovolným prouděním.

4.3 Celkový součinitel sdílení tepla

Z výše uvedených závěrů lze předpokládat, že by mohlo významný podíl na tepelné výměně zastávat sálání a to zejména v případě, je-li emisivita sálajících povrchů relativně vysoká. Jelikož je emisivita styrofoamu $\epsilon_{st}=0,6$ [9], platí pro tento konkrétní případ zřejmě vztah (19)

$$\dot{Q}_{celkový} = \dot{Q}_{vedení} + \dot{Q}_{sálání} \quad (19)$$

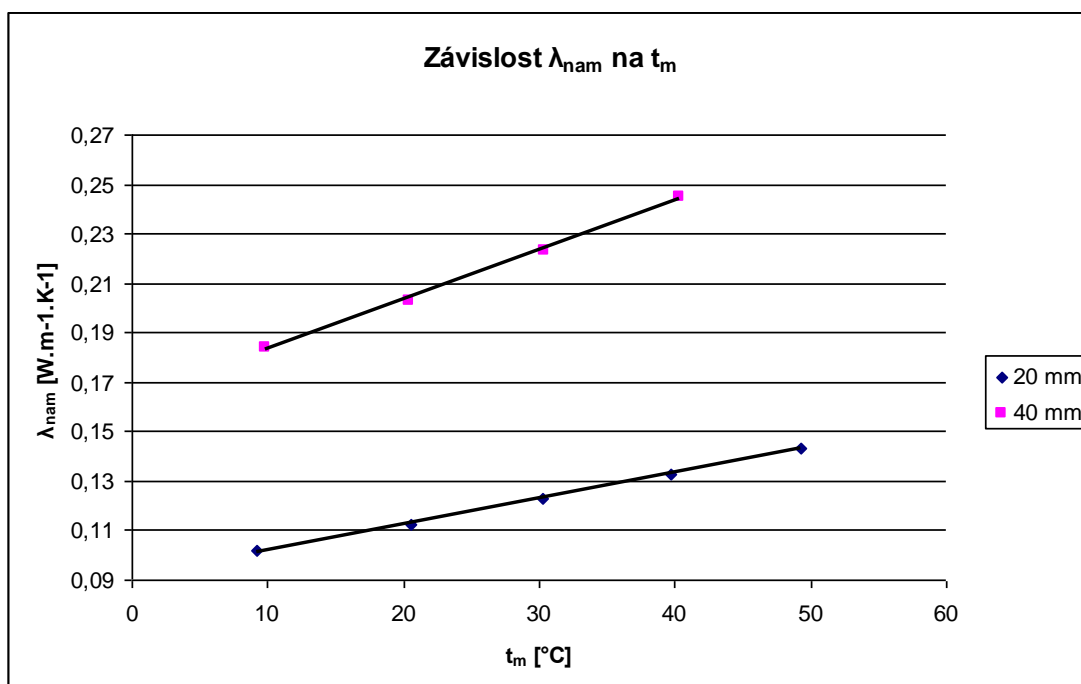
Pro ověření tohoto předpokladu tedy je nezbytné provést další měření. Nejprve byla provedena měření pro 20 mm a 40 mm vrstvu vzduchu (bez styrofoamových desek) při stejném $\Delta t=10^{\circ}\text{C}$ a různých středních teplotách, aby byla zjištěna závislost λ_{nam} na velikosti teploty. Zjištěné hodnoty jsou zobrazeny v tabulkách 7, 8 a také v grafu 2.

Tabulka 7 - Naměřené hodnoty pro 20mm vrstvu vzduchu (d=20,201mm)

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
9,25	9,99	0,101683
20,59	9,94	0,112147
30,25	8,99	0,122646
39,70	8,93	0,132660
49,33	8,87	0,143364

Tabulka 8 - Naměřené hodnoty pro 40mm vrstvu vzduchu (d=40,507mm)

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
9,85	9,79	0,183715
20,45	10,01	0,203067
30,37	10,00	0,223081
40,37	10,00	0,244660



Obr.6: Závislost celkového součinitele sdílení tepla na velikosti střední teploty

Z obr.6 je patrné, že s rostoucí hodnotou t_m roste lineárně i hodnota λ_{nam} . A to s rovnicí regrese pro 20 mm:

$$\lambda_{nam} = 0,09133 + 0,001t_m \quad (20)$$

pro 40 mm:

$$\lambda_{nam} = 0,16316 + 0,002 t_m \quad (21)$$

Po výsledku testování bylo možné zjistit závislost λ_{nam} na Δt . Aby se mohla daná závislost určit, byla nastavena na přístroji pro všechna provedená měření střední teplota $t_m=20^\circ\text{C}$ a postupně se zvyšovala velikost Δt , a to od 10°C do 25°C . Při těchto měřeních bylo opět využito rámečků o výšce 20 mm a 40 mm. Zjištěné hodnoty jsou zobrazeny v tabulkách 9 a 10.

Tabulka 9 – Naměřené hodnoty pro $d = 20,201\text{mm}$

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
20,59	9,94	0,112147
21,58	13,02	0,114263
18,75	19,35	0,110956
19,45	23,33	0,111498
20,01	26,32	0,112143

Tabulka 10 - Naměřené hodnoty pro $d = 41,113\text{mm}$

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
18,29	12,66	0,201104
18,78	16,69	0,201823
19,38	20,70	0,203221
20,02	27,00	0,204602

V předešlých měřeních byla dokázána závislost velikosti λ_{nam} na velikosti střední teploty t_m , proto je nezbytné k přesnějšímu určení vlivu Δt korigovat hodnoty t_m na stejnou teplotu 20°C. Ke korekci jsou použity vztahy z rovnic regrese zjištěných v předchozí úloze a to následujícím způsobem:

vyjádření celkového součinitele sdílení tepla při střední teplotě 20°C

$$\lambda_{20} = a + bt_{20} \quad (22)$$

vyjádření λ_{nam} při naměřené teplotě t_m

$$\lambda_{nam} = a + bt_m \quad (23)$$

Z vztahu (24) lze získat vyjádření celkového součinitele sdílení tepla při střední teplotě 20°C pro naměřené Δt

$$\lambda_{20} = b(t_{20} - t_m) + \lambda_{nam} \quad (24)$$

Jelikož jsou parametry b pro velikosti vzduchových mezer 20 mm a 40 mm známy, je možné napsat pro 20mm:

$$\lambda_{20} = 0,001(t_{20} - t_m) + \lambda_{nam} \quad (25)$$

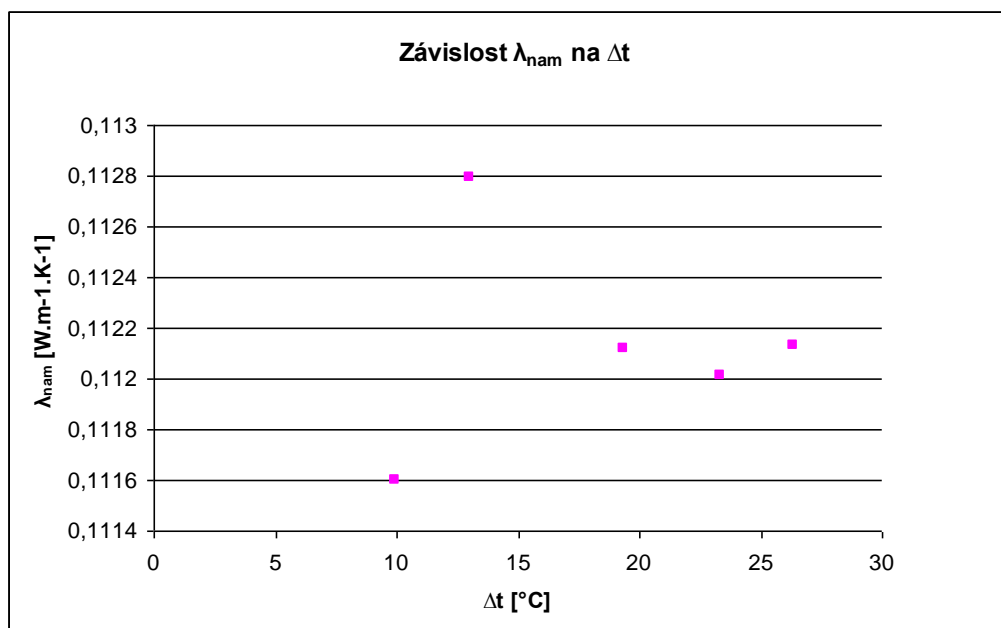
a pro 40mm:

$$\lambda_{20} = 0,002(t_{20} - t_m) + \lambda_{nam} \quad (26)$$

Korigované hodnoty pro $t_m=20^\circ\text{C}$ jsou zobrazeny v tabulkách 11, 12 a v obr. 7,8.

Tabulka 11 – pro vzduchovou mezeru 20 mm

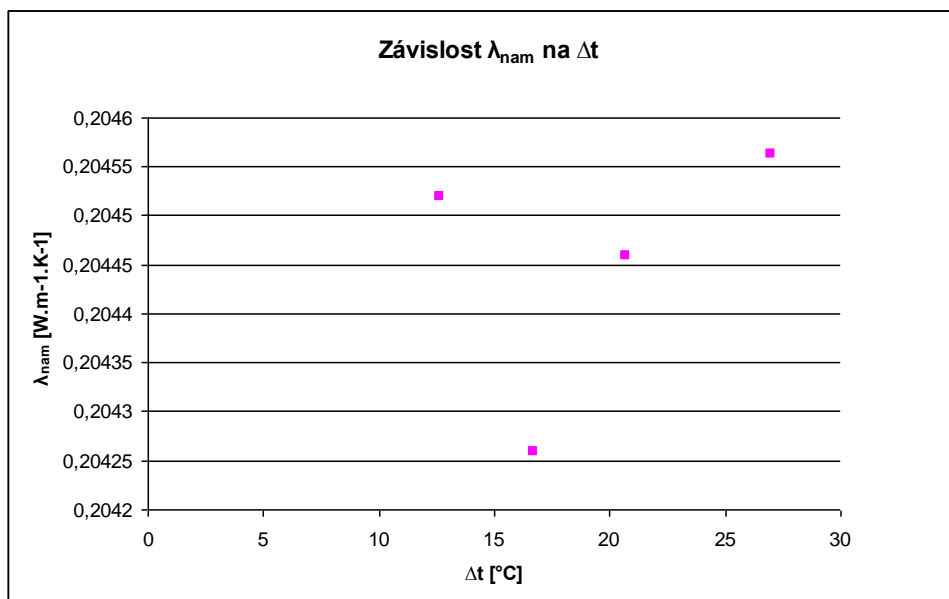
Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
9,94	0,111598
13,02	0,112794
19,35	0,112119
23,33	0,112010
26,32	0,112134



Obr.7: Závislost korigovaného celkového součinitele sdílení tepla na rozdílu teplot na deskách měřícího přístroje pro 20 mm vzduchovou vrstvu

Tabulka 12 – pro vzduchovou mezeru pro 40mm

Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
12,66	0,204519
16,69	0,204259
20,70	0,204459
27,00	0,204562



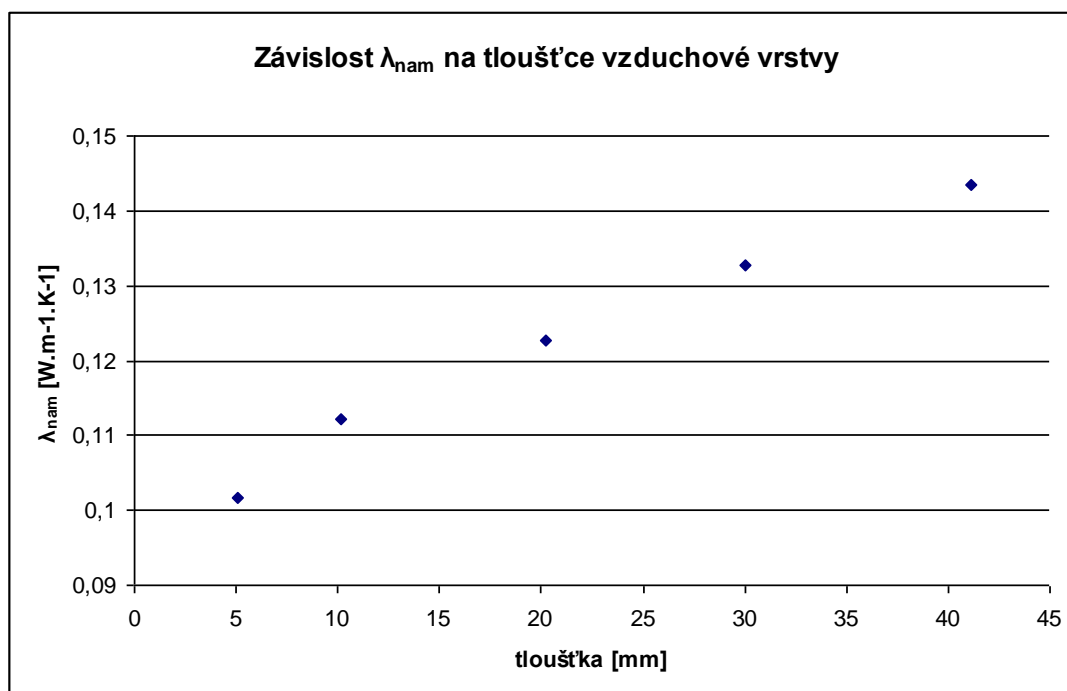
Obr.8: Závislost korigovaného celkového součinitele sdílení tepla na rozdílu teplot na deskách měřícího přístroje pro 40 mm vzduchovou vrstvu

Z grafických zobrazení je patrné, že velikost naměřeného celkového součinitele sdílení tepla není závislá na rozdílech teplot na deskách přístroje. Lze proto při stejné střední teplotě t_m odlišnosti v naměřených hodnotách λ_{nam} zanedbat.

V další části měření této práce bylo úkolem zjistit závislost velikosti λ_{nam} na tloušťce vzduchové vrstvy za stejných podmínek $t_m = 20^\circ\text{C}$ a $\Delta t = 20^\circ\text{C}$, aby se mohla určit hodnota součinitele tepelné vodivosti vzduchu λ_{vzd} . Zjištěné hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 13 i graficky (obr.9).

Tabulka 13 – Naměřené hodnoty celkového součinitele sdílení tepla pro různé tloušťky vzduchové vrstvy

Tloušťka [mm]	5,056	10,152	20,201	30,017	41,113
λ_{nam} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,045013	0,067327	0,110956	0,154757	0,203221



Obr.9: Závislost naměřených hodnot celkového součinitele sdílení tepla na tloušťce vzduchové vrstvy

Z grafického zobrazení je vidět, že hodnota λ_{nam} s rostoucí vzdáleností desek (velikostí vzduchové vrstvy) roste téměř lineárně.

Z dané závislosti $\lambda_{nam} = 0,02269 + 0,0439 \cdot d$ byla velikost λ_{vzd} stanovena na hodnotu $\lambda_{vzd} = 0,0227 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

4.4 Sálání

Nyní již bylo možné ověřit vliv sálání i výpočtem. Pro zjištění vlivů jednotlivých mechanismů je nutné zavést navzájem porovnatelné součinitele. K určení součinitele celkové výměny byl použit vztah (27),

$$\frac{\lambda_{nam}}{s} \quad (27)$$

kde je

λ_{nam} lambda naměřená přístrojem;

s vzdálenost desek.

K určení součinitele pro vedení:

$$\frac{\lambda_{vzd}}{s} \quad (28)$$

kde je

λ_{vzd} hodnota součinitele tepelné vodivosti vzduchu určená měřením

($\lambda_{vzd} = 0,0227 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Pro součinitel ξ vyjadřující sálání, by podle překladů, měl platit vztah (29).

$$\xi = \frac{\lambda_{nam}}{s_{vzd}} - \frac{\lambda_{vzd}}{s_{vzd}} \quad (29)$$

Tabulka 14 – Velikost součinitelů jednotlivých mechanismů sdílení tepla pro příslušné tloušťky vzduchové vrstvy

Tloušťka [mm]	5,056	10,152	20,201	30,017	41,113
$\frac{\lambda_{nam}}{s} [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$	8,903	6,632	5,493	5,159	4,943
$\frac{\lambda_{vzd}}{s} [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$	4,549	2,266	1,139	0,767	0,559
$\xi [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$	4,354	4,366	4,354	4,392	4,384

Při porovnání hodnot ξ pro jednotlivé velikosti vzduchové vrstvy není patrná žádná závislost. Předpokladem byly klesající hodnoty součinitele vyjadřujícího sálání, jelikož jeho velikost při stejných hodnotách t_m a Δt měla záležet pouze na rozměrech vzduchové vrstvy, s jejíž rostoucí velikostí klesá view faktor. Toto zjištění vede k přesvědčení, že při daném procesu dochází zřejmě i k jinému mechanismu tepelné výměny, nežli jen k vedení a sálání.

Posledním možným způsobem tepelné výměny je proudění, proto je možné se z uvedených zjištění domnívat, že při tomto procesu dochází i k samovolnému proudění. K ověření tohoto

tvrzení dojde v kapitole 7. Při těchto ověřeních bylo využito znalosti vztahů (30-32), z nichž je patrná závislost proudění na hodnotě střední teploty, charakteristickém rozměru a Δt . V kapitole 7 též dojde k ověření předpokladu, že charakteristickým rozměrem je tloušťka vzduchové vrstvy.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (30)$$

kde je

Ra	Rayleighovo číslo
Gr	Grashofovo číslo
Pr	Prandtlovo číslo

$$Gr = \gamma_v \Delta t \frac{gL^3}{\nu^2} \quad (31)$$

kde je

γ_v	součinitel objemové roztažnosti
L	charakteristický rozměr
ν	kinetická viskozita

$$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda} \quad (32)$$

c_p	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
η	dynamická viskozita

Jelikož se v tomto případě se jedná o sdílení tepla mezi difuzními šedými tělesy, lze využít analogie s výměnou tepla v elektrice.

Pro tuto analogii je nezbytné zavést dvě veličiny, v anglosaském jazyce nazývané:

- irradiance – hustota zářivého toku dopadajícího na povrch $H = (W/m^2)$
- radiosity – celkový tok zářivé energie vyzářený povrchem $B = (W/m^2)$

Radiosity je možno vyjádřit jako součet energie odražené povrchem a energie z povrchu vyzářené,

$$B = \rho H + \epsilon \epsilon_b \quad (33)$$

kde je

ρ	odrazivost;
--------	-------------

- ε emisivita povrchu;
- e_b hustota zářivého toku.

Z toho lze odvodit vztah (34) pro tepelný tok vyzařovaný libovolným povrchem.

$$q = B-H = B - \frac{B - \varepsilon e_b}{\rho} \quad (34)$$

Jelikož je znám vztah pro tok energie dopadající na libovolné těleso $1 = \tau + \rho + \alpha$, lze pro tento případ neprůhledného povrchu ($\tau=0$) šedého tělesa uvažovat, že $1 - \rho = \alpha$, kde $\alpha = \varepsilon$ a tudíž platí:

$$qA = Q = B - \frac{(e_b - B) \varepsilon A}{(1 - \varepsilon)} \quad (35)$$

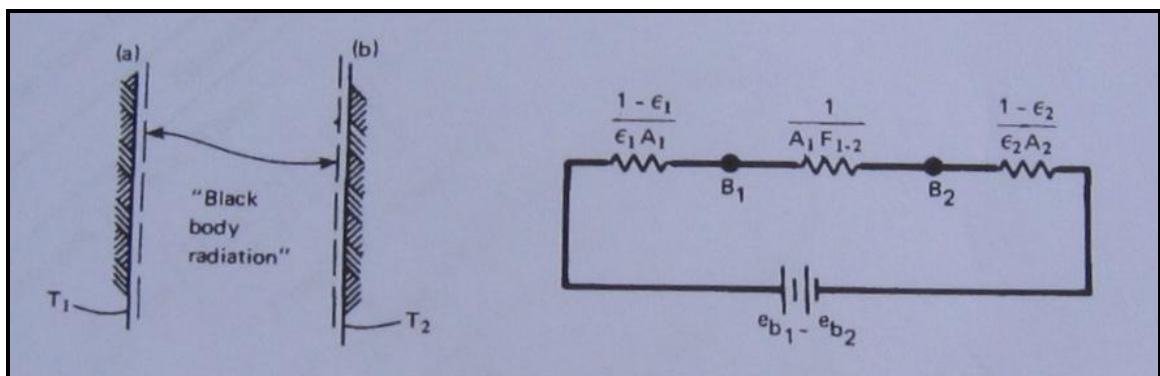
kde je

- A plocha povrchu;
- τ . průteplivost;
- α . Pohltivost.

Tato rovnice je formou Ohmova zákona, který říká, že na vztah $(e_b - B)$ lze nahlížet jako na potenciálový rozdíl, který určuje množství tepla sdíleného z povrchu skrze efektivní tepelný odpor, $\frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon A}$.

Jelikož jsou materiály použité při měření difúzní, je zřejmé, že sálání bude mít stejný charakter, jaký by mělo u černých těles. Proto je možné sálání z libovolného povrchu považovat za sálání vyzařené černým tělesem na libovolnou plochu, vyjádřené vztahem (36)

$$Q_{1-2} = A_1 F_{1-2} (B_1 - B_2) = \frac{(B_1 - B_2)}{\left(\frac{1}{A_1 F_{1-2}} \right)} \quad (36)$$



Obr.10: Analogie mezi sdílením tepla difúzními šedými tělesy a výměnou tepla v elektrice

Elektrický obvod na obr.10 znázorňuje výše zmíněnou analogii a poskytuje podklady pro výpočet tepelného toku mezi povrchy z Ohmova zákona.

$$Q_{1-2} = \frac{e_{b1} - e_{b2}}{\sum \text{odpor}} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon A}\right)_1 + \frac{1}{A_1 F_{1-2}} + \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon A}\right)_2} \quad (37)$$

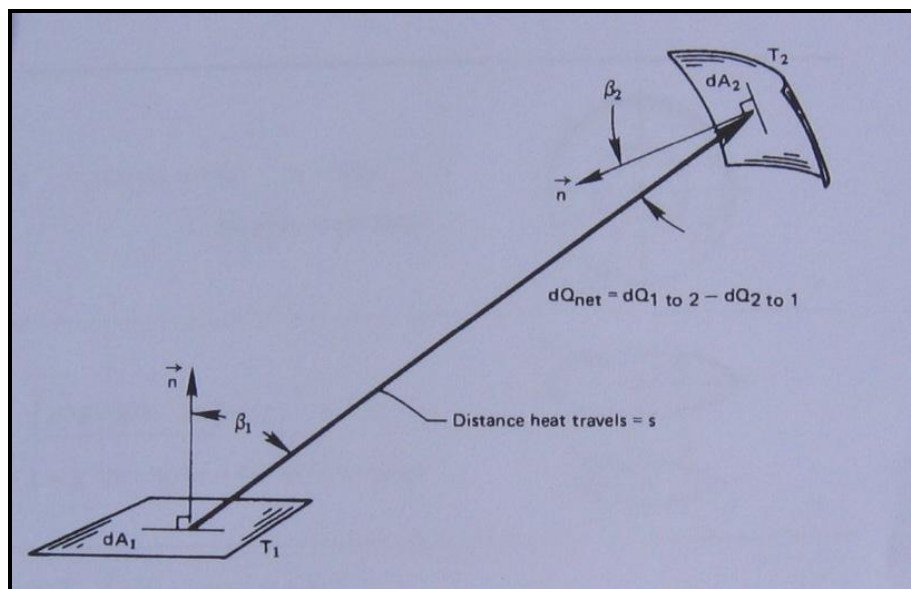
kde je:

T_1, T_2 termodynamické teploty povrchů;

σ Stefan-Boltzmanova konstanta $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$;

F_{1-2} view faktor.

View faktor (úhlový součinitel [10], tvarový faktor) vyjadřuje část z celkového záření vyzářeného jedním povrchem, jež dopadá na druhý povrch.



Obr.11: Grafické znázornění definice view faktoru

Tepelný tok mezi povrchy dA_1 a dA_2 lze vyjádřit vztahem (38).

$$Q_{1-2} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi s^2} dA_1 dA_2 \quad (38)$$

Po porovnání se vztahem (39)

$$Q_{1-2} = A_1 \sigma F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (39)$$

se získá obecný vztah pro výpočet view faktoru (40).

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi s^2} dA_1 dA_2 \quad (40)$$

Pro výpočet view faktoru některých ploch a jejich vzájemných poloh jsou uvedeny zjednodušené vzorce v [10].

Dalším důležitým předpokladem při výpočtu je reciprocita view faktoru, která vychází ze znalosti vztahů pro výpočet sálání z dokonale černého tělesa -1 na dokonale černé těleso -2,

$$Q_{1-2} = A_1 F_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (41)$$

a stejně tak z tělesa -2 na těleso -1.

$$Q_{2-1} = A_2 F_{2-1} \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (42)$$

Z toho je zřejmé, že platí $Q_{1-2} = -Q_{2-1}$, tudíž i vztah (43).

$$A_1 F_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) = -A_2 F_{2-1} \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (43)$$

takže platí $A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1}$

Podkladem pro tuto podkapitolu byl zejména zdroj [8].

4.4.1 Ověření velikosti vlivu sálání na proces sdílení tepla

Aby se mohlo zjistit, jak velký vliv má sálání na celý proces tepelné výměny, bylo nutné vyrobit rámeček o tloušťce 40 mm, uprostřed s otvorem o rozměrech 102 mm x 102 mm (oblast měřená přístrojem), na nějž byla při prvním měření z každé strany přiložena aluminiová fólie s velmi nízkou emesivitou ($\varepsilon_{al}=0,03$ [9]). Čímž by se proces sálání měl minimalizovat (dle níže uvedeného vztahu 41). Druhé měření proběhlo bez přiložení fólie (viz tabulky 15 a 16).

Vliv emisivity na tepelný tok při sálání

Pro daný případ stejných emisivit povrchů a shodné velikosti ploch obou povrchů, lze výše uvedený vzorec 34 upravit na vztah (44);

$$\dot{Q} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{2 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon A} \right) + \frac{1}{A F_{1-2}}} \quad (44)$$

kde je

- ε emisivita povrchu desek;
 A plocha vymezená otvorem rámečku.

Tabulka 15 – Hodnoty pro měření s přiloženými aluminiovými fóliemi

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
21,64	19,19	0,033403

Tabulka 16 – Hodnoty pro měření bez aluminiových fólií

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
21,76	17,56	0,179297

Z naměřených hodnoty λ_{nam} je patrné, že sálání má v tomto případě na tepelnou výměnu značný vliv, jelikož hodnota naměřená při uzavření vzduchové dutiny aluminiovou fólií je znatelně menší, nežli hodnota naměřená bez použití fólií. To je zapříčiněné výrazně nižší hodnotou emisivity fólie oproti samotným deskám měřidla.

5 Numerické výpočty jednotlivých mechanismů

Pro přesnější určení vlivů jednotlivých mechanismů je nutné provést numerické výpočty. U výpočtu jednotlivých mechanismů tepelné výměny je nezbytné, aby byly pro každý mechanismus zavedeny navzájem porovnatelné součinitele. Pro vyjádření součinitele celkové výměny a součinitele zastupujícího vedení platí vztahy uvedené výše (27, 28).

Určení součinitele pro sálání

Pro určení součinitele vyjadřujícího zastoupení sálání bylo využito poznatku, že emisivita obou povrchů je stejná a plocha obou povrchů je též shodná, tudíž platí vztah (45).

$$\dot{Q} = \frac{\sigma \left(T_1^4 - T_2^4 \right)}{2 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon A} \right) + \frac{1}{AF_{1-2}}} \quad (45)$$

Pro možnost srovnání jednotlivých součinitelů je zaveden součinitel ξ , pro který platí, že $\dot{Q} = \xi A \Delta t$, z toho plyne

$$\xi = \frac{\sigma \left(T_1^4 - T_2^4 \right)}{\left(2 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) + \frac{1}{F_{1-2}} \right) \Delta t} \quad (46)$$

kde je:

ε emisivita povrchu desek (jež byla po konzultaci s výrobcem stanovena na hodnotu $\varepsilon=0,87$);

Δt rozdíl teplot na deskách.

Určení součinitele pro proudění

Bylo využito toho, že mohou probíhat pouze tři mechanismy (sálání, proudění a vedení).

Protože v daném případě platí $\dot{Q} = \dot{q}A$ a $\dot{q} = \frac{\lambda_{nam}}{s} \Delta t$, lze pro měrný tepelný tok \dot{q} , který je

konstantní, použít vztahy (47) a (48).

$$\dot{q} = \left(\alpha + \frac{\lambda}{s} + \xi \right) \Delta t \quad (47)$$

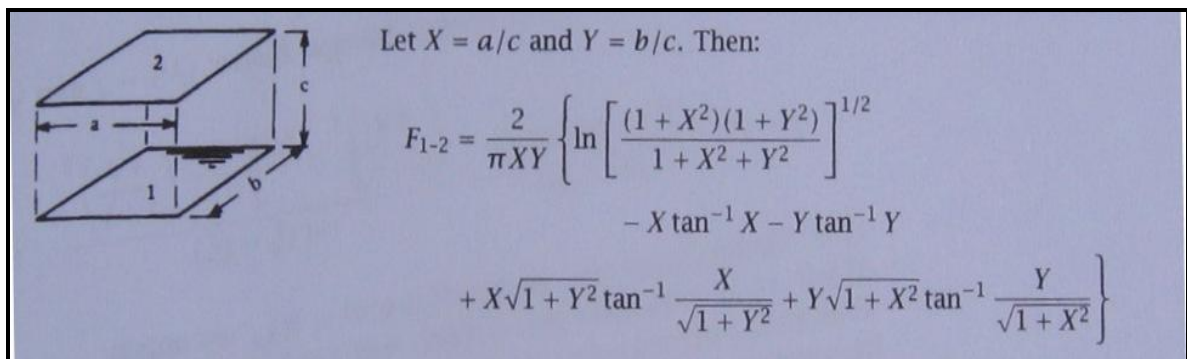
$$\frac{\lambda_{nam}}{s} = \left(\alpha + \frac{\lambda_{vzd}}{s} + \xi \right) \quad (48)$$

Z toho se dá určit součinitel α pro proudění.

$$\alpha = \left(\frac{\lambda_{nam}}{s} - \frac{\lambda_{vzd}}{s} - \xi \right) \quad (49)$$

View faktor

Pro dva koaxiální obdélníky v rovnoběžných rovinách lze přiřadit následující schéma uvedené na obr.12.



Obr.12: Obecný výpočet view faktoru [8]

Pro tato měření platí, že rozměry a a b jsou shodné, proto lze daný vztah upravit na:

$$F_{1-2} = \frac{2}{\pi X^2} \left\{ \ln \sqrt{\frac{(1+X^2)^2}{1+2X^2}} - 2X \operatorname{tg}^{-1}(X) + 2X\sqrt{1+X^2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \right) \right\} \quad (50)$$

Rozměr desek a je roven hodnotě 300 mm, vyjma případu měření s použitím rámečku (tloušťka vzduchové vrstvy 20mm a 40mm), kdy $a = 256$ mm.

Tabulka 17 – View faktor pro jednotlivé tloušťky vzduchové vrstvy

c [mm]	5.05	10.152	20.201	30.017	41.113
F_{1-2}	0.97	0.94	0.87	0.84	0.75

Podle výše uvedených vztahů byly v programu MS Excel pro dané parametry vypočteny následující hodnoty (viz tabulka 18).

Tabulka 18 – Vypočtené hodnoty jednotlivých mechanismů sdílení tepla pro dané tloušťky vzduchové vrstvy

Tloušťka [mm]	5,05	10,152	20,201	30,017	41,113
t_m [°C]	20,09	19,42	18,75	19,31	19,38
Δt [°C]	19,12	17,67	19,35	18,34	20,70
$\frac{\lambda_{nam}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	8,903	6,632	5,493	5,159	4,943
$\frac{\lambda_{vzd}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	4,549	2,266	1,139	0,767	0,559
ξ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	4,299	4,165	3,893	3,800	3,477
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	0,055	0,201	0,461	0,592	0,906

Z vypočtených hodnot je možné předpokládat, že vliv proudění se dá u malých rozměrů vzduchové vrstvy zanedbat. Nicméně s rostoucí tloušťkou vzduchové vrstvy je třeba vliv proudění brát v potaz. Bližší rozbor vlivu tloušťky vzduchové vrstvy na tepelnou výměnu je uveden v kapitole 7.

Jelikož prvotním záměrem této práce bylo zjistit, jaké děje se odehrávají ve vzduchové dutině při rozdílných teplotách na deskách přístroje, bylo nutné doplnit zjištěné poznatky numerickým výpočtem. Při výpočtu bylo nutné upravit vztah pro určení součinitele vyjadřujícího vliv sálání a zavést porovnatelný součinitel vyjadřující celkové sdílení tepla probíhající pouze ve vzduchové dutině.

6 Numerické výpočty ve vzduchové dutině

Pro tepelný tok platí vztah (51),

$$\dot{Q} = \frac{\sigma (T_x^4 - T_y^4)}{\left(\frac{1 - \varepsilon_{st}}{\varepsilon_{st} A} \right)_1 + \frac{1}{A_1 F_{1-2}} + \left(\frac{1 - \varepsilon_{st}}{\varepsilon_{st} A} \right)_2} \quad (51)$$

jelikož jsou plochy desek $A_1 = A_2$, dá se vztah zjednodušit na (52).

$$\dot{Q} = \frac{\sigma (T_x^4 - T_y^4)}{2 \left(\frac{1 - \varepsilon_{st}}{\varepsilon_{st} A} \right) + \frac{1}{A F_{1-2}}} \quad (52)$$

Aby bylo možné provést srovnání jednotlivých součinitelů je zaveden součinitel ξ , pro který platí, že $\dot{Q} = \xi A \Delta t$, z toho plyne:

$$\xi = \frac{\sigma (T_x^4 - T_y^4)}{\left(2 \left(\frac{1 - \varepsilon_{st}}{\varepsilon_{st}} \right) + \frac{1}{F_{1-2}} \right) (T_x - T_y)} \quad (53)$$

Určení součinitele celkové výměny ve vzduchové dutině

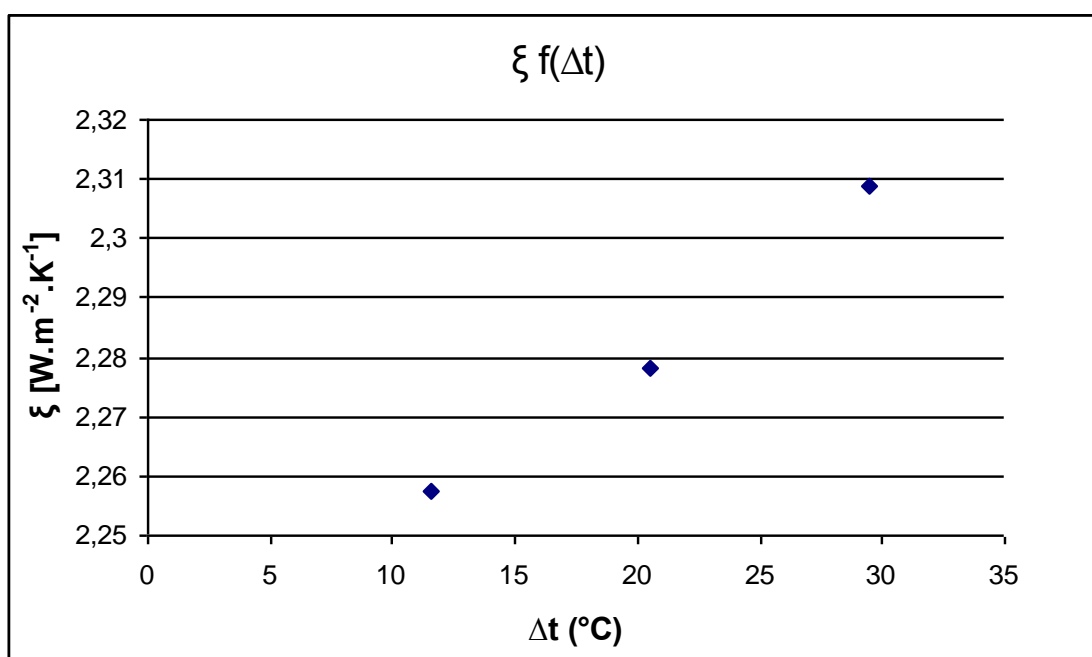
Pro určení tohoto součinitele byl použit vztah $\frac{\lambda_{vzd'}}{s_{vzd}}$, kde $\lambda_{vzd'}$ je lambda vzduchu ve vzduchové dutině a s_{vzd} je vzdálenost styrofoamových desek.

Podle výše uvedených vztahů byly v programu MS Excel pro dané parametry vypočteny následující hodnoty.

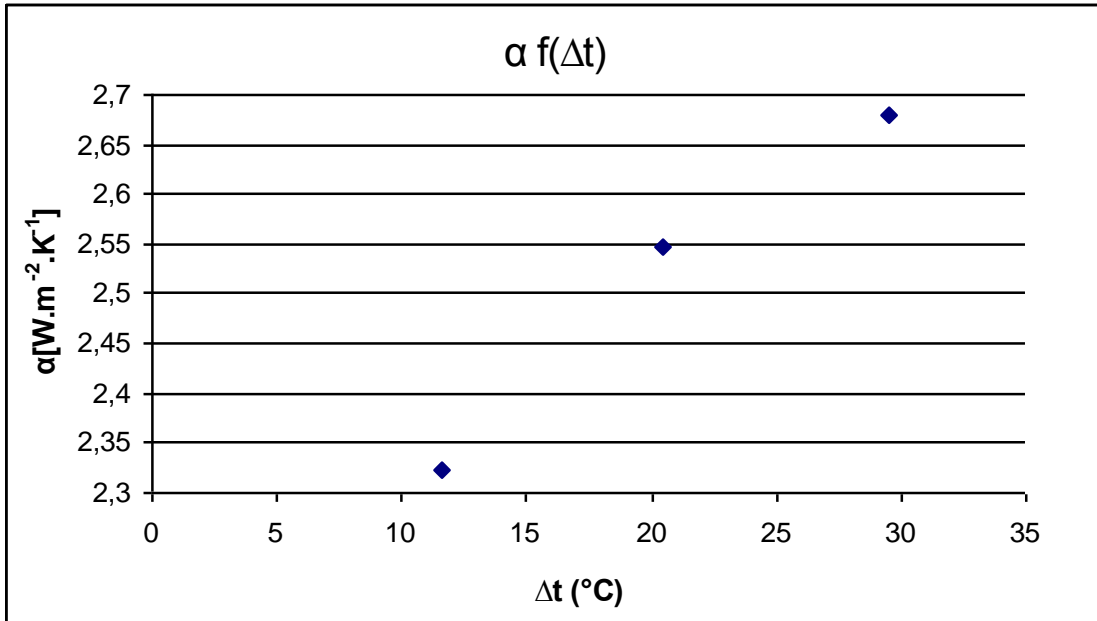
Vzduchová dutina 20 mm

Tabulka 19 – Hodnoty pro vzduchovou dutinu 20 mm

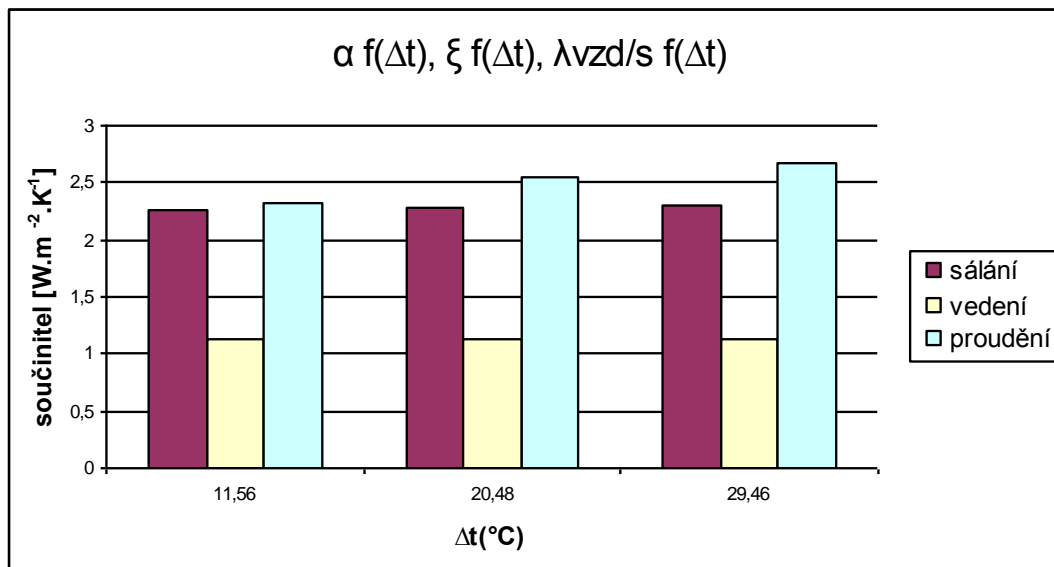
t_m [°C]	20,47	19,17	18,28
t_1 [°C]	35,20	29,41	24,06
t_2 [°C]	5,74	8,93	12,50
T_x [K]	295,15	293,37	291,98
T_y [K]	291,78	290,96	290,57
λ_{vzd} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,124	0,120	0,116
$\frac{\lambda_{vzd}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	6,126	5,964	5,720
$\frac{\lambda_{vzd}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	1,139	1,139	1,139
ξ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	2,309	2,278	2,258
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	2,679	2,547	2,324



Obr.13: Závislost sálání na Δt



Obr.14: Závislost proudění na Δt

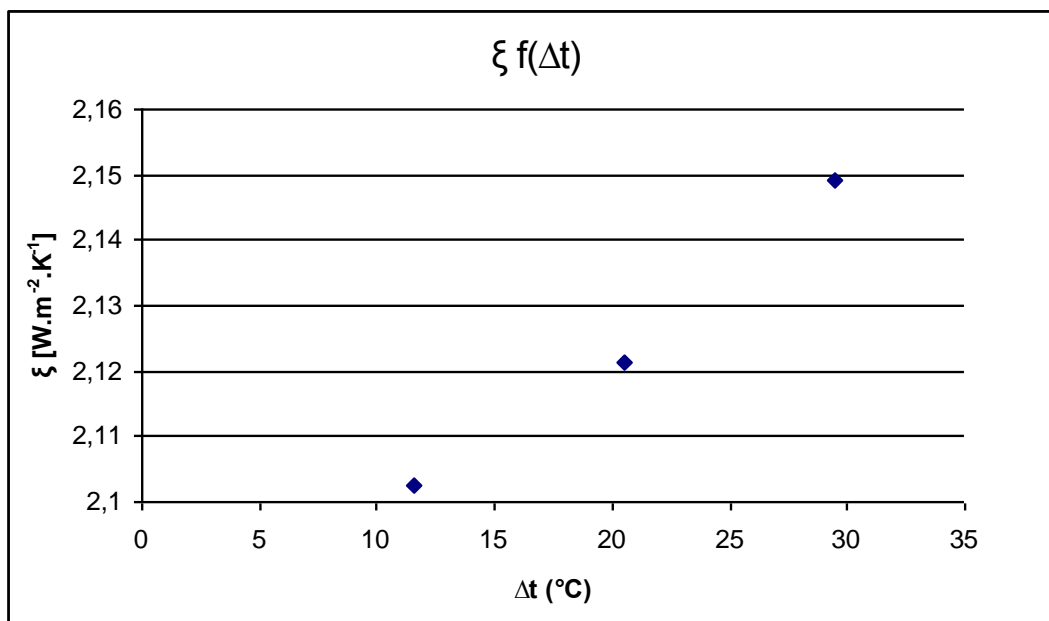


Obr.15: Porovnání všech mechanismů sdílení tepla na Δt

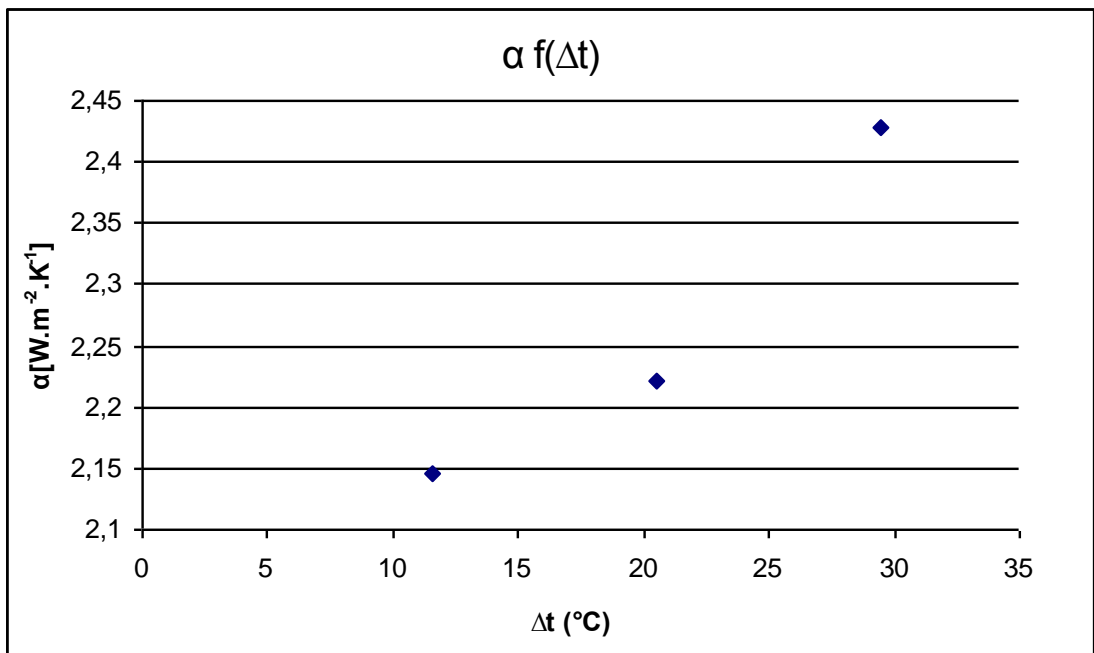
Vzduchová dutina 40 mm

Tabulka 20 – Hodnoty pro vzduchovou dutinu 40mm

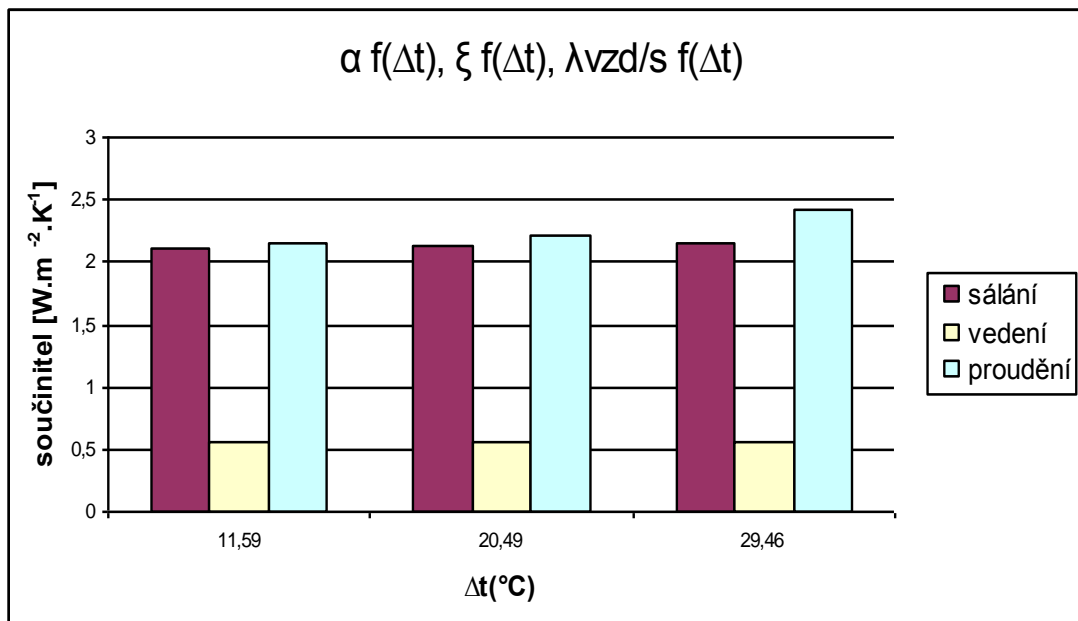
t_m [°C]	18,31	19,18	20,44
t_1 [°C]	24,11	29,43	35,17
t_2 [°C]	12,52	8,94	5,71
T_x [K]	292,13	293,60	295,40
T_y [K]	290,48	290,75	291,47
λ_{vzd} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,198	0,202	0,211
$\frac{\lambda_{vzd}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	4,808	4,901	5,136
$\frac{\lambda_{vzd}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	0,559	0,559	0,559
ξ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	2,103	2,121	2,149
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	2,146	2,221	2,428



Obr.16: Závislost vlivu sálání na Δt



Obr.17: Závislost vlivu proudění na Δt



Obr.18: Porovnání všech mechanismů sdílení tepla na Δt

Shrnutí výsledků:

Z grafického znázornění je patrný nezanedbatelný vliv proudění, který je dokonce výraznější nežli vliv vedení i sálání. Můžeme také sledovat jeho rostoucí tendenci v závislosti na rostoucím rozdílu teplot na deskách. Stejná závislost je patrná i u sálání a naměřených hodnot λ_{nam} . U všech tří charakteristik je též možné vysledovat téměř lineární závislost na Δt .

Při porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro rozdílné velikosti vzduchové dutiny se zjistilo, že hodnoty λ_{nam} a λ_{vzd} s rostoucí vzdáleností rostou. Avšak s rostoucí vzdáleností klesá vliv vedení a velikost součinitelů vyjadřujících sálání i proudění (viz tabulka 21).

Tabulka 21 – Shrnutí výsledků pro obě mezery

	20			40		
Tloušťka [mm]	20,201			41,113		
F_{1-2}	0,87			0,75		
Δt [°C]	11,56	20,48	29,46	11,59	20,49	29,46
ΔT [°C]	1,41	2,40	3,38	1,64	2,85	3,94
λ_{vzd} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,116	0,120	0,124	0,198	0,202	0,211
$\frac{\lambda_{vzd'}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	5,720	5,964	6,126	4,808	4,901	5,136
$\frac{\lambda_{vzd}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	1,139	1,139	1,139	0,559	0,559	0,559
ξ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	2,258	2,278	2,309	2,103	2,121	2,149
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	2,324	2,547	2,679	2,146	2,221	2,428

7 Závislost jednotlivých mechanismů na tloušťce vzduchové vrstvy za stejné teploty spodní desky

Při těchto měřeních byla zjišťována možná závislost mezi velikostí vlivu vedení, sálání a proudění na tloušťce vzduchové vrstvy. Byla použita metoda, při níž teplota spodní desky byla konstantní. Měnil se pouze rozdíl teplot mezi deskami, a tím i střední teplotu. Pro měření byly použity vzduchové vrstvy 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm a 40 mm. K výpočtům byly použity stejné vztahy jako v kapitole 5. Pro přehlednost je vždy uvedená vzdálenost desek, a pro každou je nejprve zobrazená tabulka s naměřenými hodnotami a pak tabulka s vypočtenými hodnotami.

Vzdálenost desek 5mm

Tabulka 22 – Naměřené hodnoty pro $d = 5,05$ mm

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
14,00	9,48	0,043317
16,80	13,15	0,044224
20,09	19,12	0,045013
23,11	22,67	0,046163

Tabulka 23 – Vypočítané hodnoty pro $d = 5,05$ mm

t_m [°C]	14,00	16,80	20,09	23,11
Δt [°C]	9,48	13,15	19,12	22,37
$\frac{\lambda_{nam}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	8,567	8,747	8,903	9,130
$\frac{\lambda_{vzd}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	4,549	4,549	4,549	4,549
ξ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	4,033	4,153	4,299	4,435
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	-0,015	0,045	0,055	0,147

Vzdálenost desek 10mm

Tabulka 24 – Naměřené hodnoty pro $d = 10,152$ mm

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
14,01	9,97	0,064482
16,77	13,81	0,065910
19,42	17,67	0,067327
23,59	24,17	0,069576

Tabulka 25 - Vypočítané hodnoty pro d = 10,152 mm

t_m [°C]	14,01	16,77	19,42	23,59
Δt [°C]	9,97	13,81	17,67	24,17
$\frac{\lambda_{nam}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	6,352	6,492	6,632	6,853
$\frac{\lambda_{vzd}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	2,266	2,266	2,266	2,266
ξ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	3,936	4,052	4,165	4,349
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	0,150	0,175	0,201	0,238

Vzdálenost desek 20mm

Tabulka 26 – Naměřené hodnoty pro d = 20,201 mm

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
13,96	10,23	0,105816
16,63	14,18	0,108269
18,75	19,35	0,110956
22,23	22,04	0,113906

Tabulka 27 - Vypočítané hodnoty pro d = 20,201 mm

t_m [°C]	13,96	16,63	18,75	22,23
Δt [°C]	10,23	14,18	19,35	22,04
$\frac{\lambda_{nam}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	5,238	5,360	5,493	5,639
$\frac{\lambda_{vzd}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	1,139	1,139	1,139	1,139
ξ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	3,702	3,807	3,893	4,035
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	0,398	0,414	0,461	0,465

Vzdálenost desek 30mm

Tabulka 28 – Naměřené hodnoty pro d = 30,017 mm

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
13,92	10,39	0,146735
16,65	14,33	0,151068
19,31	18,34	0,154757
22,21	22,27	0,159111

Tabulka 29 - Vypočítané hodnoty pro d = 30,017 mm

t_m [°C]	13,92	16,65	19,31	22,21
Δt [°C]	10,39	14,33	18,34	22,27
$\frac{\lambda_{nam}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	4,891	5,036	5,159	5,304
$\frac{\lambda_{vzd}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	0,767	0,767	0,767	0,767
ξ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	3,591	3,696	3,800	3,916
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	0,533	0,573	0,592	0,621

Vzdálenost desek 40mm

Tabulka 30 – Naměřené hodnoty pro $d = 41,113\text{mm}$

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
13,86	10,42	0,189194
16,58	14,42	0,194216
22,10	22,38	0,205216
25,70	27,34	0,211969

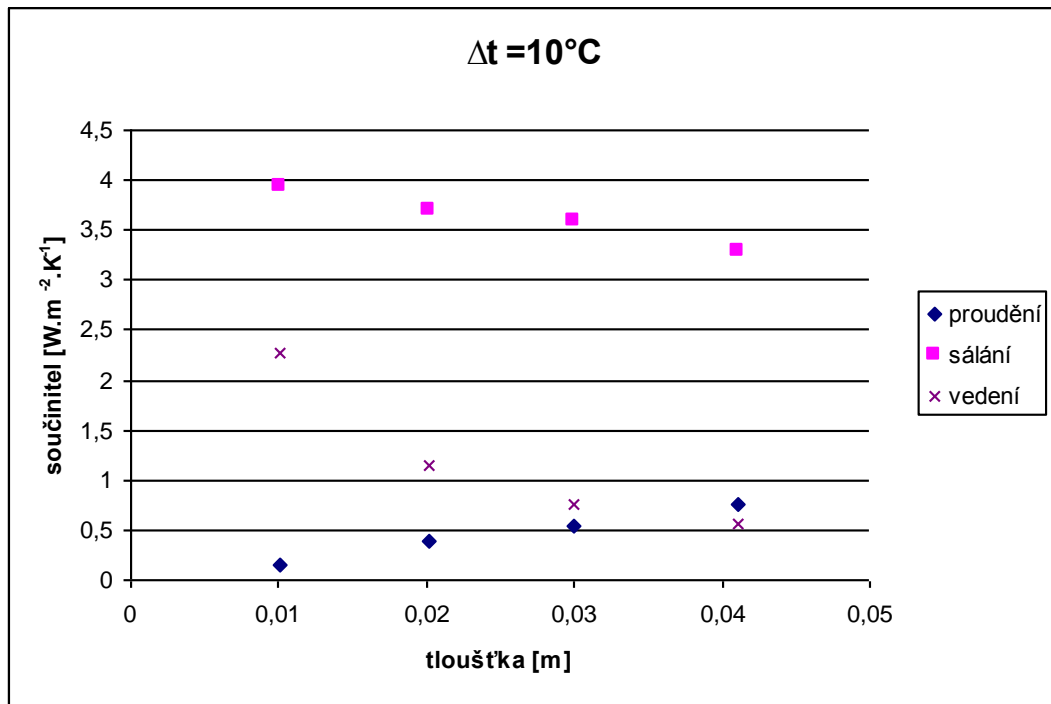
Tabulka 31 - Vypočítané hodnoty pro $d = 41,113\text{mm}$

t_m [°C]	13,86	16,58	22,10	25,70
Δt [°C]	10,42	14,42	22,38	27,34
$\frac{\lambda_{nam}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	4,602	4,724	4,992	5,156
$\frac{\lambda_{vzd}}{s}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	0,559	0,559	0,559	0,559
ξ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	3,281	3,376	3,576	3,711
α [W.m ⁻² .K ⁻¹]	0,761	0,788	0,856	0,885

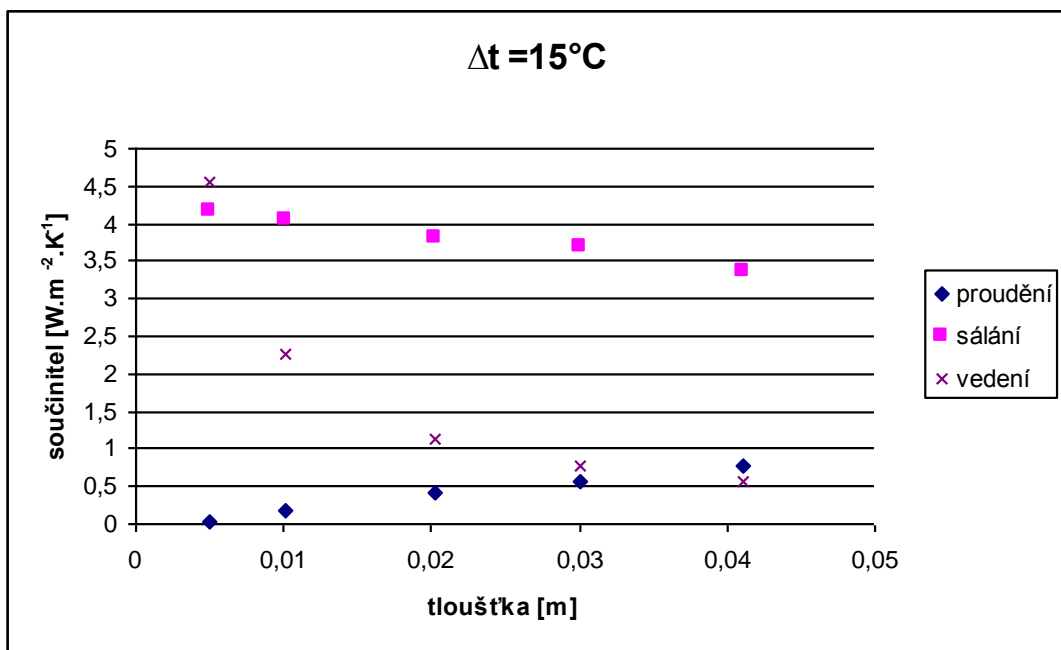
Shrnutí výsledků

Při pozorování změn vlivu jednotlivých mechanismů tepelné výměny při stejném rozdílu teplot na deskách v závislosti na velikosti vzduchové vrstvy je možné pozorovat klesající tendenci vlivu sáláním a vedením. U proudění lze pozorovat sílící vliv s rostoucími hodnotami t_m a Δt , nicméně nepodařilo se potvrdit předpoklad z kapitoly 4, že charakteristickým rozměrem je tloušťka vzduchové vrstvy, jelikož velikost proudění nesílí s její třetí mocninou. Dále je možné u sálání a proudění sledovat přibližně lineární průběh závislosti na vzduchové vrstvě. Průběh vedení má hyperbolický charakter.

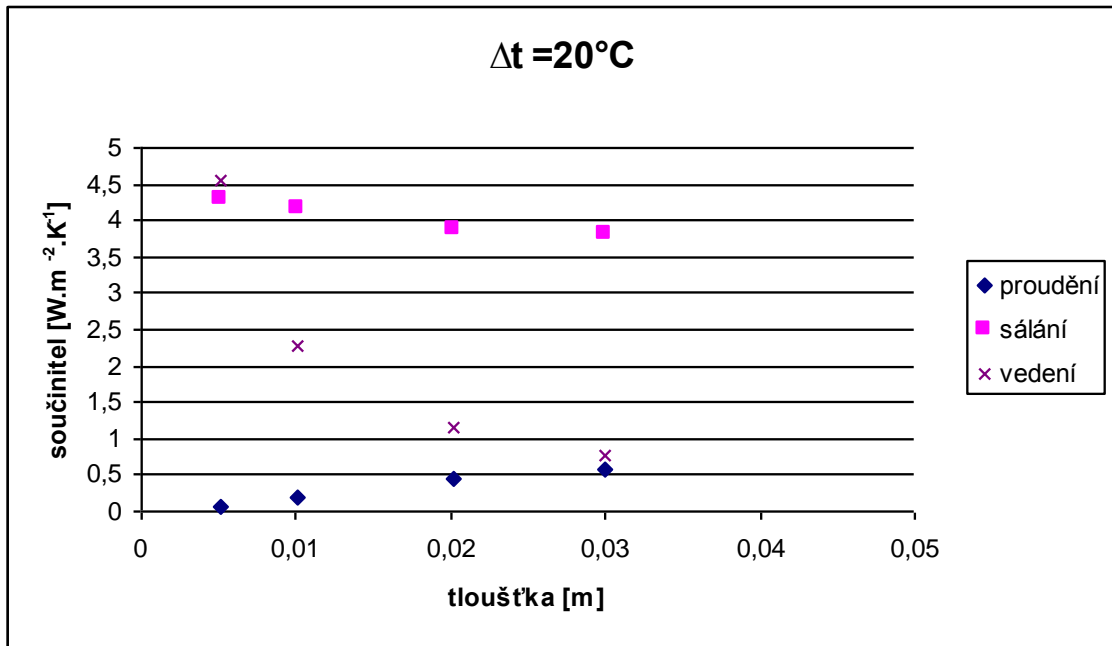
Taktéž je zřejmé, že hodnoty λ_{nam} naměřené přístrojem rostou se zvětšující se tloušťkou vzduchové vrstvy (viz obr.19-22).



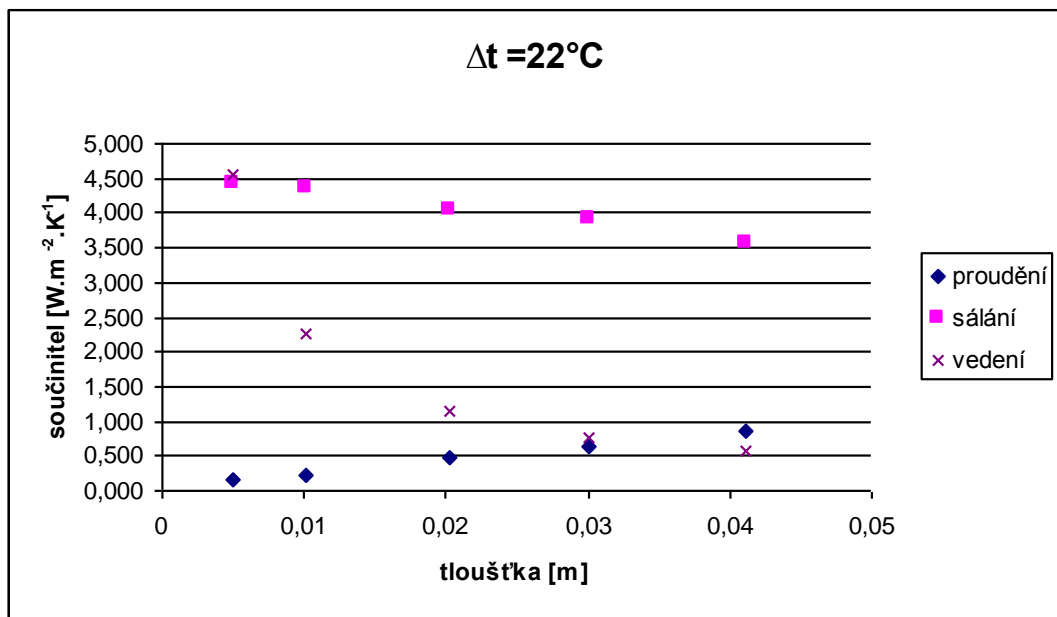
Obr.19: Závislost jednotlivých mechanismů sdílení tepla na tloušťce vzduchové vrstvy při $\Delta t = 10^\circ\text{C}$



Obr.20: Závislost jednotlivých mechanismů sdílení tepla na tloušťce vzduchové vrstvy při $\Delta t = 15^\circ\text{C}$



Obr.21: Závislost jednotlivých mechanismů sdílení tepla na tloušťce vzduchové vrstvy při $\Delta t=20^\circ\text{C}$



Obr.22: Závislost jednotlivých mechanismů sdílení tepla na tloušťce vzduchové vrstvy při $\Delta t=22^\circ\text{C}$

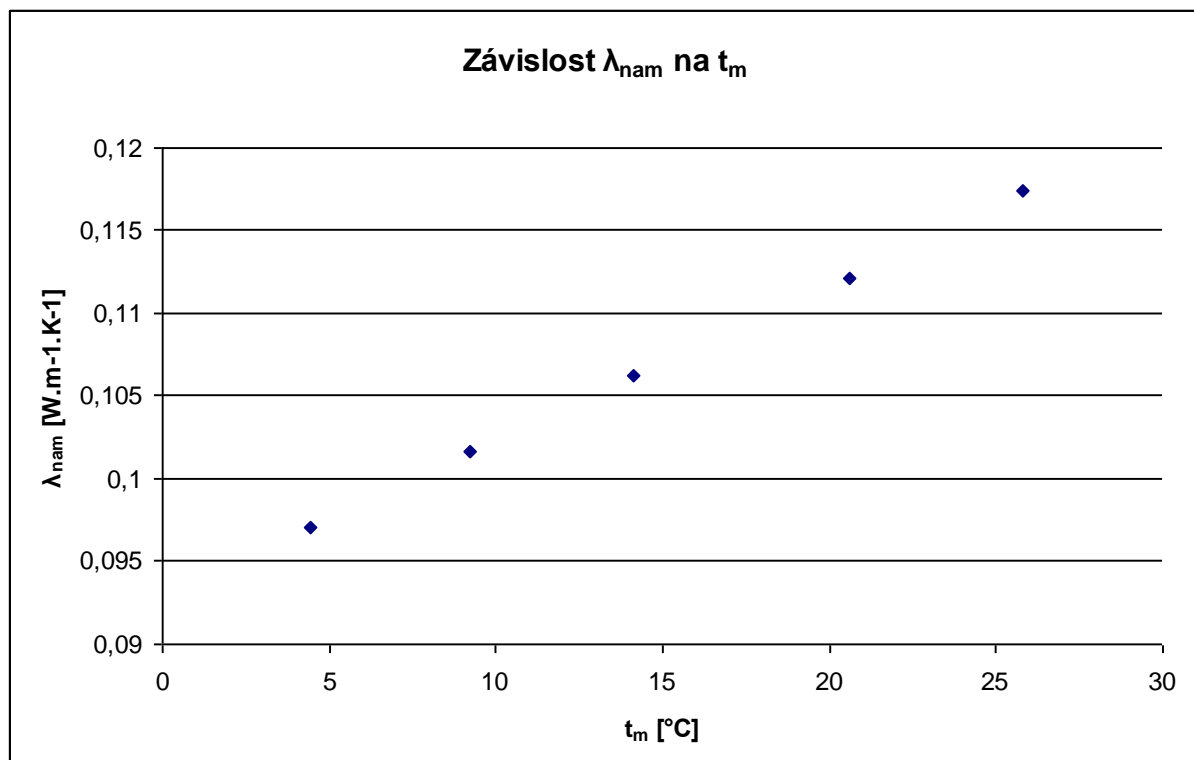
8 Ověření přesnosti měření

8.1 Vliv nízkých teplot na naměřené závislosti

Cílem těchto měření bylo zjistit, zda nejsou naměřené hodnoty při nastavených nízkých teplotách ovlivněny kondenzací vodní páry na deskách přístroje. K ověření tohoto tvrzení byly naměřeny hodnoty λ_{nam} pro 20 mm vrstvu vzduchové vrstvy (bez rámečku) pro $\Delta t=10^{\circ}\text{C}$ a t_m v intervalu od 5°C do 25°C . Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulce 32 a v obr.23.

Tabulka 32 – Naměřené hodnoty

t_m [$^{\circ}\text{C}$]	Δt [$^{\circ}\text{C}$]	λ_{nam} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
4,43	9,80	0,097055
9,25	9,99	0,101683
14,10	10,00	0,106257
20,59	9,94	0,112147
25,78	9,98	0,117434



Obr.23: Závislost naměřených hodnot na velikosti střední teploty

Kondenzace se jistě projevila při $t_m = 4,43^\circ\text{C}$, nicméně z uvedeného grafu je patrné, že tento bod z posloupnosti hodnot výrazně nevybočuje, tudíž závislost naměřených hodnot λ_{nam} na střední teplotě t_m lze považovat pro námi využití teploty za lineární. Žádné ovlivnění hodnot λ_{nam} při měřených nízkých teplotách není patrné, Takže vliv kondenzace na deskách přístroje při měření je možné vyloučit.

8.2 Vliv proudění způsobeného únikem vzduchu neutěsněnými částmi měřícího přístroje

Při těchto měřeních byla snaha zjistit, zda hodnoty vypočteného součinitele pro sdílení tepla prouděním nejsou eventuelně způsobeny prouděním vzduchu vlivem ne zcela těsného uspořádání jednotlivých součástí měřícího zařízení. Jediným možným způsobem úniku vzduchu, k němuž by mohlo docházet, je po stranách desek přístroje, které kvůli možnosti nastavitelnosti vzájemné vzdálenosti dokonale nepřiléhají ke stěnám přístroje (o těsnost v těchto místech se stará pouze gumová membrána).

Za účelem zjištění kvality tohoto utěsnění byl využit 40 mm vysoký rámeček se dnem na jedné straně, jež byl původně určen k měření součinitele tepelné vodivosti sypkých materiálů. Jedno měření bylo provedeno se dnem u horní (teplejší) desky, a druhé se dnem u spodní (studenější desky). Dále bylo využito údajů pro shodné nastavení 20 mm vzduchové vrstvy měřené jednak pomocí rámečku, jež by případnému úniku vzduchu podél stěn měl zabraňovat, ale také bez něj.

8.2.1 Ověření pomocí rámečku se dnem

Tabulka 33 - Rámeček 40 mm se dnem u horní desky přístroje

t_m [$^\circ\text{C}$]	Δt [$^\circ\text{C}$]	λ_{nam} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
19,94	9,99	0,045381

Tabulka 34 - Rámeček 40 mm se dnem u dolní desky přístroje

t_m [$^\circ\text{C}$]	Δt [$^\circ\text{C}$]	λ_{nam} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
19,99	9,81	0,047099

Předpokladem tohoto měření bylo, že v případě netěsností by měla být naměřena výrazně vyšší hodnota v případě rámečku se dnem u studenější desky přístroje, jelikož by teplejší

vzduch unikal kolem vrchní desky. Hodnoty pro obě nastavení vyšly téměř totožné, proto k proudění způsobeného únikem vzduchu neutěsněnými částmi měřicího přístroje nedochází.

8.2.2 Ověření pomocí shodného nastavení pro měření s rámečkem a bez dna

Tabulka 35 - Vzduchová vrstva 20mm s rámečkem

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
13,96	10,23	0,105816

Tabulka 36 - Vzduchová vrstva 20mm bez rámečku

t_m [°C]	Δt [°C]	λ_{nam} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
14,10	10,00	0,106257

U tohoto měření je možné sledovat ověření výsledků z předchozího pokusu. Hodnoty λ_{nam} u měření s rámečkem i bez něj vyšly pouze se zanedbatelnou odchylkou. Proto lze soudit, že k úniku vzduchu podél stěn přístroje nedochází.

9 Ovlivnění přesnosti numerických výpočtů

Při numerických výpočtech lze usuzovat na menší odchylky od reálných hodnot a to z důvodů zanedbání některých faktorů zejména kvůli jejich malému vlivu na daný proces nebo z důvodů časových. Během svých výpočtů jsem do výsledných hodnot nezahrnul vliv sálání z bočních stěn. Dále jsem neuvažoval závislost součinitele tepelné vodivosti vzduchu na teplotě, jelikož jeho vliv na výsledné hodnoty je zanedbatelný a hodnoty uvedené v literatuře se neshodují natolik, aby se daly jednoznačně použít pro výpočet. Také jsem zanedbal vliv nerovnoměrného dopadu tepelného toku na desky přístroje při výpočtu view faktoru, protože odchylky způsobené předpokladem jeho konstantní hodnoty byly minimální.

Též je nutné poznamenat, že tabulkové hodnoty emisivity pro aluminiovou fólii i povrch desek přístroje jsou uvedeny v intervalech a tudíž zejména při výpočtu s aluminiovou fólií mohlo díky tomu dojít k menší nepřesnosti při zjišťování vlivu sálání.

10 Závěr

Během ověřování izolačních vlastností horizontálně orientované vzduchové dutiny bylo zjištěno, že při daném uspořádání s teplejší horní deskou a studenější spodní deskou, dochází i k jiným mechanismům sdílení tepla, nežli pouze k vedení. Jak ukázala další měření velký vliv na tepelnou výměnu má sálání, avšak i navzdory obecným předpokladům bylo zjištěno, že dochází i k samovolnému proudění. Tato zjištění byla potvrzena i výpočty. Nicméně z časových důvodů se podařilo dokázat závislosti Rayleighova čísla pouze na střední teplotě a rozdílu teplot na deskách měřícího přístroje. Avšak nepodařilo se již určit, co je v tomto případě charakteristickým rozměrem (měření vyvrátila předpoklad, že jím je vzdálenost desek měřícího přístroje).

Pro velikosti vlivu sálání a proudění ve vzduchové dutině jsou vypočtené hodnoty lehce odchýleny od hodnot reálných, jelikož se neuvažoval vliv sálání bočních stěn, což by zvětšilo podíl výsledné hodnoty sálání na úkor proudění. I přesto je však vliv proudění překvapivě veliký.

Závěrem mé práce je třeba podotknout, že i přes původní předpoklady, horizontálně orientovaná vzduchová dutina zhoršuje izolační vlastnosti materiálu a proto není vhodné její využití za účelem snížení tepelné výměny s okolním prostředím.

Seznam literatury

- [1] HOTEL H.C., SAROFIM A.F.: *Přenos tepla zářením*. Praha: SNTL Praha 1979. Český překlad titulu Radiative heat transfer, ISBN 80-04-217-79
- [2] Návod k použití Lambda HFM 436/1E, NETZSCH-Gerätebau GmbH
- [3] ŠULC J., KRYŠTŮFEK P.: Měření součinitele tepelné vodivosti pomocí měřicího zařízení HFM 436/3/1E Lambda, *Stavebnictví a interiér*, Ročník 16, č.11, Hradec Králové, Vega s.r.o., 2008, ISSN 1801-4399
- [4] *Vedení tepla* [online], <http://cs.wikipedia.org/wiki/Veden%C3%AD_tepla> [cit. 2009-02-4]
- [5] KMONÍČEK V., STŘEDA M.I., DOUBRAVA I.: *Termomechanika*. Praha: ČVUT Praha 1987
- [6] *Obecné informace a technické údaje* [online], <http://building.dow.com/europe/cz/prod/tech/sm_iba.htm> [cit. 2008-11-19]
- [7] CENGEL Y.A.: *Heat transfer*. McGraw Hill Professional, 2003, ISBN 0072458933
- [8] LIENHARD J.H. IV., LIENHARD J.H. V.: *A Heat Transfer Textbook*, 3rd edition, Phlogiston press, Cambridge Massachusetts, 2008
- [9] *Emissivity Values for Common Materiále* [online], <<http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm>> [cit. 2009-01-9]
- [10] HLAVAČKA V.: Seriál tabulek, *Strojirenství*, svazek 25, č.5, Praha: SNTL Praha 1975