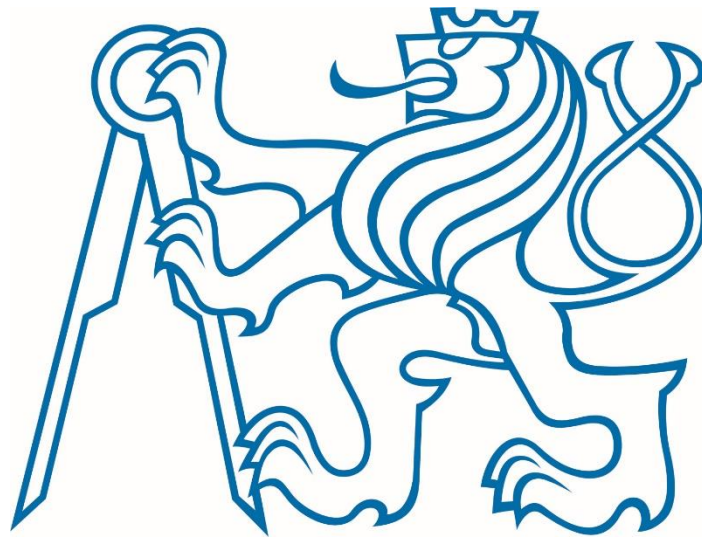


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY**



**Vliv větru na přesnost termografických
měření v elektroenergetice**

Praha 2015

Autor: Tomáš Tichý

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

Podpis:

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Tomáš Tichý

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Vliv větru na přesnost termografických měření v elektroenergetice**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s principy a současným stavem techniky termografie.
- 2) Seznamte se se sdílením tepla konvekci a sáláním včetně použití bezrozměrných kritérií podobnosti.
- 3) Analyzujte vliv větru na přesnost měření teploty vybraných používaných uspořádání (válcový a pasový vodič, šroubový spoj vodičů).
- 4) Podle možností ověřte výsledky výpočtů měřením.

Seznam odborné literatury:

- [1] John H. Leinhard IV, John H. Leinhard V: A Heat Transfer Textbook, Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, Third Edition
- [2] M. Sazima a kol. : Sdílení tepla, SNTL 1993
- [3] J.P. Holman: Heat Transfer McGraw-Hill, 1963
- [4] N. A. Michejev: Základy sdílení tepla, Státní technické nakladatelství, Praha 1952

Vedoucí: doc. Jan Kyncl Dr. Ing.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Doc. Dr. Ing. Janu Kynclovi za odbornou a velmi ochotnou pomoc při tvoření této práce. Za odbornou konzultaci bych chtěl rovněž poděkovat doktorandům Ing. Zdeňku Novákovi, Ing. Luboši Musálkovi a Ing. Adithia Hariram za doporučený výběr anglické literatury a asistenci při čerpání z těchto zdrojů. Rovněž nesmím zapomenout poděkovat svému spolužákovi a kamarádovi Danielu Havlíkovi za obětavou pomoc při provádění měřicích experimentů. Veliké poděkování patří ing. Janu Kovářovi ze společnosti Workswell, za uvedení do problematiky termografie a poskytnutí potřebné měřicí techniky. V neposlední řadě patří poděkování celé katedře elektroenergetiky za poskytnutí prostor pro měření a za trpělivou asistenci při praktickém měření.

Anotace:

Práce se zaměřuje především na problematiku termografických měření šroubových spojů ve venkovních prostorách za působení větru. V praxi se toto měření používá pro monitorování a diagnostiku stavu šroubových spojů, použitých pro přenos elektrické energie. Šroubový spoj ve špatném technickém stavu může vykazovat nadměrné zahřívání, což bez periodických kontrol či špatným způsobem měření může vést ke zbytečným ztrátám, nebo dokonce až k požáru. Vytoužený cíl práce je navrhnout nové praktiky, podle nichž by se mohlo v budoucnu při měřeních postupovat.

Annotation:

This thesis is focused on problematic of thermographic measuring of screw connection in outside areas, where these objects are influenced by wind. In practice these measurements are used for monitoring and diagnostic status of screw connections, used for electrical energy transfer. Bad screw connection is often heated, what is problem, because without periodic measurement, or bad measure practice, could have bad screw connect wasted loses, or heated connect could start a fire. The purpose of this work, is to suggest new measuring principles, which should be used in future measuring.

Obsah:

Prohlášení	2
Zadání	3
Poděkování	4
Anotace	5
Obsah	6
Úvod	8
Seznam symbolů a zkratek	9
1. Termografie	10
1.1. Kontaktní a bezkontaktní měření teploty	10
1.2. Funkce termografické kamery	12
2. Vznik tepla a ztrátového výkonu	15
3. Sdílení tepla	18
3.1. Sdílení tepla kondukcí	18
3.2. Sdílení tepla radiací	20
3.3. Sdílení tepla samovolnou konvekcí	21
3.4. Sdílení tepla nucenou konvekcí	25
3.5. Reynoldsovo číslo	26
4. Korekce pro jednodušší geometrický objekt	28
4.1. Praktická měření a jejich vyhodnocení	29
5. Korekce pro šroubový spoj	33
5.1. Měření na modelu šroubového spoje	35
5.2. Navrhovaná opatření pro praktická měření	36
5.3. Měření na rovnoběžném šroubovém spoji	38
6. Závěr	41

7. Použité zdroje	42
8. Seznam příloh	44
9. Seznam grafů	45
10. Seznam obrázků	55
11. Seznam tabulek	64

Úvod:

Důvodem sepsání této práce bylo kromě snahy zlepšit současné termografické techniky i snaha dozvědět se a následně čtenáře seznámit s tepelnými ději a procesy, které se takřka nevědomky ve světě kolem nás dějí. S tepelnými účinky a jejich použitím se lidstvo setkává takřka od počátku své existence, což mohou dokázat i velmi stará literární díla poukazující na tuto problematiku. Na mysli mám například vybrané příběhy ze starých řeckých bájí, kde se lidé setkávají s pozitivními i negativními účinky tepelné energie. A pokud se objektivně podíváme na historii lidského rodu a evoluci člověka, je tato dlouhá cesta neustále (až dodnes) provázena bojem za tepelnou pohodu, jak praví zdroj (16).

Na začátek by bylo vhodné, jak pro čtenáře, tak pro autora, seznámit se a popsat současné termografické metody, techniky a principy. Tomu se bude věnovat kapitola 1, ve které si popíšeme, co vlastně termografie je a jak fungují současné termografické přístroje. V druhé kapitole se pak podíváme na podstatu vzniku tepla při elektrických dějích a na tepelnou energii na úrovni mikrosvěta. Samotný vznik tepla ovšem nestačí. Je totiž nutné tepelnou energii transportovat, čemuž se bude věnovat hned následující kapitola, věnovaná sdílení tepla. To je pro danou problematiku velice důležité, takže v podkapitolách o konvekci budou popsány i současné metody výpočtů, včetně odhalení teorie podobnosti.

Po nabytí teoretických znalostí překročíme k experimentálnímu ověření platnosti poznatků a pokusíme se i o korekci termografického měření, které probíhalo při působení větru. Nejdříve se pokusíme dopočítat korekci pro měření jednoduchého geometrického objektu, poněvadž předpokládáme, že pro jednodušší objekty budou teoretické poznatky spíše platné. Pokud uspějeme, pokusíme se při stejných podmínkách vypočítat korekci i pro složitější objekt. A jako úplný cíl práce bychom se chtěli zabývat korekcí pro reálný případ špatného šroubového spoje, který je vystaven venkovnímu prostředí. Snad bude tedy experimentům časový harmonogram nakloněn a povede se je úspěšně odměřit a v této práci zpracovat.

Seznam symbolů a zkratek

IR	Infra red- infra červené (často ve spojení infra červené záření)
AČT	Absolutně černé těleso. Fyzikální model tělesa, které dokonale pohlcuje záření celého elektromagnetického spektra a současně je to ideální zářič, popsáný Planckovým vyzařovacím zákonem.
Findroot	Funkce ve výpočetním softwaru mathematica
Normální atmosférický tlak	Průměrná hodnota atmosférického tlaku v úrovni mořské hladiny, stanovená na: 101325Pa
Ustálený stav teplot	Takový stav, kdy se teplota nezmění o jeden kelvin v průběhu jedné hodiny

Fyzikální jednotky:

°C	Stupeň Celsia. Jednotka pro vyjádření teploty	[-273.15 K]
K	Kelvin. Jednotka pro vyjádření teploty	

Veličiny:

Q	Tepelná energie	[J]
J	Proudová hustota	[A * m ⁻²]
E	Intenzita elektrického pole	[V * m ⁻¹]
T	Termodynamická teplota	[K] / [°C]
P	Výkon – například tepelný	[W]
Q _d	Dopadající zářivý výkon	[W]
Q _α	Pohlčený zářivý výkon	[W]
Q _τ	Prostoupený zářivý výkon	[W]
Q _ρ	Odražený zářivý výkon	[W]
Q _ε	Vyzářený zářivý výkon	[W]

1. Termografie

1.1 Kontaktní a bezkontaktní měření teploty

Termografie je měřicí metoda, při níž můžeme sledovat a znázorňovat rozložení teploty na povrchu měřeného objektu. Při kontaktní měření je nutno, jak již název měřicí metody napovídá, zajistit kontakt měřicího čidla a pozorovaného objektu. Měřicím čidlem může být termočlánek, polovodičové čidlo či kovové čidlo. Čidlo pro snímání teploty se volí podle předpokládaných teplot, které budeme měřit, způsobu vyhodnocení signálu z čidla, požadované přesnosti dalších preferencí. Ať již je použito jakékoliv čidlo, nutný kontakt s měřeným objektem způsobí tepelné ztráty, neboť část tepla bude unikat do čidla, což se projeví tak, že měříme teplotu čidla, která je obecně jiná než teplota, kterou chceme měřit. Při použití kontaktní metody se tedy dopustíme vždy jisté nepřesnosti. Pro jisté aplikace může ovšem být tato principiální nejistota zanedbatelná, případně korigovaná výpočtem tepelných polí. Další nedostatek je opět v nutnosti tepelného kontaktu. Záleží totiž na jeho kvalitě z hlediska tepelné kondukce. Jinou teplotu tedy naměříme, pokud pro místo styku použijeme například teplovodnou pastu. Teplotu navíc změříme pouze v bodě přiložení teplotního čidla, a pokud chceme znát rozložení teploty po celém objektu, musíme čidlo přemisťovat, nebo měřit několika čidly zároveň, čímž ale roste chyba.

Kontaktní měření při provozu zařízení může také znamenat práci pod napětím se všemi bezpečnostními souvislostmi. Pro měření v elektroenergetice se obecně kontaktní termografie nehodí, poněvadž měření totiž často probíhá za provozu zařízení. Mnohdy se ovšem využívají metody kontaktního měření teploty spolu s termografií bezkontaktní k určení emisivity pozorovaného objektu (viz kapitola 1.2 Funkce termografické kamery).

Obecně se jedná o poměrně levnou metodu měření teploty s přijatelnou přesností, takže se v řadě oblastí průmyslu hojně využívá.

Bezkontaktní termografie byla experimentálně použita okolo roku 1900, kdy pomocí zapojení tepelných platinových detektorů (viz kapitola 1.2 Funkce termografické kamery) do Wheatsoneova můstku byli lidé schopni registrovat teplo z živého skotu ve vzdálenosti až čtvrt míle. Ve veterinářské praxi, jakožto i lékařské praxi, se dnes bezkontaktní termografie používá běžně. Příkladem je obrázek 1, pomocí kterého byl pacientovi diagnostikován natržený sval.

Bezkontaktní termografie má ovšem velmi široké spektrum využití, proto se nyní podíváme na využití v elektroenergetice.

Bezkontaktní termografie je pro elektroenergetické účely optimální, protože můžeme s dosti velikou přesností změřit teplotu sledovaného objektu, a to aniž bychom museli zajistit fyzický kontakt měřicího zařízení a měřeného objektu. Pomocí bezkontaktní termografie je tedy možné změřit například teplotu objektu, který je pod napětím. Pro samotné měření teploty se dnes nejčastěji používá infračervená termografická kamera. Není to ale jediná možnost bezdotykového měření teploty. Můžeme se setkat ještě například s IR teploměry, též zvanými pyrometry. IR teploměry fungují stejně jako termografická kamera, pouze s rozlišením 1X1. Umí tedy určit teplotu pouze v konkrétním bodě, nikoliv rozložení teploty na povrchu objektu v jednom časovém okamžiku.

Název pyrometr má kořeny v řečtině, ve které “pyr“ znamená hořet a “metrin“ označuje měření. Pyrometry se hojně používají tam, kde jsou sledované objekty zahřívány na vysoké teploty – typicky v hutním průmyslu při teplotách okolo 1550 °C. Najdou ale uplatnění i pro měření při nižších teplotách. Pyrometrů je mnoho druhů, jako například jasový pyrometr, který vypadá jako trubička, v nichž byl natažený wolframový drát, protékaný proudem. Pozorovatel se pak skrz trubičku zahleděl na měřený objekt – typicky roztavený kov – a velikostí proudu reguloval jas a barvu wolframového drátu do té doby, než zářil stejně jako měřený objekt. Z velikosti proudu se pak dopočítala teplota sledovaného objektu. Jasové pyrometry se dnes používají pro měření vysokých teplot – typicky v hodnotách okolo 3000 K.

Měřicí přístroje pro bezkontaktní termografii obecně fungují na principu sálání těles, které je popsáno v kapitole (3.2 Sdílení tepla radiací). Z toho důvodu je ale nutné provést korekci pro přesné měření, poněvadž sálání závisí na emisivitě povrchu. Rovněž tepelné záření vykazují všechna tělesa, která mají teplotu vyšší než absolutní nula (0 K). Pak ale při prvním pohledu na objekt nevíme, jestli měříme sálání od sledovaného objektu, nebo sálání odražené, které vyprodukoval jiný zdroj tepla. Rovněž má vliv atmosféra, která je přítomná mezi měřeným objektem a měřicím zařízením. Atmosféra má totiž určitou pohltivost IR záření a navíc může být sama zdrojem tepelného záření. Vzduch sám je při námi uvažovaných vzdálenostech mezi zkoumaným objektem a termografickou kamerou průteplivý, vliv na výsledek mají především nečistoty a voda v kapalné či plynné fázi.

Možným korekcím se věnuje následující kapitola.

1.2 Funkce termografické kamery

Infračervená termografická kamera, jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, je přístroj pro bezdotykové měření teploty, je schopná zaznamenat i rozložení teploty na povrchu měřeného objektu. Tento přístroj zaznamenává a vyhodnocuje sálání těles (samotné sálání je popsáno v kapitole 3.2 Sdílení tepla radiací). Pro vyhodnocení jsou používány dva typy senzorů – tepelné a kvantové.

Tepelné detektory mění své fyzikální vlastnosti, podle dopadajícího tepelného záření. Typický prvek je mikrolometr, zobrazený na obrázku 2. V kameře jsou pak detektory uspořádány do různě velikých polí. Mikrolometry jsou dopadajícím zářením ohřívány a z vyhodnocení elektrického odporu jednotlivých detektorů jsme schopni vytvořit obraz. Tepelné senzory jsou v průmyslových termografických kamerách nejrozšířenější.

Kvantové detektory, nebo také fotonové detektory (dle zdroje 6), jsou polovodičové detektory, které zaznamenávají fotony, obdobně jako pracuje například CCD snímač. Kvantové detektory je ovšem nutné patřičně chladit, což přináší komplikace. Z důvodu finanční náročnosti se ovšem používají výhradně v prostředích, kde je velký důraz na přesnost měření. Typicky při vědecké činnosti.

Aby se ovšem tepelné záření dostalo až na detektor, musí projít optickým systémem. Tvarem a funkcí bývá optický systém stejný jako u klasických digitálních fotoaparátů, avšak není tvořen z klasického křemičitého skla, ale z germaniového skla. Je to z toho důvodu, že křemičité sklo IR záření výrazně utlumuje.

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, máme tedy celkem tři hlavní zdroje nejistot: emisivita povrchu, sálání od jiných těles a sálání či pohltivost atmosféry.

Abychom se vypořádali s odchylkou způsobenou atmosférou, stačí změřit ještě vlhkost a teplotu vzduchu a vzdálenost mezi měřeným objektem a měřícím přístrojem. Pak lze najít korekci v příslušných tabulkách (uvažujeme zanedbatelné znečištění pevnými částicemi, jinak je situace podstatně složitější a vyžaduje další měření).

Nyní se podrobněji podíváme na emisivitu a problémy s ní spojené. Pokud vezmeme v úvahu libovolné těleso a zářivý tok, který na těleso dopadá, mohou s dopadajícím zářením nastat následující věci:

Odraz – část zářivého toku se od tělesa odrazí, zavedeme tedy pojem odrazivost (ρ) jako poměr odraženého zářivého toku ku dopadajícímu zářivému toku.

Pohlčení – část zářivého toku se v tělese přemění na teplo. Charakterizuje ho pojem pohltivost (α) jako poměr pohlceného zářivého toku ku dopadajícímu zářivému toku.

Prostup – část zářivého toku může tělesem prostoupit. Charakterizuje ho propustnost (τ) jako poměr prostoupeného záření ku dopadajícímu zářivému toku. Ve starší literatuře se lze setkat i s pojmem měrná průteplivost.

Emise – nezávisle na předchozích dějích, které popisují, co se může stát s dopadajícím zářením, těleso vlastním zářením vždy nějakou energii vyžáří. Toto emitované záření může mít zpravidla jinou vlnou délku než záření absorbované. Emitované záření je charakterizováno emisivitou (ϵ), která udává poměr záření sledovaného tělesa se zářením AČT, popsáném v kapitole 3.2 Sdílení tepla radiací.

Všechny situace popíšeme následujícím matematickým zápisem, převzatým ze strany 154 zdroje (4):

$$Q_d = Q_\alpha + Q_\tau + Q_\rho,$$

A pokud celou rovnici vydělíme dopadajícím zářivým výkonem, dostaneme následující tvar:

$$1 = \frac{Q_\alpha}{Q_d} + \frac{Q_\tau}{Q_d} + \frac{Q_\rho}{Q_d},$$

Jednotlivé podíly lze vyjádřit pomocí odrazivosti, pohltivosti a prostupnosti:

$$1 = \alpha + \tau + \rho,$$

Pokud budeme uvažovat nepropustné těleso ($\tau = 0$), tak se předchozí vztah ještě zjednoduší:

$$1 = \alpha + \rho$$

Abychom zjistili závislost předchozího vztahu a emisivity, musíme počkat do ustáleného stavu, ve kterém se absorbované záření vyžáří, a můžeme pohltivost nahradit emisivitou. Stejně jako v případě AČT.

$$1 = \epsilon + \rho$$

Z tohoto jednoduchého vztahu lze vypočítat vzájemnou souvislost emisivity a odrazivosti. Čím větší tedy bude odrazivost, tím menší bude emisivita. U lesklých objektů proto může nastat problém s bezkontaktním termografickým měřením. Poznamenejme, že výše uvedená lineární závislost emisivity a pohltivosti vzhledem k plošné hustotě výkonu je na mikroskopické úrovni dána tím, že interakce fotonu s atomem, který absorboval jiný foton a ještě jej nevyzářil, je málo pravděpodobná, tedy od jisté hustoty dopadajícího výkonu přestane platit. Nicméně taková hustota je nesrovnatelně vyšší než možné hustoty, kterými se tato práce zabývá.

Sama emisivita pak záleží na řadě faktorů, jako je například teplota, drsnost povrchu, povrchová úprava a mnoho dalšího. Pro přesná měření, nebo měření dosud nepopsaných objektů je tedy nutné emisivitu přímo měřit a nevybírat z tabulkových hodnot. Měření emisivity se věnuje norma ČSN ISO 18434-1 a uvádí dvě možnosti. První možností je použít kontaktní teploměr, tím změřit pozorovaný objekt a následně nastavit emisivitu na termografické kameře tak, aby ukazovala stejnou teplotu. Další možnost je použít barvu s referenční emisivitou. Na sledovaný předmět se může referenční barvivo nanést, počká se, až se teplota ustálí a na termografické kameře se referenční emisivita nastaví (viz obrázek 3).

2. Vznik tepla a ztrátového výkonu

V obecném prostředí, kterým prochází elektrický proud, vzniká jako důsledek průchodu proudu teplo. Vznik tepelného výkonu je zapříčiněn srážkami pohybujících se nábojů a zbytků částic, od kterých se náboje odtrhly. Tento popis je ovšem pouze ilustrativní, protože přesně neodpovídá kvantové mechanice. V reálném případě je model šíření nábojů poněkud složitější, ale pro způsobení vzniku tepla v materiálu je tento popis dostačující, uvažujeme-li prostředí s patřičně dlouhou střední volnou dráhou částic. Uvažujeme tedy model s lokálně lineárním popisem, nikoliv například dynamický model, který by byl potřeba například při výboji částic. Pro lepší představu situace je vhodné podívat se na grafické zobrazení na obrázku 4. Celou situaci popisuje ohmův zákon, pro lepší představu v diferenciálním tvaru, převzatý ze zdroje (20), strany 55 :

$$\mathbf{J} = \sigma * \mathbf{E} ,$$

kde:

\mathbf{J} je Proudová hustota [$A * m^{-2}$]

σ je Měrná vodivost [$S * m^{-1}$]

\mathbf{E} je Intenzita elektrického pole [$V * m^{-1}$]

Slovně můžeme tento zákon interpretovat následovně:

Pokud nějaký zdroj vyvolal nenulovou intenzitu elektrického pole \mathbf{E} , působí na náboje v materiálu síla o velikosti: $\mathbf{F} = q * \mathbf{E}$. Nábojům, na které lze v daném objemu dV pohlížet jako na objemovou hustotu volného náboje ρ , ale v cestě stojí okolní atomy, případně pozůstatky atomů (ve vodiči, kde elektrický proud vedou elektrony, stojí v cestě například kladně nabitě zbytky atomů, ze kterých se elektrony odtrhly). Četnost výskytu těchto překážek určuje rychlost posunu objemové hustoty náboje v materiálu. Střední rychlost pak bude lineárně závislá na intenzitě elektrického pole jako: $\mathbf{v} = k * \mathbf{E}$. Proudová hustota \mathbf{J} pak bude úměrná této rychlosti, čili přes konstantu úměrná intenzitě elektrického pole. Konstantu, zahrnující srážky, objemovou hustotu náboje a střední rychlost šířících se nábojů, označíme tedy jako měrnou vodivost σ a ta už záleží na materiálových vlastnostech.

Měrná vodivost mimo jiné záleží také na teplotě. S rostoucí teplotou bude intenzivnější neuspořádaný pohyb částic v materiálu a tím bude větší četnost srážek nosičů náboje. Výsledná proudová hustota pak bude menší než při nižší teplotě.

Samotná proudová hustota popisuje pohyb elektricky nabitých částic. Těmi mohou být elektrony, nebo ionty. O tom, jestli povedou elektrický proud ionty, nebo elektrony, rozhoduje rozdělení v Bohrově modelu atomu. Dle Bohrova modelu atomu jsou látky rozdělené na vodivé, polovodivé a nevodivé. Polovodivé látky nejsou pro problematiku ohřívání šroubových spojů důležité, proto se zde jimi zabývat nebudeme. Skupiny látek jsou ovšem utvořeny podle toho, jak je velká šířka zakázaného pásu mezi valenční vrstvou a vodivostní vrstvou. Pokud se vrstvy překrývají, mohou elektrony volně přestupovat mezi valenčním a vodivostním pásem. Elektrický proud pak povedou elektrony, jako se tomu děje u kovů. Pokud je zakázaný pás širší než 3 eV (podle různých zdrojů, tato hranice může být i jinak), elektrony se nedostanou do vodivostního pásu snadno. Jedná se tedy o izolant. Pokud na tuto látku začneme působit nenulovou intenzitou elektrického pole, dají se vlivem síly nosiče náboje do pohybu. Nyní je ovšem důležité, jestli pohybující se náboje budou ionty, nebo elektrony.

Pokud budeme vést elektrický proud pomocí elektronů (nacházíme se ve vodičích), budou se elektrony srážet s okolními ionty, tím je budou urychlovat a bude narůstat neuspořádaný pohyb v celém systému. V systému bude tedy z neentropické energie vznikat teplo. Vyšší teplota ovšem znamená, že uspořádaný pohyb náboje ve směru sil elektromagnetického pole je ztěžován pohybem okolních částic, které se na vedení proudu nepodílejí. Mírou zmíněného pohybu je pro danou látku teplota, detailněji popsána v kapitole 3. Vodivost kovů tedy s rostoucí teplotou bude klesat. Pokud vznik tepla průchodem proudu vyvolá zvýšení teploty, budou zmíněné jevy provázené kladnou zpětnou vazbou.

V případě, že elektrický proud povedou ionty, mluvíme o takzvané iontové vodivosti. V takovém případě je počet nosičů náboje podstatně menší. Pohyb nosičů náboje v důsledku tepelného pohybu má výrazný vliv, který je mnohem větší než u kovů. Měrný odpor těchto materiálů tedy s teplotou klesá.

Pokud bychom se chtěli z oblasti mikrosvěta atomů a jejich srážek přesunout do větších celků, bylo by vhodné převést Ohmův zákon do integrálního tvaru. Nejdříve se pokusíme převést proudovou hustotu na levé straně vzorce. Abychom se dostali do integrálního tvaru, musíme proudovou hustotu zintegrovat, a to přes celou plochu, kterou náboj prochází. V úvahu tedy vezmeme kruhový vodič, podle kterého nastavíme meze integrálu.

$$\iint_{r=r_1, \varphi=2\pi}^{r, \varphi=0} \mathbf{J} * dS = I ,$$

obdobně převedeme intenzitu elektrického pole na druhé straně vztahu na elektrické napětí.

$$\int_{l=l_1}^{l=l_2} \mathbf{E} * dl = U ,$$

doplňme informaci, že v obou případech integrace je mezi vektorem dané veličiny a elementem dráhy či plochy skalární součin. Pokud zvolíme integrační dráhu v souladu s rozměry daného objektu, měl by ovšem vyjít celkový proud či napětí nacházející se v objektu.

A jako poslední člen vzorce zbývá vodivost, kterou přes vzájemnou souvislost převedeme na odpor, a pokud budeme znát rozměry a vodivost materiálu protékaného proudem, dopočteme podle následujícího vztahu odpor celku.

$$R = \frac{dl}{\sigma * dS} ,$$

kde:

σ je Měrná vodivost [$S * m^{-1}$]

dl je Element dráhy

dS je Element plochy

ve výsledku tedy dostaneme Ohmův zákon v integrálním tvaru jako:

$$U = R * I$$

Obdobně můžeme vyjádřit rovněž Jouleův zákon v integrálním i v diferenciálním tvaru. Vztah je rovněž převzatý ze zdroje (20), strany 55.

$$P = U * I , \quad P = \mathbf{J} * \mathbf{E}$$

Zde pouze doplním, že při přechodu z diferenciálního do integrálního tvaru použijeme integraci přes objem, neboť nás zajímá teplo vzniklé v celém objemu materiálu.

Pro budoucí experimenty bude právě Jouleův zákon velice potřebný, neboť popisuje, jak ze znalosti elektrického napětí a proudu dopočítat výkon, měnící se v obvodu za zdrojem ve výkon, který bude v našem případě tepelný.

3. Sdílení tepla

Teplota je forma energie a jako taková má možnost se šířit. Šíření se děje třemi základními mechanismy: konvekcí (prouděním), kondukcí (vedením), radiací (sáláním). Kromě nich ještě mohou existovat tzv. tepelné vlny. Teorie tepelných vln je ovšem nad rámec této práce, proto se jí nadále zabývat nebudeme. Aby vůbec došlo ke sdílení tepla (bez fázové přeměny) v jakémkoliv jeho podobě, je nutné rozvážit rovnováhu teplot. Proto si nyní pojem teplota objasníme. Oficiální definice teploty je následující:

$$dS = \frac{\partial Q}{T},$$

kde:

dS je Množství odevzdané entropie [$J \cdot K^{-1}$]

∂Q je Teplota, které bylo odebráno látce [J]

T je Termodynamická teplota, při níž děj proběhl [K]

Z tohoto vztahu, převzatého ze strany 608 zdroje (21) lze oficiálně definovat teplotu. Zdroj (8) nám ovšem nabízí představitelnější definici teploty. Teplota je definována jako míra neuspořádaného pohybu částic. Je to veličina stavová, a to vnitřní, čili nezávisí na velikosti systému. Takto definovaná teplota bohužel naráží na problém s principem neurčitosti. Pokud bychom totiž dosáhli jakýmkoli způsobem teploty absolutní nuly, pohyb by měl zcela ustát. Podle principu neurčitosti ovšem známe přesně buď hybnost částice, nebo její polohu. Při absolutní nule bychom ale znali jak hybnost, tak polohu. Proto bylo nutné upravit definici teploty absolutní nuly jako teploty, při které je neuspořádaný pohyb minimální.

3.1 Sdílení tepla kondukcí

Slovo kondukce pochází z latiny a označuje vedení. Sdílení tepla kondukcí nám tedy popisuje, jak se teplo šíří v daném prostředí. Kondukcí popisuje Fourier-Kyrchhoffova rovnice, která může mít následující tvar:

$$\rho * c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} * \nabla T \right) = -\nabla * \mathbf{q} + Q_v,$$

projděme nyní jednotlivé členy:

\mathbf{q} je Vektor tepelného toku. Také možno zapsat jako: $\mathbf{q} = -\lambda * \nabla T$.

Q_v je Člen pro korekci, který bere v úvahu působení jiných forem energií, které se přemění na teplo.

Členy ρ a c_p popisují materiálové vlastnosti – hustotu [$\text{kg} * \text{m}^{-3}$] a měrnou tepelnou kapacitu [$\text{kJ} * \text{kg}^{-1} * \text{K}^{-1}$].

Za zmínku ovšem stojí závorka na levé straně rovnice. Po úpravě prvního členu v závorce a rozepsání součinu rychlosti s gradientem teploty získáme následující zápis:

$$\frac{\partial T}{\partial t} * \frac{dx}{dt} + \frac{\partial T}{\partial x} * \frac{dx}{dt} + \frac{\partial T}{\partial y} * \frac{dy}{dt} + \frac{\partial T}{\partial z} * \frac{dz}{dt},$$

ve kterém členy $\frac{dx}{dt}$ jsou pouze vyjádřením rychlosti. Po úpravě pak:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} * v_x + \frac{\partial T}{\partial y} * v_y + \frac{\partial T}{\partial z} * v_z,$$

a po finální úpravě, dostaneme vztah:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right) * (v_x, v_y, v_z),$$

ve které jednotlivé členy:

$\frac{\partial T}{\partial t}$ Znázorňuje změnu teploty v čase

$\left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)$ Znázorňuje změnu teploty v prostorových souřadnicích

(v_x, v_y, v_z) Znázorňuje rychlosti šíření v jednotlivých směrech

Na vztahu, uvedeném výše, je nejnázornější souvislost teploty, prostoru a času. Pokud budu chtít, aby pozorovatel zjistil změnu teploty, můžu počkat na stejném místě po jistou časovou dobu, nebo se i se sledovaným prostředím za časový okamžik přemístit do prostoru s jinými teplotními podmínkami.

3.2 Sdílení tepla radiací

Vznik sálavého výkonu je zapříčiněn vyzařováním tepelné energie z objektu o vyšší teplotě, než je teplota okolních předmětů. Přenos tepla sáláním probíhá tedy neustále, když nemáme v prostředí všude naprosto vyrovnanou teplotu. Tento přenos tepla je zapříčiněn fotony, které po dopadu na určitý objekt předávají formou srážek energii částicím v daném objektu. Tato forma přenosu tepla je závislá na vlnové délce fotonů. Jako první tuto skutečnost objevil anglický královský hvězdář sir William Herschel na konci 18. století. Provedl tehdy rozklad slunečního světla do spekter a do jednotlivých barev pokládal teploměr. Tím změřil teplotu jednotlivých barev a zjistil, že teplota narůstá směrem k červené barvě. Poté se rozhodl změřit teplotu dále za červenou barvou a tato teplota byla ještě větší. Tímto pokusem objevil infračervené záření, které je především zodpovědné za sdílení tepla radiací. Experiment je vyobrazen v dobové podobě na obrázku 8.

Nyní se podíváme na popis infračerveného záření. Sálání těles popisuje vztah ze strany 529, zdroje (1). Nazývá se Stefan - Boltzmannův zákon a popisuje vyzařování AČT:

$$Q = \sigma * S * T^4 ,$$

kde:

σ je Stefan-Boltzmannova konstanta $5.67032 * 10^{-8} [W * m^{-2} * K^{-4}]$.

S je Povrch tělesa [m^2].

T je Teplota povrchu tělesa [K].

AČT je nejlepším zdrojem sálavého výkonu, avšak je to pouze teoretický model. Velmi se mu ale podobá naše Slunce, které sálá do okolního vesmíru. Toto složitější uspořádání však už popisuje jiný zákon, který je pouze zkonkretizováním Stefan-Boltzmannova vyzařovacího zákona. Bere totiž v úvahu vzájemné sálání dvou těles, která navíc nemusí být absolutně černá. Znění dle strany 32 zdroje (1) je následující:

$$Q_r = \sigma * \epsilon * S * (T_1^4 - T_0^4),$$

platí pro situaci, kdy těleso samo na sebe nesálá a je podstatně menší než těleso, které ho obklopuje. V jiném případě by se místo emisivity zavedl korekční člen, F_{1-2} , který bere v úvahu emisivitu obou těles i geometrické uspořádání. Tento člen ale může být pro šroubový spoj ve venkovním prostředí nahrazen emisivitou.

Oproti Stefan – Boltzmannovu zákonu se zápis liší:

ϵ je Emisivita, která udává poměr zářením sledovaného tělesa a zářením AČT.

T_0 je Teplota objektu, který sálavý výkon přijímá [K].

Pokud se na členy podíváme detailněji, může být patrný velký rozsah řádů mezi Stefan-Boltzmannovou konstantou (10^{-8}) a teplotou (10^4). Myšlenka je tedy taková, že pokud je teplota tělesa malá (do $100\text{ }^\circ\text{C}$), sálavý výkon se příliš neuplatní a často se i zanedbává, protože řád konstanty je výrazně menší než řád teplot. Pokud teplota roste ($150\text{ }^\circ\text{C}$), začne se, v závislosti na emisivitě, uplatňovat i sálavý výkon a začíná být srovnatelný s konvektivním výkonem – viz dále. Pro vyšší teploty ($1000\text{ }^\circ\text{C}$) se pak uplatňuje především sálavá složka výkonu. Při malých intenzitách konvekce (typicky velké objekty, malý rozdíl teplot) však může být sálavá složka výkonu i dominantní.

Jak je patrné z rovnic popisu sálavého výkonu, významný člen je emisivita, která se uplatňuje v každém z nich. Jako poměr může nabývat hodnot (0,1). Interval je záměrně otevřený. V přírodě se totiž nesetkáme s AČT, které by mělo emisivitu 1. Rovněž se nesetkáme s tělesem s nulovou absolutní teplotou, které by nesálalo, proto nenajdeme těleso s nulovou emisivitou.

Dokonce ani výzkum černých děr neprokázal nulovou teplotu černé díry, takže i tyto objekty, dle zdroje (22) sálají také.

Jak je již zmíněno v úvodu této podkapitoly, jde o přenos fotonů, takže sálavý výkon se může šířit i ve vakuu. Tímto principem se dostává tepelný výkon ze Slunce na povrch naší Země.

3.3 Sdílení tepla samovolnou konvekcí

Sdílení tepla konvekcí je další možný způsob šíření tepla. Tento druh výměny tepla popisuje přestup tepla z pevného materiálu do okolního kapalného či plynného prostředí. Zahrnuje v sobě i efekt kondukce, který jako následek v kapalině či plynu vzniká. Teplo se pak šíří zejména pohybem samotné kapaliny. Samotný přenos pak závisí na tom, jakým způsobem došlo k pohybu kapaliny a také na možnostech pohybu kapaliny – například viskozita, hustota a podobně. Pokud je kapalina uváděna do pohybu pouze rozdílem hustoty, která je způsobena rozdílem teplot v různých oblastech kapaliny, mluvíme o konvekci volné (též samovolné). Vzorec popisující jakoukoliv konvekci, převzatý ze zdroje (1), nazývajícím se Newtonův ochlazovací zákon, se zdá být jednoduchý:

$$P = \alpha * S * (T2 - T1),$$

ve kterém:

P je Tepelný výkon, odváděný konvekcí [W]

α je Koeficient přestupu tepla [$W * m^{-2} * K^{-1}$]

S je Plocha pevného tělesa [m^2]

T2 je Teplota pevného tělesa [$^{\circ}C$]

T1 je Teplota okolní kapaliny [$^{\circ}C$]

Nejpozoruhodnější člen celého vztahu je koeficient přestupu tepla. Zahrnuje v sobě všechny parametry s konkrétním případem konvekce spojené (efektivnost tepelného přenosu, druhy kapalin a jejich charakteristiku, nucenou a volnou konvekci, zkrátka komplexní údaj o konvekci). Pokud zůstaneme u volné konvekce, může tento člen nabývat hodnot zhruba od $5 W * m^{-2} * K^{-1}$ do $30 W * m^{-2} * K^{-1}$ pro suchý vzduch za normálního atmosférického tlaku. Pro vodu pak od $100 W * m^{-2} * K^{-1}$ do $500 W * m^{-2} * K^{-1}$. Z předchozích údajů je zřejmé, že přestup tepla z tělesa do vody bude mnohem efektivnější než přestup do vzduchu. Tato skutečnost je nám všem velmi dobře známá i bez jakéhokoliv fyzikálního objasňování. Pokud se pohybujeme ve vzduchu s teplotou $20^{\circ}C$ v bezvětří, je lidskému organismu příjemně. Pokud bychom se ocitli ve vodě s teplotou $20^{\circ}C$, málokomu bude příjemně natolik, aby ve vodě zůstal. Ačkoliv je teplota v obou prostředích stejná, výměna tepla z lidského organismu je ve vodním prostředí mnohem intenzivnější.

Nyní se budeme zabývat volnou konvekcí ve vzduchu při normálním atmosférickém tlaku. Vezměme v úvahu jednoduché uspořádání v podobě válce v uzavřeném, dostatečně velkém prostoru, naplněném vzduchem. Válec budeme jistým způsobem zahřívát tak, abychom samotným procesem zahřívání neovlivnili atmosféru okolo, až dosáhneme ustáleného stavu teplot. V okolí teplého válce se bude vzduch zahřívát o jeho stěny. Tím se změní jeho hustota a teplejší vzduch začne díky vztlaku stoupat. Prostor, kam bude teplý vzduch stoupat, je ale již zaplněn teplým vzduchem, který byl ohřátý ve stejný časový okamžik jako vzduch níže. Teplejší vzduch se tedy bude hromadit v horní části objektu, čímž tyto části budou zahřátý více. Vyobrazení situace, v různých uspořádáních, jsou na obrázku 5.

Celý výše uvedený děj popisuje koeficient přestupu tepla. Jeho výpočet se provádí pomocí teorie podobnosti, kterou si nyní popíšeme. Základy teorie podobnosti jsou v geometrii (zejména) trojúhelníků, kde je známo, že pokud zachováme u dvou trojúhelníků velikost úhlů, tak jsou jejich strany úměrné. Délky stran těchto trojúhelníků jsou pak úměrné podle délek, obsahy druhou mocninou a objemy těles třetí mocninou daného poměru délek. Pokud tedy máme údaje o prvním trojúhelníku a bezrozměrný koeficient úměrnosti, jsme schopni dopočítat jakýkoliv rozměr druhého, podobného trojúhelníku. Toho se s velkou výhodou využívá ve fyzikálním popisu tepelných dějů. Od empiricky stanoveného vztahu se pomocí podobnostních čísel stanoví vlastnosti, které bude mít geometricky podobné uspořádání.

Podobnostní čísla jsou bezrozměrná čísla, jejichž velikost charakterizuje určitý fyzikální děj. Například Machovo číslo udává poměr rychlosti sledovaného objektu a rychlosti šíření zvuku.

$$\text{Ma} = \frac{v}{c},$$

v čitateli i jmenovateli jsou rychlosti, takže celkově je číslo bezrozměrné. Z číselné velikosti Machova čísla je pak patrné, jak moc se sledovaný objekt lišil rychlostí od rychlosti zvuku v daném prostředí.

V oboru sdílení tepla volnou konvekcí jsou pro oblasti geometrických uspořádání, kterými se zabývá tato práce, důležitá následující podobnostní čísla:

Prandtlovo číslo – Pr Číslo charakterizující kapalinu, dáno vztahem: $\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$,

kde ν je kinematická viskozita, a je teplotní vodivost. Pro teploty mezi 0°C a 200 °C poměr těchto veličin není příliš teplotně závislý, proto se Prandtlovo číslo zadává jen jako číselná hodnota, nikoliv funkce teploty.

Grashofovo číslo – Gr Zahrnuje objemovou teplotní roztažnost kapaliny, rozdíl teplot mezi tělesem a kapalinou, tíhové zrychlení, kinematickou viskozitu a charakteristický rozměr tělesa, o kterém si povíme blíže v podkapitole o nucené konvekcí. Grashofovo číslo je určeno vztahem:

$$\text{Gr} = \frac{\beta * |T_s - T_o| * g * R^3}{\nu^2},$$

ve kterém:

β je Součinitel objemové roztažnosti [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

$|T_s - T_o|$ je Absolutní rozdíl teplot objektu a okolí [$^{\circ}\text{C}$]

g je Tíhové zrychlení [$\text{m} * \text{s}^{-2}$]

R je Charakteristický rozměr tělesa [m]

ν je Kinematická viskozita [$\text{m}^2 * \text{s}^{-1}$]

Nusseltovo číslo – Nu Toto číslo při volné konvekci je dáno hodnotou Grashofova a Prandtlova čísla. Pro výpočet tohoto čísla je mnoho vzorců, přičemž každý má své využití pro různé uspořádání, různou velikost teplot a různé kapaliny. Pro samovolnou konvekci ve vzduchu se nejčastěji používá vzorec:

$$\text{Nu} = c * (\text{Gr} * \text{Pr})^n ,$$

kde velikost konstant c a n se volí podle velikosti součinu Grashofova a Prandtlova čísla, dle tabulky 3.

Ze znalosti Nusseltova čísla je pak možné dopočítat samotný koeficient přestupu tepla jako:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} * \lambda}{R} ,$$

kde:

λ je Teplotní vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

R je Charakteristický rozměr tělesa [m]

Vyobrazení závislosti koeficientu přestupu tepla na teplotě a charakteristickém rozměru je vyobrazena na grafu 1. Pomocí těchto podobnostních čísel a tabulkových hodnot kinematické viskozity a tepelné vodivosti lze tedy vypočítat zhruba s 10% přesností koeficient přestupu tepla. Pro výpočet přestupu tepelného výkonu volnou konvekcí se ještě využívají softwary, které z vyčíslení rovnice kontinuity predikují pohyby jednotlivých molekul kapaliny. Tento způsob je ovšem extrémně výpočtově náročný a platí pouze v ideálním případě. Hlavním způsobem, pro výpočet tepelného výkonu odváděného konvekcí, proto zůstává nadále teorie podobnosti.

3.4 Sdílení tepla nucenou konvekcí

Jak již z názvu vyplývá, nucená konvekce je uměle (cizím zdrojem – jinak než energií samotné termodynamické soustavy) poháněna. K proudění, způsobenému rozdílem tlaků v kapalině, vlivem zahřívání samotného tělesa, jako u volné konvekce, je u nucené konvekce navíc proudění uměle vyvolané vnějším zdrojem. Příkladem nucené konvekce může být chlazení průmyslové elektroniky pomocí ventilátoru. Nucená konvekce se v Newtonově ochlazovacím zákonu promítne zvýšením koeficientu přestupu tepla. Pro suchý vzduch může tento koeficient dle současných poznatků nabývat hodnot okolo 30, maximálně 60 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Z důvodu tohoto omezení je pro specifické aplikace výhodnější odvádět tepelný výkon jinak než vzduchem. Například pro vodní chlazení volnou konvekcí může být koeficient přestupu tepla roven až 500 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Pro srovnání velikostí koeficientů přestupu tepla pro různé materiály, volnou a nucenou konvekci, je v příloze přiložena tabulka 1.

Oproti volné konvekci se do výpočtu koeficientu přestupu tepla započítává řada dalších podobnostních čísel, mnoho z nich se ovšem zanedbává. Jedno z nejdůležitějších čísel je ovšem číslo Reynoldsovo - Re , které je rozebráno v následující podkapitole. Změna rovněž nastane ve výpočtu Nusseltova čísla, které bude zahrnovat i číslo Reynoldsovo. Použité vztahy pro výpočet Nusseltova čísla jsou následující:

$$Nu = 0.332 * Re^{0.5} * Pr^{\frac{1}{3}},$$

$$Nu = 0.25 * Re^{0.6},$$

přičemž obě jsou bezrozměrná. Pokusným měřením byla zjištěná následující závislost:

$$Nu = 0.25x^{0.599},$$

kde x je Reynoldsovo číslo. Pradtlovo číslo může být pro teploty dosahované při experimentu považováno za konstantu. Závislost Nusseltova čísla na Reynoldsovu číslu by tedy měla být dostatečná. Experiment byl proveden na jednoduchém uspořádání, vyobrazeném na obrázku 6 a popsán je v kapitole korekce pro jednodušší geometrický objekt.

Vlastnosti a výpočet nucené konvekce jsou složitější než konvekce samovolná. Kromě kritéria geometrických uspořádání je rovněž nutno započítat i proudění a jeho charakter. Proto je chyba výpočtu okolo 10 % považována za veliký úspěch.

3.5 Reynoldsovo číslo

Toto podobnostní číslo je pojmenované po irském vynálezci Osbornu Reynoldsovi, obrázek 7, žijícímu na přelomu 19. a 20. století. Reynolds se ve svém výzkumu mimo jiné zabýval prouděním. Jeho bezrozměrné číslo tedy bude charakterizovat proudění kapalin, jakožto i plynů. Nyní si tedy popíšeme, jaké druhy proudění máme.

Laminární proudění – proudění se vyznačuje tím, že jednotlivá vlákénka proudu látky (také označována jako proudnice) se navzájem nekříží. Proudnice se tedy pohybují paralelně bez vzájemného propletení ve vrstvách. Odtud název laminární (“lamina“ – latinsky deska). Jiná definice tvrdí, že proudění můžeme považovat za laminární tehdy, když se látka pohybuje jen rovnoběžně s okraji, což nemusí při vhodné definici zakřivenosti objektů různé velikosti být v rozporu s první definicí. Tedy například pokud bude voda téci pomalu trubkou o velkém průměru. Při ideálním laminárním proudění se vytváří pomyslné izobary, kolmé na směr proudění (pokud zanedbáme zpomalení látky vlivem tření u okrajů), takže nedochází k žádným akustickým efektům (není slyšet tok kapaliny v trubce). K laminárnímu proudění nedochází nikdy na okrajích plyného či kapalného válce.

Turbulentní proudění – proudění, pro něž platí, že proud látky se nešíří pouze v rovnoběžném směru s hranicemi. Můžeme si představit, že se tvoří jakési víry, jako když voda v potoce proudí okolo kamenů. Pokud dojde k takovýmto efektům, znamená to, že v kapalině, která proudí, se začal měnit tlak. Kvůli různým hodnotám tlaku jsou pro kapalinu „výhodnější“ i jiné cesty než pouze přímo ve směru proudění, proto se do míst s nižším tlakem začne kapalina přesouvat. Zmíněná změna tlaku se rovněž může projevit akusticky, protože vjem zvuku není nic jiného než rychlé změny tlaku. Turbulentní proudění může nastat rovněž při změně tvaru ohraničení proudící kapaliny. Lepší než popis turbulentního a laminárního proudění bude zobrazení, jako na obrázku 9.

Osborne Reynolds zjistil, že pokud bude „jeho“ číslo v případě proudění v trubici menší než 2300, bude se jednat o proudění laminární. Když bude větší než 4000, budeme mít proudění turbulentní. Pokud ale vyjde Reynoldsovo číslo v rozmezí 2300 a 4000, vzniklé proudění může obsahovat obě složky. Tato čísla ovšem netvoří ostrou a striktní hranici přechodu. Můžeme ale říci, že pokud vyjde Reynoldsovo číslo menší než 1000, máme proudění laminární. Rovněž bude záležet na okolních podmínkách. Například na drsnosti povrchu stěn nebo na případných překážkách pro kapalinu. Také na možnostech měření rychlosti proudění, protože rychlost může mít různou velikost v různých směrech. Způsobů výpočtu Reynoldsova čísla je mnoho a

záleží, pro jaké geometrické uspořádání budeme počítat. Tedy když počítáme proudění uvnitř válce, použijeme jiný vztah, než když kapalina bude válec obtékat.

Obecně ale, podle zdroje (13), udává Reynoldsovo číslo poměr makroviskozity a mikroviskozity. Makroviskozitu dostaneme tak, že vynásobíme rychlost proudění charakteristickým rozměrem. Ten se bude lišit podle geometrie, se kterou počítáme. Mikroviskozita je tabulková hodnota, která závisí na teplotě proudící kapaliny. Vztah, který se zdál být nejvhodnější pro naše uspořádání, je:

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\nu_i} ,$$

kde:

ρ je Hustota kapaliny $[Kg * m^{-3}]$

V je Rychlost proudění $[m * s^{-1}]$

D je Charakteristický rozměr – délka trubice $[m]$

ν_i je Kinematická viskozita, závislá na teplotě $[m^2 * s^{-1}]$

Reynoldsovo číslo se nepoužívá pouze v technické praxi. Své využití má například i v medicíně, při diagnostice krevního oběhu. Pokud v krevním oběhu vznikne turbulentní proudění, může se narušit výstelka cév (endothel). Při porušení endotehlu se začne krev srážet a může dojít k tromboembolické příhodě – například infarkt. Navíc z hlediska transportu krve je toto proudění méně efektivní a srdce proto musí pracovat více.

4. Korekce pro jednodušší geometrický objekt

Za geometricky jednodušší objekt můžeme považovat válec, pro nějž je většina výpočetních vztahů známa. Začneme tím, že vypočítáme Nusseltovo číslo při nucené konvekci, přičemž budeme vycházet ze vztahu:

$$Nu1 = a * Re^b * 0.7^{0.35},$$

a patřičné konstanty budeme vybírat z tabulky 2 v závislosti na velikosti Reynoldsova čísla. Rovněž musíme mít k dispozici tabulkové hodnoty kinematické viskozity a tepelné vodivosti. Jako proměnné budou zvoleny: teplota okolí, teplota objektu, rychlost proudění okolního vzduchu a charakteristický rozměr. Dále vypočítáme Nusseltovo číslo pro volnou konvekci daného uspořádání. Záviset bude na součinu Grasthofova a Prandtlova čísla. Tvar pro výpočet bude:

$$Nu2 = a * (Gr * Pr)^b ,$$

a potřebné konstanty se vyberou z tabulky 3. Z Nusseltových čísel pro volnou a nucenou konvekci se nadále spočítá koeficient přestupu tepla, jehož vstupní proměnné budou: rychlost proudění, teplota okolí, teplota sledovaného objektu a charakteristický rozměr. Koeficient přestupu tepla je počítán podle následujícího vztahu:

$$\alpha = \frac{\lambda}{R} * \sqrt[4]{Nu1^4 + Nu2^4}$$

Následně se vhodně upraví Fourier-Kirchhofovy rovnice. Na levé straně zůstane součin hustoty a měrné tepelné kapacity (tabulkové hodnoty), společně s diferenciálem charakterizující změnu teploty v čase. Na pravé straně zůstane výkon, který vzniká průchodem proudu, a výkon, který uniká do okolí sáláním a konvekcí. Výstupní výkon odcházející z objektu pryč je násoben obvodem tělesa, abychom respektovali rozměry, resp. povrch, ze kterého výkon odchází. Z původní Fourier-Kirchhofovy rovnice vznikne tedy vztah:

$$\rho * Cp * \frac{dT}{dt} = \frac{I^2 * P[T[t]]}{S^2} - \frac{o}{S^2} (\alpha * (T[t] - T_o) + \sigma * \epsilon * ((T[t] + 273)^4 - (T_o + 273)^4))$$

O něco jednodušší bude tato rovnice pro ustálený stav, když budou diferenciály nulové a teplota nebude záviset na čase. Vznikne tvar:

$$0 = \frac{I^2 * P}{S^2} - \frac{o}{S^2} (\alpha * (T - T_o) + \sigma * \epsilon * ((T + 273)^4 - (T_o + 273)^4)) ,$$

následně je do rovnice pro ustálený stav dosazena rychlost proudění a měřená teplota. Pomocí funkce findroot je pak dohledán výkon unikající plochou objektu. Tento výkon se zpětně dosadí do rovnice pro ustálený stav, čímž máme možnost zvolit si nové proměnné. Těmi bude rychlost proudění vzduchu a příslušná teplota při tomto proudění. Samozřejmě je možno dosadit za novou rychlost nulu a tím zjistit, jakou by měl objekt teplotu při nulové rychlosti větru.

4.1 Praktická měření a jejich vyhodnocení

Pro ověření vztahů na výpočet koeficientu přestupu tepla jsme se s vedoucím práce rozhodli realizovat experiment. Průběh experimentu byl takový, že jsme zahřáli jednodušší geometrický objekt na určitou teplotu a za znalosti rozložení teploty na povrchu předmětu, teploty okolí, rozměrů tělesa a elektrického výkonu dodávaného do soustavy se následně vypočítal koeficient přestupu tepla. Program na výpočet je přiložen v příloze pod názvem overeni_alfa.

Obdobně byl proveden experiment pro nucenou konvekci, kde byla ovšem ještě známá rychlost větru a jeho směr. Cílem bylo najít vhodný vzorec pro výpočet Nusseltova čísla, resp. jeho závislost na Reynoldsově čísle. Hledaný vztah je uveden v kapitole 3.4 a od známého, literaturou uváděného vztahu se téměř neliší.

Za jednodušší geometrický objekt, na kterém bylo měřeno, je považován měděný válec, uvnitř kterého je na svařovacích elektrodách namotán odporový drát. Vnitřek válce je pak celý zalit maltou, která brání přehřátí odporového drátku a odvádí teplo na povrch válce. Odporovým drátem je pak proháněn stejnosměrný proud, který objekt zahřívá. Na tento objekt bylo následně foukáno pomocí kancelářského ventilátoru, opatřeného zúžovačem s nátrubkem, ze kterého proudění vychází. Tato sestava si klade za cíl homogenizovat proudění, které je v ústí trubice. Sestava je vyobrazena na obrázku 6 a 10. Termogram zahřátého válce je pak zaznamenán na obrázku 11. Takto utvořená soustava se bohužel nejevila jako dostatečná, neboť rychlost větru jsme anemometrem nebyli schopni určit jednoznačně. To svědčilo o nežádoucím nehomogenním proudění. Ventilátor měl totiž velkou plochu lopatek, takže se ve výsledném proudění nejspíše vyskytla složka kolmá na směr šíření. V neposlední řadě ventilátor neposkytl rychlost proudění větší než $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Proto (a z mnoha dalších důvodů) jsme se rozhodli vyrobit aerodynamický tunel. Požadavky na tunel tedy jsou:

- Snadná korekce sálavého výkonu
- Izolace proudění od okolí

- Homogenní tok vzduchu
- Proudění pokud možno jen v jednom směru – čistě laminární

Pokusy o výrobu takového tunelu, aby rozměrově nevadil objektům reálné velikosti, byly bohužel marné. Proto jsme začali konstrukcí menšího tunelu, do něhož jsme umístili objekty poměrově zmenšené a s využitím teorie podobnosti bychom korekci měli dopočítat. Konstrukce vyobrazená na obrázku 12 se skládala z malé Francisovy turbíny, před jejíž nasávací otvor byl umístěn papírový válec. Ve válci byl pak umístěn měřený objekt, jako na obrázku 13. V místě výfuku turbíny bylo prováděno měření rychlosti větru. Pro zpřesnění měření se využil jehlan, nasazený na ústí turbíny, na jehož konci byl v přesném průměru nasazen anemometr, jak je vyobrazeno na obrázku 14.

Jako jednoduchý geometrický objekt byl zvolen opět válec, který byl tentokrát reprezentován elektrickým odporníkem, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 4. Odporník byl průchodem střídavého elektrického proudu zahřátý na určitou teplotu. Po ustálení teploty jsme odečetli potřebné údaje a začali otáčet turbínou. Opět jsme čekali do ustálení teploty, odečetli potřebné údaje a následně zvýšili rychlost proudění vzduchu v tubusu.

Několik vybraných hodnot z měření je k nahlédnutí v tabulce 5. Zajímavější grafické znázornění je pak na grafu 2. Z jeho tvaru jsem se pak rozhodl proměřit důkladněji oblast od rychlosti větru 0 do rychlosti $1.48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Výsledky jsou opět graficky zobrazeny na grafu 3. Pozoruhodný je neočekávaný rozdíl teplot mezi takřka sousedními hodnotami rychlosti větru 0.61 a $0.86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tento efekt je pravděpodobně způsoben zvýšením teploty v laboratoři vlivem předchozího experimentu. Teplota během prvního měření byla bohužel chybně považována za konstantní po celou dobu měření, takže není možné provést korekci. Poté proběhlo měření při vyšší teplotě, respektive při vyšším výkonu, pouštěném do sledovaného odporníku. Výsledky z tohoto měření jsou zobrazeny na grafu 4. Když měření při vyšším výkonu porovnáme s měřením při nižším výkonu, můžeme pozorovat, že závislost teploty objektu na rychlosti větru se mění s velmi podobným předpisem.

Rovněž byla porovnána závislost Reynoldsova čísla na rychlosti větru. Graficky je tato závislost znázorněná na grafu 5. Předpis pro tuto funkci vyšel téměř stejný, pro obě uspořádání (kolmo, či rovnoběžně) i pro různě veliký výkon pouštěný do odporníku.

Dále abychom charakterizovali měřený objekt, rozhodli jsme se vypočítat a zobrazit závislost změny Reynoldsova čísla a změny teploty. Reynoldsovo číslo totiž ve svém výpočtu zahrnuje jak rychlost proudění, tak charakteristický rozměr měřeného objektu. Za charakteristický

rozměr v případě válcového uspořádání se podle mnoha zdrojů literatury (1 a 4) považuje průměr. Ten byl tedy dosazen do vztahu pro výpočet Reynoldsova čísla a výsledná závislost je zobrazena na grafu 6. Zde již můžeme stanovit předběžné vyhodnocení, že měřit objekty by se mělo při úplném bezvětří, nebo naopak při rychlosti větru větší, než bude jisté Reynoldsovo číslo pro dané uspořádání. Pro náš jednoduchý objekt by to dle grafu 6 mohlo být od $Re = 1000$, čemuž přísluší rychlost proudění $2,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pokud totiž budeme pozorovat funkci nad touto hranicí, bude se s jistou aproximací shodovat s lineární funkcí, která klesá se značně malou směrnici, oproti oblasti $Re = 0$ až $Re = 1000$. Pokud tedy budeme odčítat hodnoty za hranicí $Re > 1000$, neměli bychom se dopustit takové chyby, neboť teplota by se v závislosti na rychlosti proudění v těchto intervalech neměla tolik měnit.

Pro ověření této teorie se podívejme na graf 7, kde je opět vyobrazena závislost Reynoldsova čísla a teploty. Tentokrát jsou ovšem údaje počítány z měření při nízké rychlosti foukání větru. Je patrný počáteční rozdíl teplot o $25 \text{ }^\circ\text{C}$, když se Reynoldsovo číslo změnilo o 100. Pro charakteristický rozměr našeho objektu tato změna Reynoldsova čísla odpovídá změně rychlosti větru z 0 na $0,21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

S obdobným výsledkem dopadlo i měření jednoduchého objektu při podélném uspořádání. Zajímavé je ovšem grafické zobrazení jednotlivých naměřených bodů, které je patrné na grafu 8, přičemž za charakteristický rozměr byl považován opět průměr válce. Je zde patrný jistý odskok mezi volnou konvekcí a nucenou konvekcí při velmi nízké rychlosti proudění vzduchu. Tento jev plně odpovídá teorii a je popsán v kapitole 3.3. Další zajímavostí je, že funkce má jiný předpis než v případě příčně směřovaného proudění. Není zde patrné, že po hodnotě Reynoldsova čísla 1000 by funkce zásadně měnila charakter. Spíše se funkce podobá měření při příčném směru proudění a malé rychlosti. Z toho můžeme usoudit, že dále by funkce nejspíše měla obdobný charakter jako při příčném uspořádání, jen by na ose x bylo jiné měřítko. Porovnání velikostí Reynoldsových čísel a teplot pro kolmé a příčné uspořádání jsou uvedena v tabulce 6. Patrný je narůstající rozdíl Reynoldsových čísel, který je uveden v posledním sloupci. Nejspíše bude zapříčiněn nepřesně zvoleným charakteristickým rozměrem při podélném ofuku. Proto jsem se snažil vyjádřit charakteristický rozměr pro podélný ofuk jako určitý poměr průměru válce a jeho délky. Takto zvolený charakteristický rozměr k vyšší přesnosti ovšem nevedl, a to ani v určitém procentuálním zastoupení průměru a délky. Proto jsme se s vedoucím práce rozhodli používat i pro toto uspořádání charakteristický rozměr průměr měřeného válce.

Zajímavé by dále bylo pozorovat objekt po překročení Reynoldsova čísla 2500, čili s dominantní složkou turbulentního proudění. Tomuto experimentu bohužel brání nemožnost vytvoření rychlejšího proudění současným zdrojem.

Vyhodnocení měření s kolmým ofukem pomocí programu korekce_valec, přiloženého v příloze, jsou k nahlédnutí v tabulce 7, kde v jednom sloupci je teplota naměřená na spoji pomocí termografické kamery, následuje rychlost větru, v dalším je teplota dopočítaná programem, která by se na objektu nacházela při nulové rychlosti větru a v posledním sloupci je rozdíl teploty naměřené při nulovém ofuku a teploty dopočítané programem. Patrné jsou skoky v rozdílu spočítané a naměřené teploty. Je možné, že je to způsobeno započítáním jiného vzorce pro Nusseltovo číslo, které se vybírá dle velikosti součinu Grasthofova a Prandtlova čísla.

Pokud se tedy podíváme na rozdíly teplot z hlediska procentuální chyby, pohybujeme se v jedné oblasti součinu Grasthofova a Prandtlova čísla okolo 3% chyby, v další oblasti 13% chyby a v poslední oblasti je to 19% chyba. Když vezmeme v úvahu, že v oblasti tepelných dějů je považována za úspěch chyba 10%, dopadly výsledky korekce nanejvýš uspokojivě.

5. Korekce pro šroubový spoj

Pro šroubový spoj jsme se rozhodli použít obdobný pracovní postup jako pro jednodušší geometrický objekt. Nejprve bylo vyrobeno několik modelů šroubových spojů v různém uspořádání, zmenšených oproti reálným spojům. Pro výrobu byly použity hliníkové destičky o tloušťce 3 mm. Rozměry modelů jsou na obrázku 15. Pro simulování povrchové koroze spoje byl použit odporový drát (obrázek 16), sevřený mezi obě desky. Spojení destiček bylo následně dosaženo izolovaným šroubem v případě rovného spoje a izolovaným vodičem v případě spoje pravoúhlého. Obrázky modelů jsou na obrázku 17, 18 a 19. Takto vyrobené modely šroubových spojů byly obdobně jako jednoduchý geometrický objekt vloženy do aerodynamického tunelu, kde byly ofukovány obdobnými rychlostmi proudění jako v případě jednoduššího geometrického objektu. Pokud jsme ale měřili na válci jako jednodušším geometrickém objektu, počítali jsme s jeho průměrem jako s charakteristickým rozměrem.

Otázkou ovšem je, jaký je vhodný charakteristický rozměr uspořádání šroubového spoje. Navíc uspořádání šroubových spojů může být velice různorodé. Pokusili jsme se proto proměřit alespoň dvě uspořádání, jaká jsou na obrázku 17 a 19. Abychom to zjistili, použili jsme program `Dchar_kolmy_model`, jehož struktura byla následující:

Z Newtonova ochlazovacího zákona jsme vyjádřili koeficient přestupu tepla jako:

$$\alpha = \frac{P}{S(T - T_0)},$$

kde:

P je Výkon, který je do okolí předáván konvekcí [W]

S je Povrch tělesa, na kterém ke konvekci dochází [m²]

$(T - T_0)$ je Rozdíl teploty tělesa a teploty okolí [°C]

Výkon, předávaný do okolí, určíme jako součin napětí a proudu, jímž je napájen spoj (viz kapitola 2), minus výkon, který je předáván do okolí sáláním. Povrch určíme z rozměrů spoje, dle obrázku 15. Rozdíl teplot je pak určen z teploty naměřené termografickou kamerou na spoji a teploty okolí, ve kterém konvekce probíhá. Ta byla určena pokojovým teploměrem v místě nasávání vzduchu do aerodynamického tunelu.

Z těchto údajů je tedy spočten koeficient přestupu tepla takový, jaký by se měl skutečně při konvekci v aerodynamickém tunelu nacházet. Měla by to být hodnota nejbližší skutečnosti,

protože se při jejím výpočtu nespolehneme na konstanty viskozity, či tepelné vodivosti pro suchý vzduch ani na podobnostní čísla. Nepřesnosti by mohly vzniknout při odečítání sálavého výkonu, při měření elektrických veličin napětí a proudu, rozměrů objektu a při určování teplot. To vše jsou ale dosti přesná měření, popřípadě výpočty. Proto takto spočtené hodnoty koeficientu přestupu tepla berme za referenční.

Pokud by tedy byl výpočet koeficientu přestupu tepla pomocí podobnosti naprosto správný, měly by se hodnoty koeficientů přestupu tepla rovnat. Hodnoty ovšem stejné nejsou, a to ani v případě jednoduchého geometrického objektu, kde známe charakteristický rozměr. Vypočtené a naměřené hodnoty koeficientů přestupu tepla pro jednodušší geometrický objekt, jsou uvedeny v tabulce 5 a pro šroubový spoj s charakteristickým rozměrem 38 mm jsou tyto hodnoty uvedeny v tabulce 8. Nejdříve musím zdůraznit, že hodnota naměřených koeficientů přestupu tepla je mnohem vyšší než příklady, které uvádí dosavadní teorie. Je vhodné ale zmínit, že s vedoucím práce jsme hledali možné příčiny či chyby ve výpočtu, a žádné nebyly odhaleny. Rovněž byl tento program s úspěchem použit na jednoduchý geometrický objekt, kde hodnoty koeficientu přestupu tepla vycházely přijatelně. Tato skutečnost by si tedy rozhodně zasloužila další zkoumání.

Pokud tedy budeme považovat naměřené hodnoty koeficientu přestupu tepla za skutečné, budeme s nimi nyní dále pracovat. Je možné vyzorovat, že rozdíl koeficientu přestupu tepla naměřeného a vypočítaného roste se zvyšující se rychlostí větru. Graficky je znázorněna velikost rozdílu naměřených a spočítaných hodnot na rychlosti ofuku na grafu 9. Spočítané hodnoty byly prokládány polynomem. Předpokládáme, že by rozdíl nadále rostl, když by se rychlost větru zvětšovala, ale v současných laboratorních podmínkách jsme to bohužel nebyli schopni odměřit.

Ze známého rozdílu naměřených a spočtených hodnot koeficientů přestupu tepla byl pak pomocí funkce `findroot` ve výpočetním programu `mathematica` vypočítán charakteristický rozměr. Výpočet probíhal tak, že se hledal právě takový rozměr, při kterém by byl nulový rozdíl vypočítaného a naměřeného koeficientu přestupu tepla. Hodnoty takto stanoveného charakteristického rozměru při měření na jednoduchém geometrickém objektu jsou k nahlédnutí v tabulce 9. Na známém uspořádání byla tedy funkčnost programu ověřena a můžeme ho nyní využít pro výpočet charakteristických rozměrů šroubových spojů v různém uspořádání.

5.1 Měření na modelu šroubového spoje

Model pravoúhlého šroubového spoje je na obrázku 17 a jeho rozměry jsou uvedeny na obrázku 15. Odečtené hodnoty z měření jsou vyobrazeny na grafu 10. Opět je zde patrná oblast proudění, ve které se spoj ochlazoval pomaleji než při vyšší rychlosti větru. Pro toto uspořádání je to oblast od $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Stejný jev byl vyzorován při měření podélného uspořádání jednoduchého geometrického objektu, jehož výsledky jsou vyobrazeny na grafu 8 a je teoreticky popsán v kapitole 3.3. Závislost teploty objektu na rychlosti proudění okolního vzduchu je opět podobná jako v případě jednoduchého geometrického objektu.

Pokud dobře určíme charakteristický rozměr tohoto uspořádání, mohli bychom se dobrat objektivních výsledků pomocí započítání Reynoldsova čísla. Charakteristický rozměr jsme se snažili určit za pomoci programu `Dchar_kolmy_model` v příloze. Vypočítané hodnoty charakteristických rozměrů pro toto uspořádání jsou uvedeny v tabulce 10. Hodnoty charakteristických rozměrů se pohybovaly v intervalu: $\langle 0,67, 0,37 \rangle$ [mm]. Nyní tedy vyvstává otázka, jaký rozměr z dané geometrie se nejvíce podobá nejčastěji vyskytované hodnotě v intervalu. Zde je nutné uvést, že charakteristický rozměr nemusí být pouze jeden dominantní rozměr. Musí to ale být takový rozměr, který dané těleso dostatečně popisuje pro teorii podobnosti.

Když se nyní podíváme na rozložení teplot při pravoúhlém uspořádání – obrázek 20, zjistíme, že teplota se na celém uspořádání výrazněji nemění. Bude proto vhodné určit charakteristický rozměr takový, který bude brát v úvahu právě takovéto rozložení teplot. Přitom určení charakteristického rozměru nesmí být příliš složité, aby se dalo v praxi jednoduše odečíst. Po rozmyšlení několika variant, jako poměry ploch kolmé a vodorovné přípojnice, jsem se rozhodl považovat za charakteristický rozměr následující výpočet: vynásobit šířku přípojnice (3 mm) její výškou (15 mm) a tento výsledek vydělit délkou pomyslné přepony, kterou by tvořil pravoúhlý trojúhelník o odvěsnách délky vnějších (delších) rozměrů uspořádání – 58 mm. Pro náš případ jsou tyto odvěsny stejné, a sice s délkou 38 mm. Následně dopočítaný charakteristický rozměr by byl pak 0.7 mm, což se pozitivně projeví při porovnání s přípustným intervalem hledání.

Pokud si ovšem dosadíme za charakteristický rozměr 0.7 mm a spočítáme Reynoldsovo číslo pro různé rychlosti větru, získáme velmi vysoké hodnoty. Závislost teploty na Reynoldsově čísle pro pravoúhlé uspořádání se stanoveným charakteristickým rozměrem 0.7 mm je vyobrazena na grafu 11. Pro srovnání je možné nahlédnout na graf 5, který popisuje stejnou

závislost jen pro jednoduchý geometrický objekt, u něhož se předpokládá, že charakteristický rozměr je určen správně. Proto jsme se pokusili dopátrat, jaký bychom měli vzít charakteristický rozměr z dané geometrie, aby vyšla podobná závislost. Tak se stalo, když jsme jako charakteristický rozměr použili šířku spoje, čili 15 mm. Pak vyšla závislost obdobná jako v případě válce a k nahlédnutí je na grafu 12.

Když se podíváme na osu X u grafů 11 a 12, mají velmi rozdílná měřítka, a to je způsobeno právě jiným charakteristickým rozměrem. Zde se tedy naskýtá nová možnost určení charakteristického rozměru, a sice podle Reynoldsova čísla. Mohli bychom totiž předpokládat, že v místě zlomu exponenciální závislosti, tedy mezi 1 a $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na grafu 10, by se mohla nacházet hodnota $Re = 2300$ a na míru této skutečnosti pak dopočítat vhodný charakteristický rozměr. Problém je, že této teorii neodpovídají výsledky z měření na jednoduchém geometrickém objektu. Z toho lze usuzovat, že je chybná tato teorie, nebo je chybně zvolený charakteristický rozměr i u jednoduchého geometrického objektu. Obě možnosti jsou přípustné a rozhodně by se měly dále prozkoumat. Z časových důvodů se v této práci zmíněnou problematikou zabývat již nemůžeme.

V příloženém programu, korekce_pravouhly_spoj, je pak dopočítána korekce vlivu větru a její výsledky jsou v tabulce 11. V tabulce se nachází korekce jak pro charakteristický rozměr 0.7 mm, tak pro rozměr 15 mm. Sám čtenář pak může posoudit, který rozměr je lepší považovat za charakteristický. S vedoucím práce jsme se ale rozhodli počítat s charakteristickým rozměrem jako 15 mm, protože rozměr 0.7 mm je v porovnání s rozměry modelu opravdu velmi malý.

Také je ovšem možné, že pro toto uspořádání budou platit jiné vztahy pro výpočet Nusseltova, či dalších podobnostních čísel a pak by šlo s větší přesností počítat s charakteristickým rozměrem jako 15 mm.

5.2 Navrhovaná opatření pro praktická měření

Kvůli problémům s prouděním a odčítání rychlosti a směru větru jsme se s vedoucím práce rozhodli pokusit se problém s větrem obejít. Napadlo nás umístit vedle měřeného spoje zvlášť napájený odporový drátek, který by byl napájen z jiného zdroje než spoj. Pokud by foukal vítr jisté rychlosti, drátek by se ochladil a z měření teploty drátku bychom byli schopni převést problém rychlosti větru na problém teploty. Teplota na drátku, reprezentující rychlost, by také byla nezávislá na směru foukání, který by byl také jako vstupní proměnná. Tuto teorii jsme

nadále rozvíjeli a pak nás napadlo použít výkonový odporník místo drátku. Ten má oproti samotnému drátku mnoho výhod, jako přesnost, vhodnější rozměr, možnost uchycení atd. Rovněž odporník bere v potaz i vzniklé proudění při volné konvekci, při daných okolních podmínkách, jako je teplota okolí. Pokud se navíc odporník zvolí vhodně rozměrově veliký, mohl by i svým způsobem průměrovat poryvy větru a nemuseli bychom odměřovat rychlosti za určité časové okamžiky a zpracovávat jejich rozložení. Pokud by měl šroubový spoj obdobnou setrvačnost teplot, můžou tato tělesa reagovat na poryvy obdobně. Tím by se vyřešila i dynamika procesu. Vzhledem k tomu, že neznáme a ani nepotřebujeme znát rychlost proudění, nemusíme se zabývat Reynoldsovým číslem ani jeho závislostmi jak na rychlosti větru, tak na teplotě okolního prostředí.

Dále by se měl podle teoretických úsudků, za jistých podmínek, eliminovat i vliv dopadající sluneční energie. Touto problematikou se ovšem tato práce nezabývá, a tak tato skutečnost nebyla odměřena, ani dále zkoumána.

Měření by probíhalo tak, že by se použily dva odporníky se stejnými elektrickými parametry a jeden z odporníků by byl zakryt, aby byl chráněn vůči vlivu větru, a druhý by byl naopak umístěn ve venkovním prostředí co nejbližší šroubovému spoji. Z rozdílu teplot odporníků je pak možné určit rychlost proudění větru, kterou bychom ale nemuseli do budoucna potřebovat. Do budoucna by se dalo odměřovat vše na jednom odporníku a to tak, že by se nejdříve umístil odporník do krytu, který by zamezoval nucené konvekci a velkému úbytku sáláním. V takovémto prostředí by se pustil do odporníku předem dohodnutý elektrický výkon a v ustáleném stavu teplot by se odečetla teplota. Odporník by se pak přemístil ke šroubovému spoji, nechal by se vyhřát stejným dohodnutým výkonem a zaznamenávala by se teplota. V následném vyhodnocení by se pak mohla ze znalosti rozdílu teplot odporníku dopočítat hledaná teplota spoje.

Takovýto nový způsob měření má tedy mnoho výhod. Nemusíme vůbec měřit či započítávat velikost rychlosti proudění či jeho směr. Následně by se celý problém korekce soustředil pouze na neznámou charakteristického rozměru.

5.3 Měření na rovnoběžném šroubovém spoji

Po odměření modelů šroubových spojů jsme se rozhodli pokusit se udělat korekci na šroubový spoj reálné velikosti. Abychom se co nejvíce přiblížili realitě, byl experiment prováděn ve venkovním prostředí, kde byl vystaven okolní atmosféře a působení větru. Rovněž si tento experiment kladl za cíl vyzkoušet novou navrhovanou metodu korekce.

Nejprve ale nastal problém se samotnou konstrukcí spoje. Simulování koroze, pomocí odporového drátu, se již tak neosvědčilo, protože vytvořený elektrický odpor nebyl tak veliký, aby se spoj ohřál průchodem proudu. Problém tedy byl s vytvořením optimální odporové vrstvy v místě styčných ploch. Jedna z možných variant byla vložit do místa styku výkonové odporníky, a tak spoj vyhřívat nepřímou. Při této variantě by ale mohl nastat problém s nepřesností výkonu, kterým je spoj ohříván, respektive tepelná energie vzniklá v místě styku by odcházela do okolí i mimo šroubový spoj, což by bylo nechtěné. Další možností bylo potříit místa styku odporovým nátěrem. Obdobně je například provedeno vyhřívání zadních okének automobilů. Tato varianta byla ale z důvodů časové, výrobní a finanční náročnosti zavržena. Ideální a nakonec použitá varianta spočívala ve vložení grafitové tuhy do místa styčných ploch. Nepřímou změřený odpor byl při teplotě okolí 10 °C 0.6 Ω . V ustáleném stavu teplot při zahřátí spoje na 103 °C byl odpor spoje 0.8 Ω . Odpor byl tedy teplotně závislý, což plně simulovalo v praxi používaný zkorodovaný šroubový spoj. Rozměry spoje jsou pak k vidění na obrázku 21.

Samotné měření probíhalo tak, že mi ing. Jan Kovář zapůjčil termografickou kameru s možností časového záznamu. Ta byla přichycena a zacílena na šroubový spoj a na dvojici odporníků. Jeden z pořízených snímků je na obrázku 22. Výkonové odporníky byly oba stejné hodnoty, a sice 22 Ω . Celé uspořádání měření je možné vidět na obrázku 23, kde je zakrytý jeden z odporníků a druhý je ztracen ve tmě. Na tomto obrázku je také patrné rozložení bodů, ve kterých byla sledována teplota. Toto měření probíhalo 52 minut a snímek byl odečítán každou minutu. Vyhodnocení měření je na grafu 13, na kterém je zaznamenána teplota v průběhu měření. Červená hodnota je průběh teploty na odporníku. Modrá je pak teplota v bodě SP3, žlutá v bodě SP4 a zelená v bodě SP5. Abychom mohli objektivně porovnat naměřené hodnoty, vynesli jsme všechny hodnoty v poměrných jednotkách do grafu 14. Z hodnot je patrné, že odporník zaznamenal i menší poryvy větru než šroubový spoj.

Nový přístup korekce tedy převádí celý problém pouze na neznámou charakteristického rozměru. Stačí pouze vědět, o kolik se teplota odporníků liší. Uzavřený odporník svou teplotu

po dobu měření prakticky neměnil a tím byl potvrzen předpoklad, že by stačilo odměřit jeden odporník pouze jednou při daném výkonu v uzavřeném prostředí a pro měření šroubového spoje použít pouze tento jeden.

Korekce, naprogramovaná v programu lucerna, probíhala tak, že se vypočítal charakteristický rozměr pro odporník, jeho povrch a výkon, unikající m^2 z odporníku. Charakteristický rozměr se počítal jako ekvivalent charakteristického rozměru trubice, v níž by proudila tekutina, poněvadž pro toto uspořádání jsou vztahy nejznámější. Vypočítá se koeficient přestupu tepla odpovídající výkonu unikající plochou odporníku. Následně se funkcí findroot najde taková teplota, která by odpovídala koeficientu přestupu tepla při volné a nucené konvekci při zadané rychlosti větru. Pro kontrolu se z těchto hodnot teplot zpětně spočte koeficient přestupu tepla. Pokud tyto kontrolní části programu vyhovují, můžeme pokračovat dále na samotnou korekci. Ta probíhá tak, že se dají do vzájemného poměru spočítané koeficienty přestupu tepla při nucené konvekci a při volné konvekci pro charakteristický rozměr odporníku. Poté se napíše funkce pro přepočtení koeficientu přestupu tepla na jiné teploty a charakteristické rozměry. Při tomto převodu se počítá se vzorcem pro Nusseltovo číslo, obsahující mocninu 0.25, poněvadž se při součinu Grasthofova a Prandtlova čísla pro využití v elektroenergetice z této oblasti platnosti prakticky nedostaneme. Tento přepočtení koeficientů přestupu tepla se pak použije na rozměry a teploty šroubového spoje, čímž se určí poměr koeficientů přestupu tepla mezi volnou a nucenou konvekci u šroubového spoje. Teplota spoje pro volnou konvekci zůstává ale nadále neznámá. Z poměru koeficientů přestupu tepla se následně určí koeficient přestupu tepla pro volnou konvekci. A to tak, že se poměr vynásobí koeficientem přestupu tepla při volné konvekci na odporníku. Máme tedy vyjádřený koeficient přestupu tepla na šroubovém spoji, přičemž neznámá zůstává teplota. Stejně se pak pomocí poměru a znalosti koeficientu přestupu tepla na odporníku při nucené konvekci vypočítá koeficient přestupu tepla při nucené konvekci na šroubovém spoji. Zde už ale známe i teplotu na spoji a dostaneme tedy číselnou hodnotu. Z rovnice konvekce získáme poté výkon, unikající m^2 plochy šroubového spoje. Tento výkon se v ustáleném stavu bude rovnat výkonu odcházejícímu při volné konvekci. Pokud tento poznatek napíšeme do rovnice, zůstane nám v rovnici neznámý koeficient přestupu tepla při volné konvekci a hledaná teplota. O koeficientu přestupu tepla z volné konvekce šroubového spoje už ale máme dost informací, proto za pomoci funkce findroot můžeme hledanou teplotu dohledat.

Stále ovšem zůstává nejasnost ohledně určení charakteristického rozměru šroubového spoje pro rovinné uspořádání. Postup pro jeho určení bude probíhat za stejné myšlenky jako určení

charakteristického rozměru modelu šroubového spoje. Máme ovšem k dispozici jen údaje z měření při samovolné konvekci, poněvadž experiment na korekci probíhal ve venkovním prostředí, kde spoj nedosáhl ustáleného stavu teplot. K dispozici výpočtu jsme měli hodnotu teploty okolí, výkonu a geometrie uspořádání. Teplotu na měřeném objektu jsme vypočítali jako střední teplotu, podle obrázku 22. Z těchto údajů jsme tedy určili koeficient přestupu tepla na: $8.3 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Následně jsem se pokusil dopočítat odpovídající charakteristický rozměr, který vyšel 39.4 mm. Pokud se podíváme na rozměry spoje, na obrázku 21, až překvapivě přesně se tento rozměr podobá výšce spoje, kterou jsme se tedy rozhodli uzнат charakteristickým rozměrem. Výpočet je v příloženém programu Dchar_spoj. Dodejme ještě, že zmíněný výpočet charakteristického rozměru je spočítán pro volnou konvekci a nemusí platit, že při nucené konvekci bude tento rozměr stejný.

Výpočet korekce jsme zkusili aplikovat na celé rozložení teplot na spoji, z grafu 15, kde je vyznačena i střední teplota, přičemž pro charakteristický rozměr jsme použili šířku spoje: 40 mm. Výsledek korekce je vidět na grafu 16, kde je modře vyznačená naměřená teplota ve venkovním prostředí, zeleně dopočítaná korekce a červeně je vyznačeno rozložení teplot na spoji při volné konvekci. Výsledky nejsou bohužel dostatečné, tak jsem se rozhodl provést výpočet pro charakteristický rozměr tloušťky spoje: 10 mm. Výsledky z této korekce jsou k vidění na grafu 17 a korekce je očividně dopočítána mnohem přesněji.

Závěr

Z názvu předchozí kapitoly – Korekce pro šroubový spoj - je vidět, že navzdory komplikacím se podařilo odměřit, zpracovat a vyhodnotit měření na šroubovém spoji ve venkovním prostředí, což je v úvodu práce vytyčeno jako vytoužený cíl. Stále ovšem přetrvává problém, že nejspíše není doposud patřičně popsáno proudění, které vzniká při působení větru na geometricky složitější objekty. Bylo by nejspíše možné navrhnout takový charakteristický rozměr těchto objektů, aby se proudění počítalo s patřičnou přesností ze stávajících vzorců. Druhá možnost by byla stanovit na úmluvou dané charakteristické rozměry těchto objektů, nové vztahy popisující proudění. Na stanovení nových vztahů bohužel v této práci nezbyl čas. Rovněž se autor chtěl zabývat například šířením tepla, vznikajícího ve šroubovém spoji, do přípojnice a zvolit tak povrch ekvivalentního tělesa, které by pro výpočty tuto situaci nahrazovalo. Následovat by mohl vliv Slunce, které by mohlo dodávat tepelný výkon do již zahřátého spoje a s tím související vliv zastínění spoje. Vliv těchto a dalších elementů by bylo vhodné vyzkoumat pro v praxi využívanou geometrii spojů, která může být velmi různorodá.

Oproti tomu se ovšem úspěšně odzkoušely metody, které doposud použity nebyly, a sice měření vlivu větru na neznámém šroubovém spoji a známém objektu. Dosažená korekce pak dospívá až k překvapivým výsledkům. Stále je ovšem mnoho možností, jak tuto korekci zlepšit a zobecnit pro praktické využití.

Rozhodně je ale důvod se vlivem větru v termografii dále zabývat.

Použité zdroje

- [1] John H. Leinhard IV, John H. Leinhard V: A Heat Transfer Textbook, Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, Third Edition
- [2] M. Sazima a kol. : Sdílení tepla, SNTL 1993
- [3] J.P. Holman: Heat Transfer McGraw-Hill, 1963
- [4] N. A. Michejev: Základy sdílení tepla, Státní technické nakladatelství, Praha 1952
- [5] Sova J. Kontrola elektrických instalací během plného provozu pomocí termokamery. all for power. 2014, 8, č. 1. s. 122-124. ISSN 1802-8535
- [6] Termokamera.cz. *www.termokamera.cz*. [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [7] Infrazareni. *www.infrazareni.wz.cz*. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://www.infrazareni.wz.cz/92_bezdotykovye/emivity.htm
- [8] Petr Kulhánek jako host v televizním pořadu Hyde Park ČT24, Premiéra: 26. 9. 2011, 20:10 na ČT24
- [9] Konstanty- fyzikální a jiné konstanty. *www.converter.cz*. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/prevody/konstanty.htm>
- [10] Physic database.com. *www.physicdatabase.com*. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://physicsdatabase.com/2014/08/30/power-of-the-prism-and-the-nature-of-light/>
- [11] CoJeCo.cz. *www.cojeco.cz*. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&s_lang=2&id_desc=96555
- [12] Vševěd. <http://encyklopedie.vseved.cz>. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://encyklopedie.vseved.cz/teorie+podobnosti>
- [13] Reynolds number. <http://reynoldsnumber.sdsu.edu/>. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://reynoldsnumber.sdsu.edu/>
- [14] deacademic.com. <http://de.academic.ru>. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/1058352>
- [15] Alvanche Center. <http://www.avalanche-center.org/>. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.avalanche-center.org/Education/glossary/laminar-flow.php>

- [16] Přednáška z cyklu Fyzikální čtvrtky o tepelné pohodě
Přežití v extrémních podmínkách, přednáší ing. Ladislav Sieger, CSc. (ČVUT FEL)
Výrobce videa - Audiovizuální centrum studentů -- AVC-ČVUT
- [17] Engineer's Edge. <http://www.engineersedge.com>. [cit. 2015-05-08]. Dostupné
z: http://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients_13378.htm
- [18] Engineering page. <http://www.engineeringpage.com>. [cit. 2015-05-08]. Dostupné
z: <http://www.engineeringpage.com/technology/thermal/transfer.html>
- [19] Přednáška z cyklu Fyzikální čtvrtky o termografii
Termografie, principy a aplikace, přednáší ing. Jan Sova (Workwell)
Výrobce videa - Audiovizuální centrum studentů -- AVC-ČVUT
FC-20120412-Termografie
- [20] V. Pankrác : Pomocné texty k přednáškám z teorie elektromagnetického pole ZS, Ls
2012/2013, verze 23.9.3013.
- [21] Feynman, Leighton, Sands: Feynmanovy přednášky z Fyziky – revidované vydání -
1. díl, Fragment, Pujmanové 1221/4, Praha 4, ISBN 978-80-253-1642-9 (2. vydání,
2013)
- [22] Přednáška o gravitaci z cyklu Fyzikální čtvrtky
Je gravitace pouhou fikcí? O Verlindeově novém pohledu na gravitaci, přednáší prof.
Petr Kulhánek
Výrobce videa - Audiovizuální centrum studentů -- AVC-ČVUT
FC-20111110-Je gravitace pouhou fikcí

Seznam příloh

Na přiloženém CD se nachází tato práce, ve formátu PDF, a programy, sepsané ve výpočetním solveru mathematica, ve formátu nb.

Přiložené programy jsou:

Dchar_kolmy_model.nb

Dchar_spoj.nb

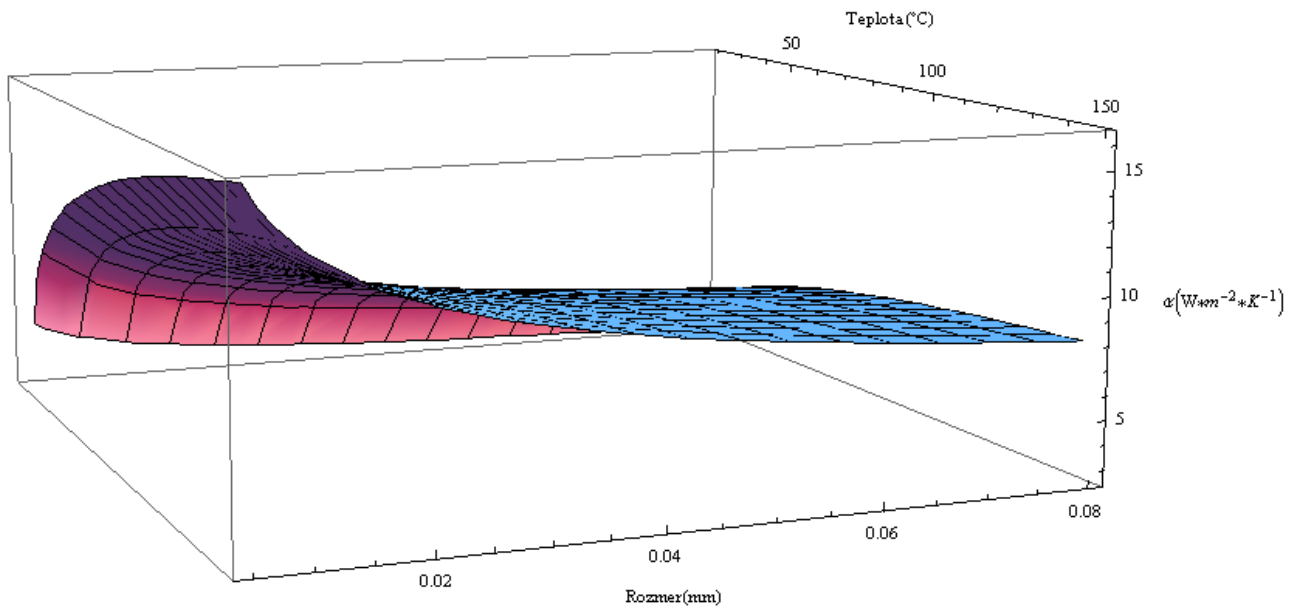
korekce_pravouhly_spoj.nb

korekce_valec.nb

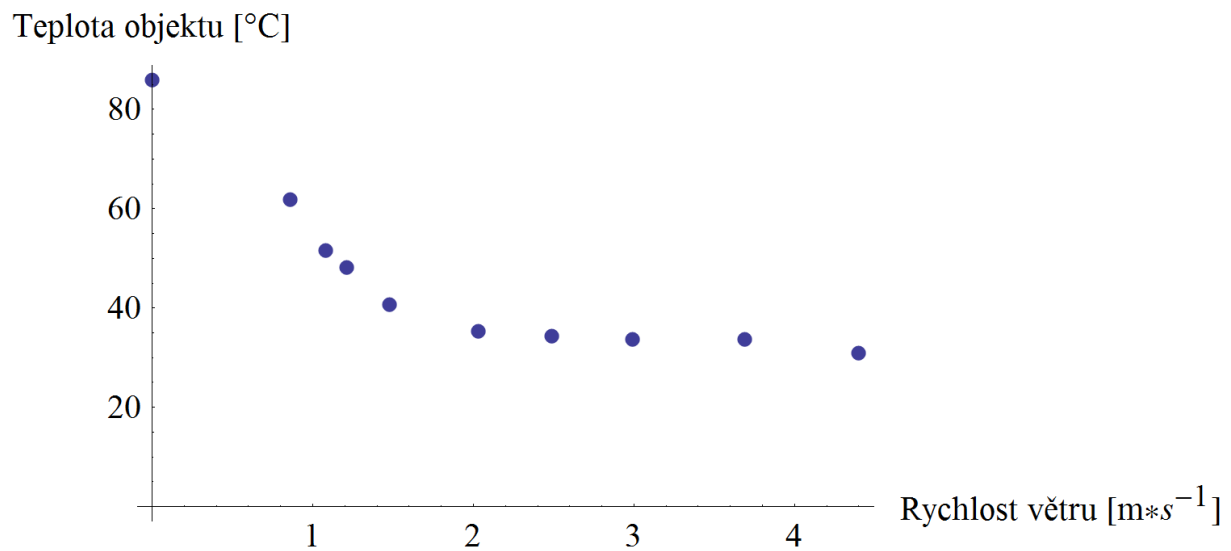
lucerna.nb

overeni_alfa.nb

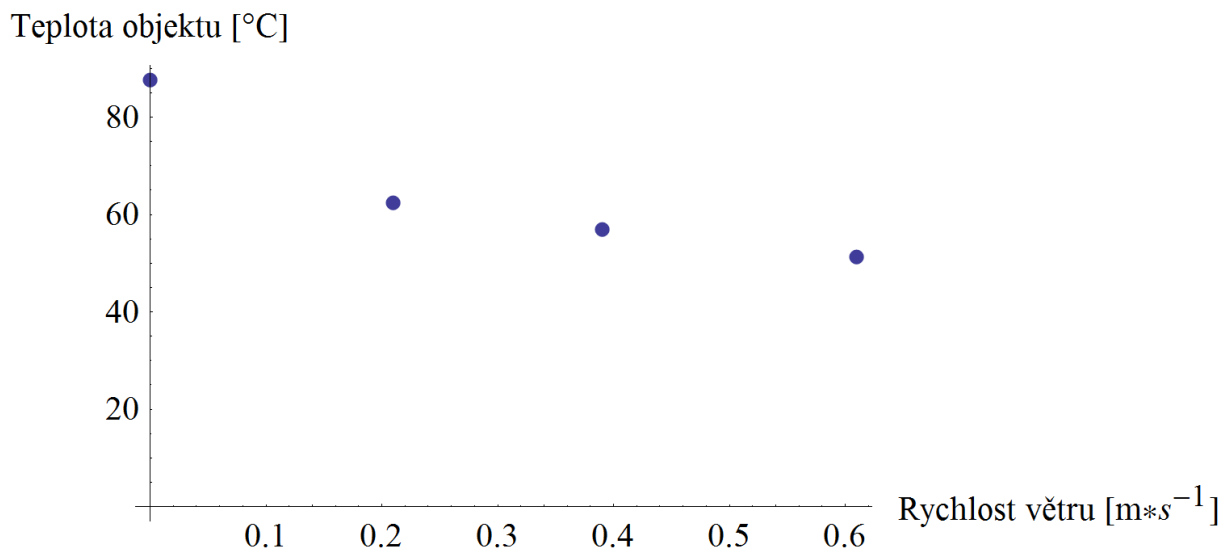
Seznam Grafů



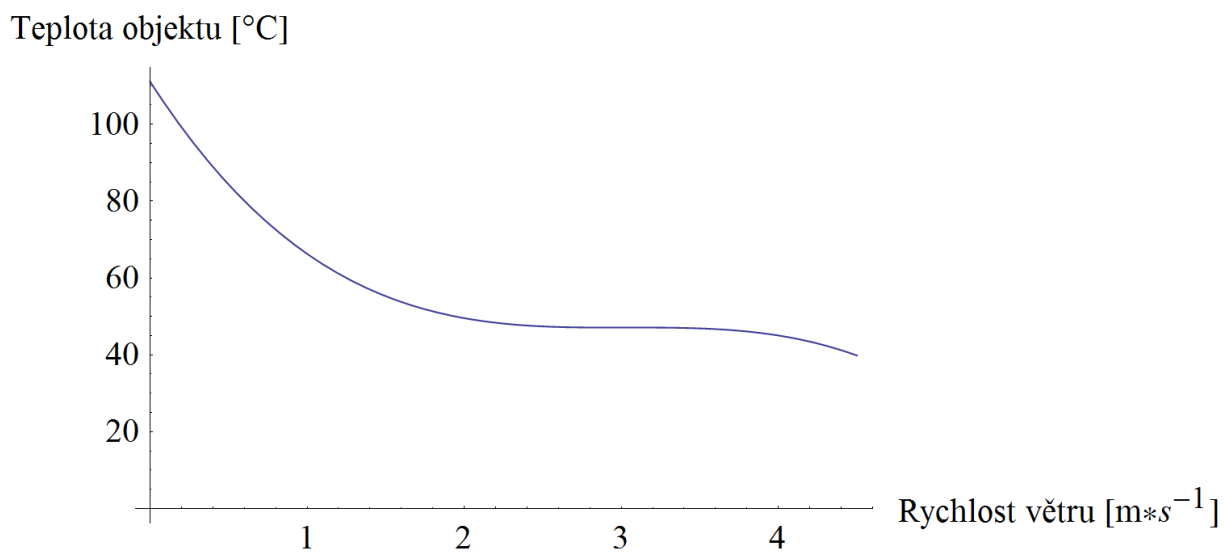
Graf 1 - Závislost koeficientu přestupu tepla na teplotě a charakteristickém rozměru tělesa



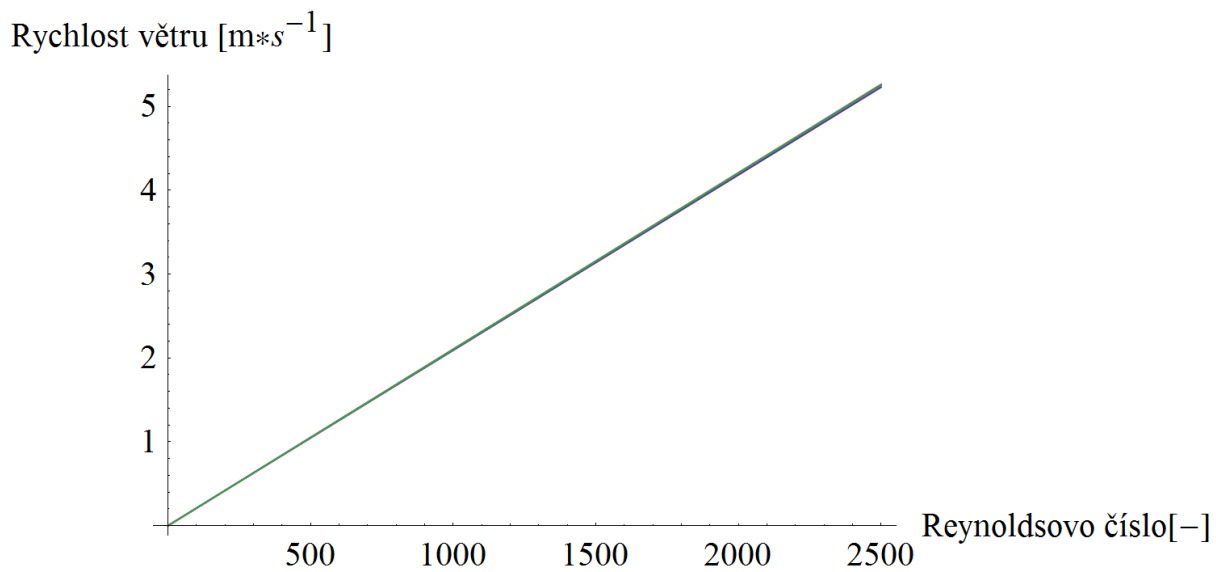
Graf 2 - Grafické znázornění hodnot z měření jednoduchého geometrického objektu



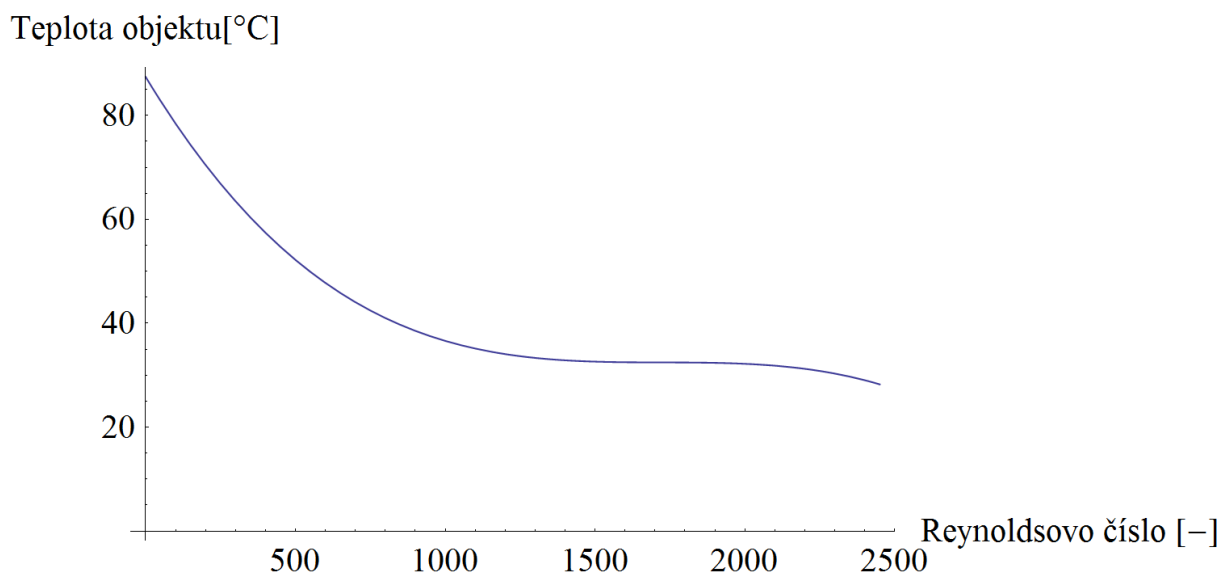
Graf 3 - Detailnější proměření oblasti od rychlosti 0 do 1.48 m*s⁻¹



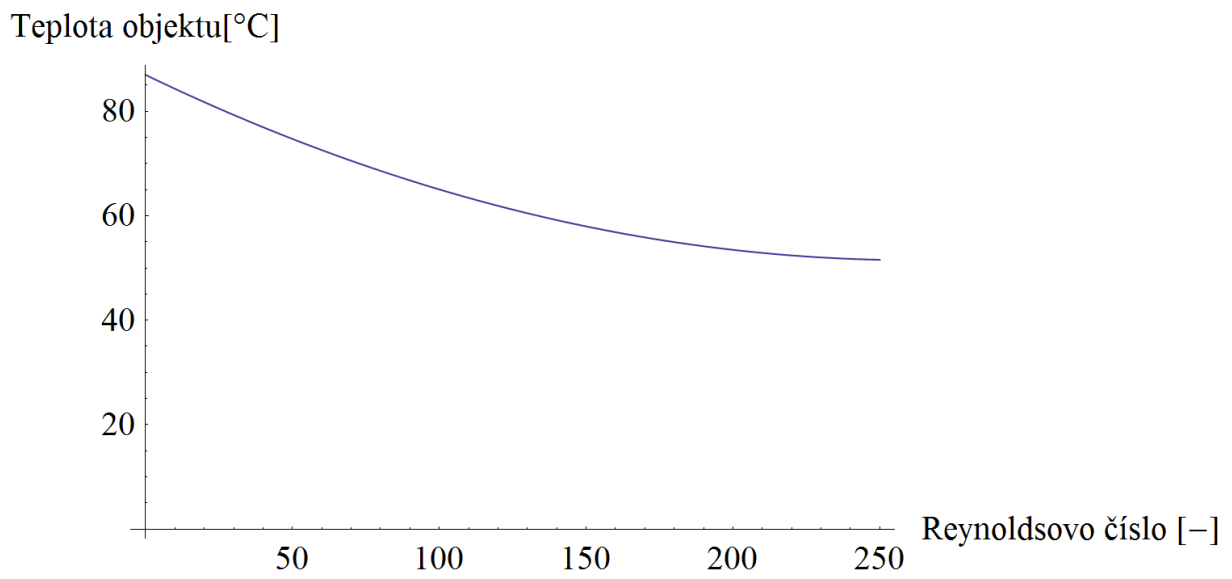
Graf 4 - Měření při vyšším výkonu, pouštěném do odporů



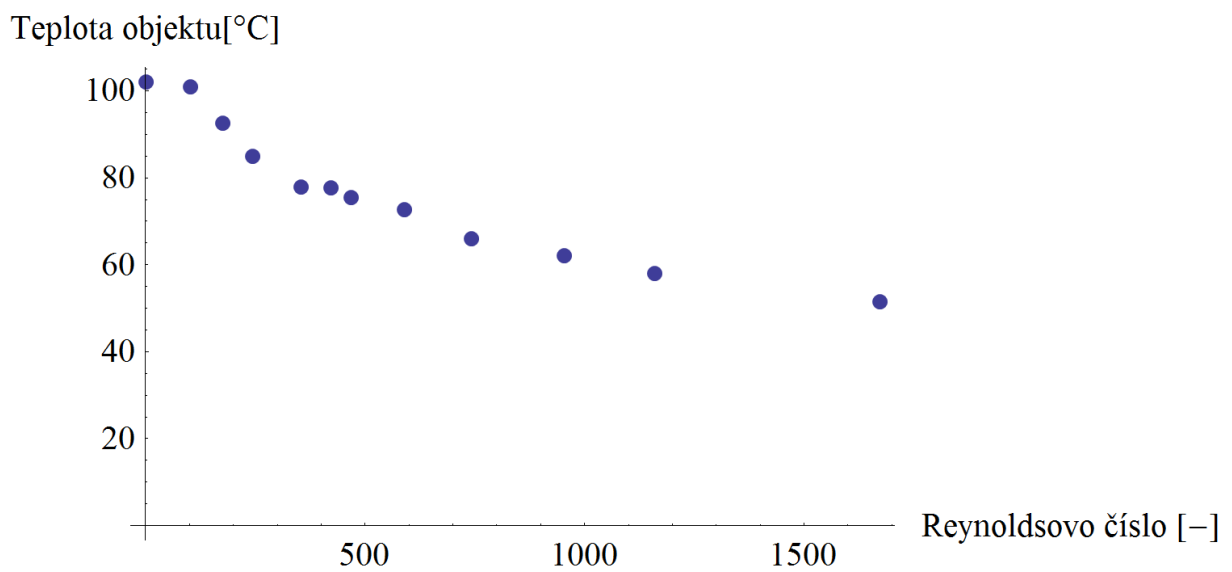
Graf 5 - Závislost Reynoldsova čísla na rychlosti větru



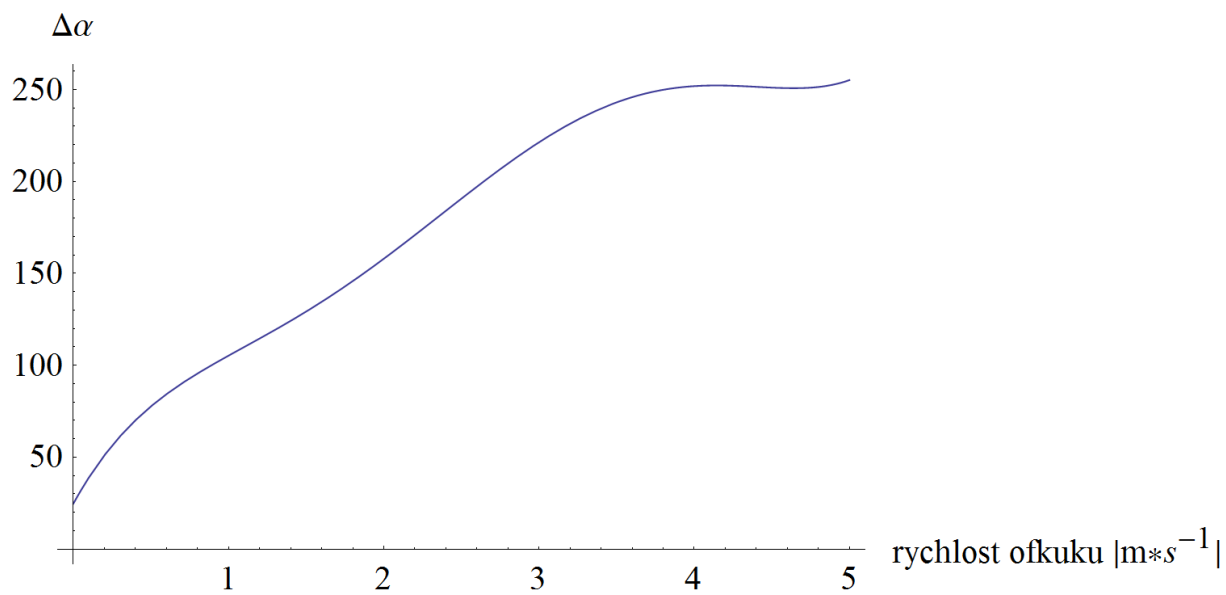
Graf 6 - Závislost teploty na Reynoldsově čísle při příčném měření jednoduchého geometrického objektu



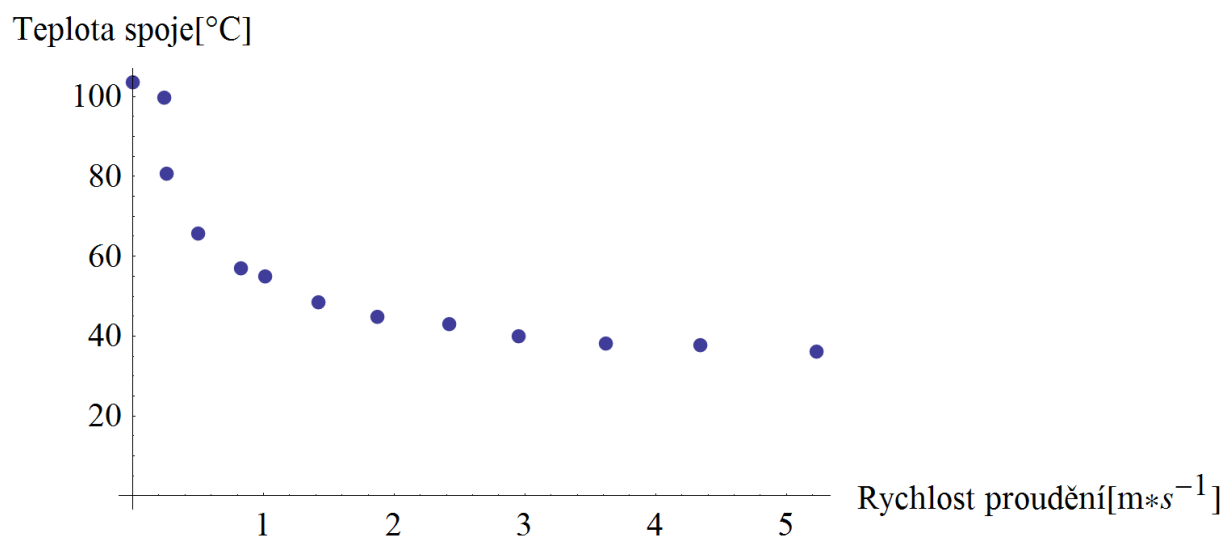
Graf 7 - Závislost teploty na Reynoldsově číse při pomalém ofuku



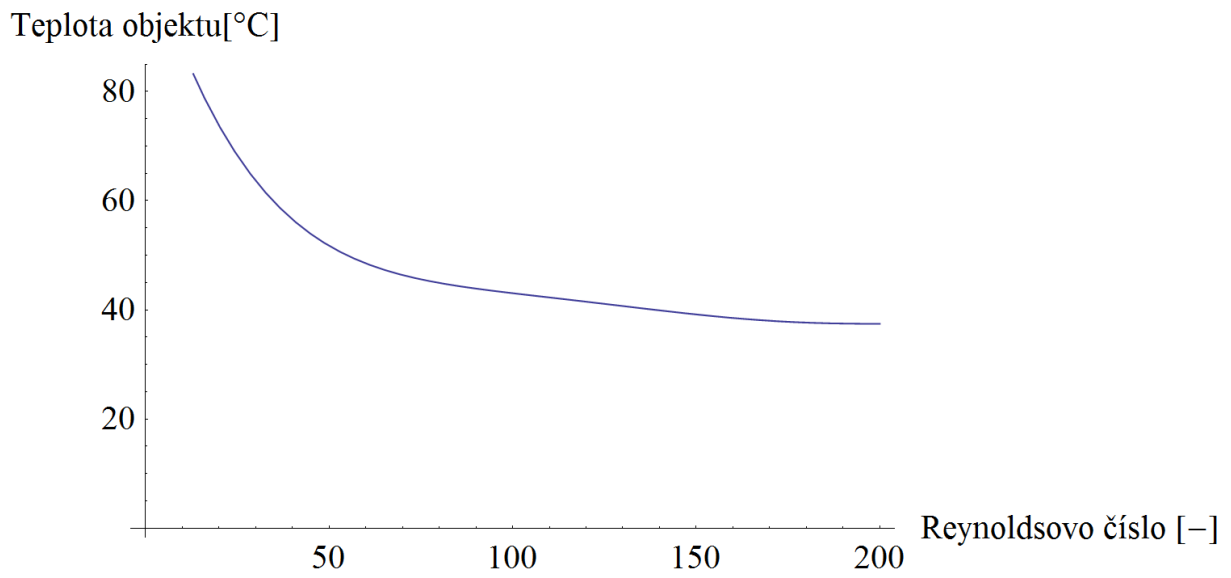
Graf 8- Závislost teploty na Reynoldsově číse při podélném uspořádání



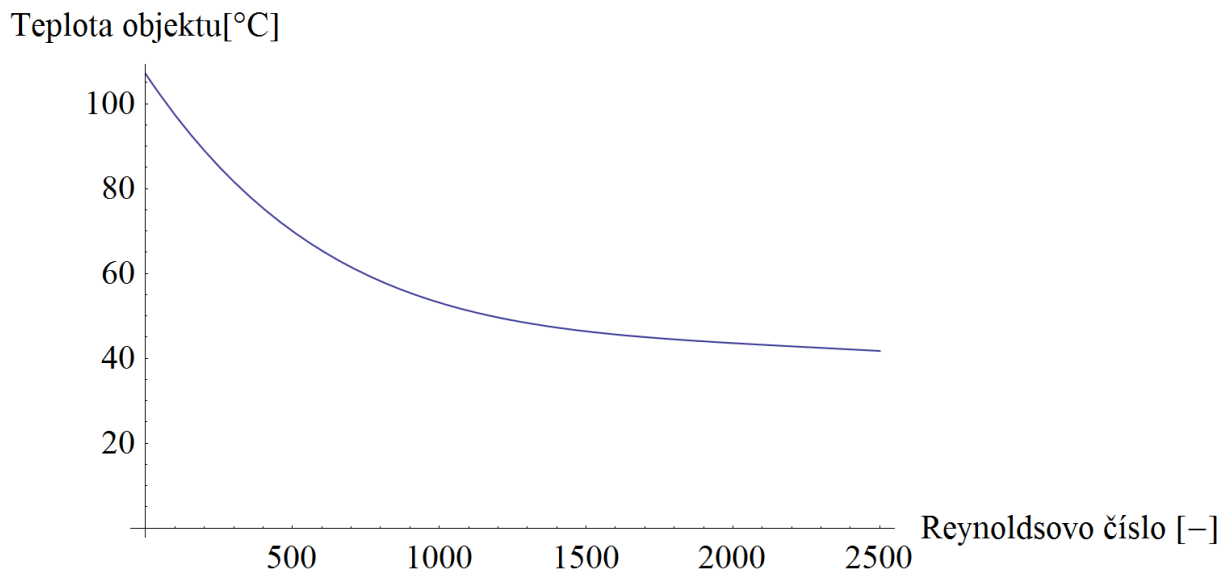
Graf 9- Znárodnění rozdílu naměřeného a spočítaného koeficientu na rychlosti ofuku



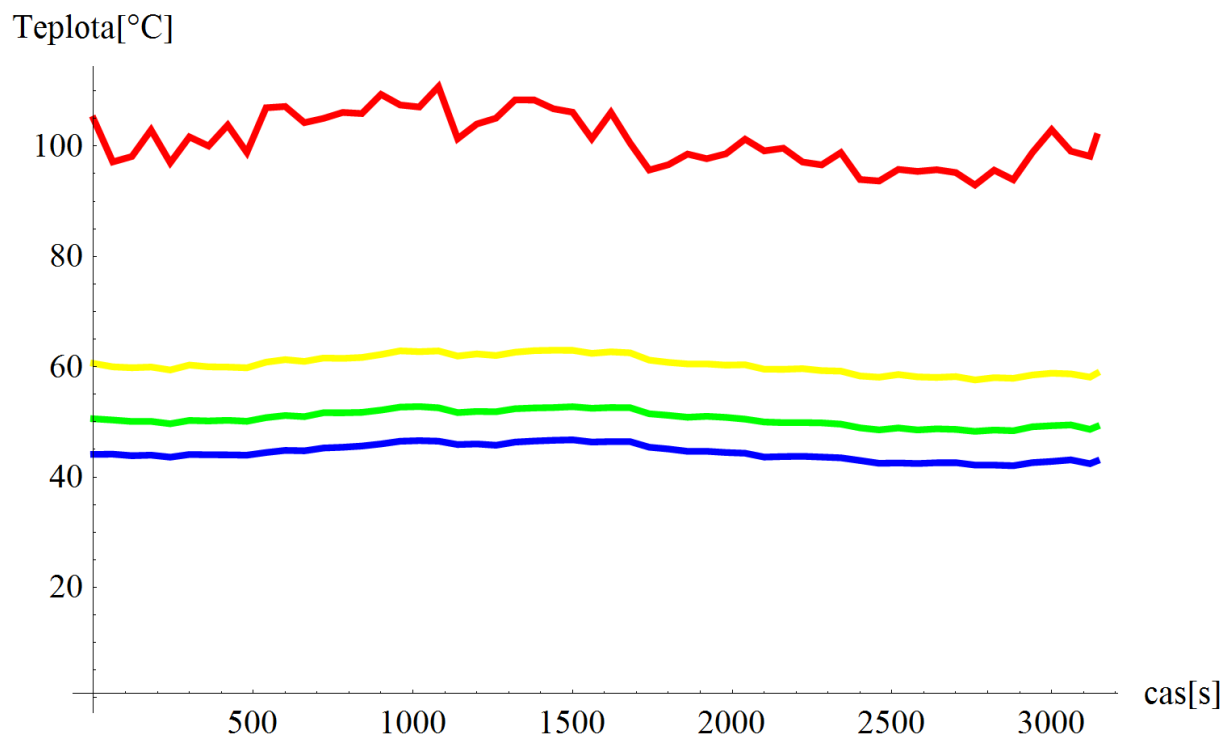
Graf 10 - Měření na modelu šroubového spoje



Graf 11 - Závislost teploty na Reynoldsově čísle, pro charakteristický rozměr 0.7 mm



Graf 12 - Závislost teploty na Reynoldsově čísle, pro charakteristický rozměr 15 mm



Graf 13 - Změny teploty na odporáku a šroubovém spoji při venkovním měření.

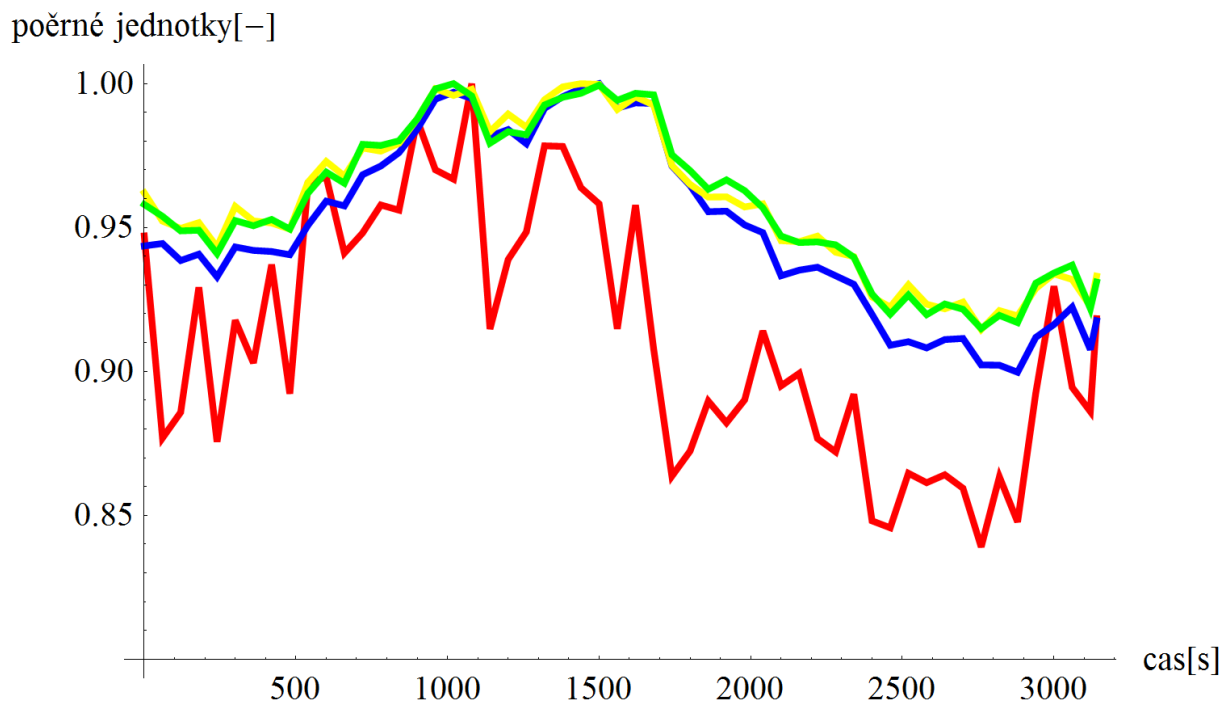
Teplota v bodech, dle obrázku 22:

SP2- červená

SP3- modrá

SP4- žlutá

SP5- zelená



Graf 14 - Změna teploty na odporu s šroubovém spoji při venkovním měření, zobrazená v poměrných jednotkách.

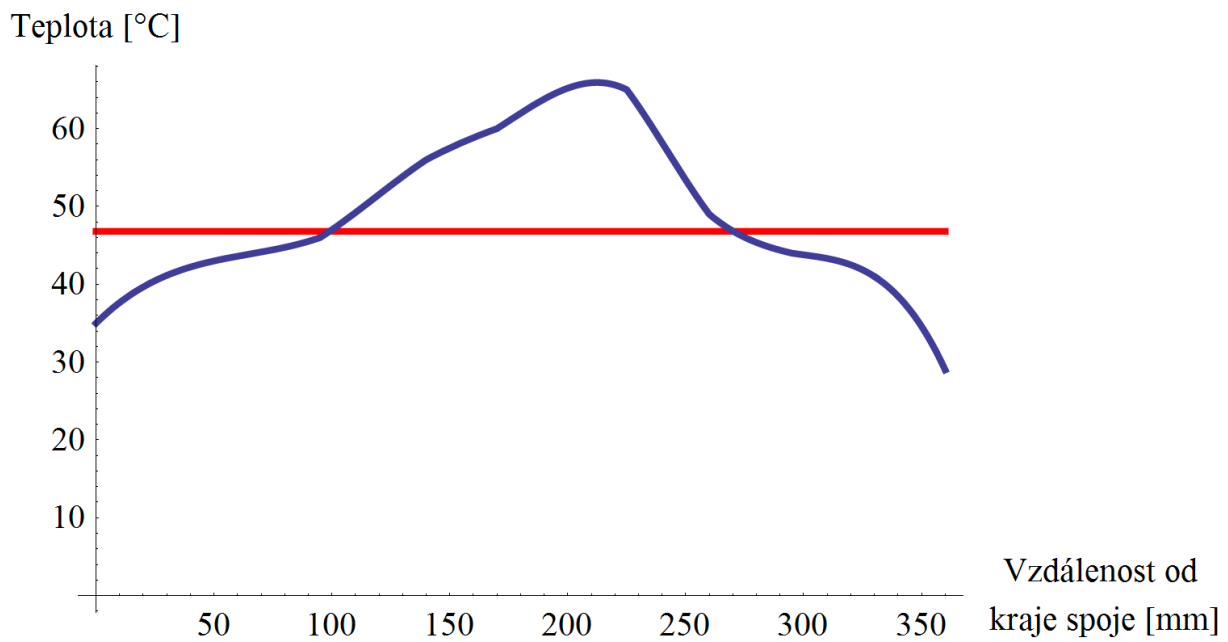
Teplota v bodech, dle obrázku 22:

SP2- červená

SP3- modrá

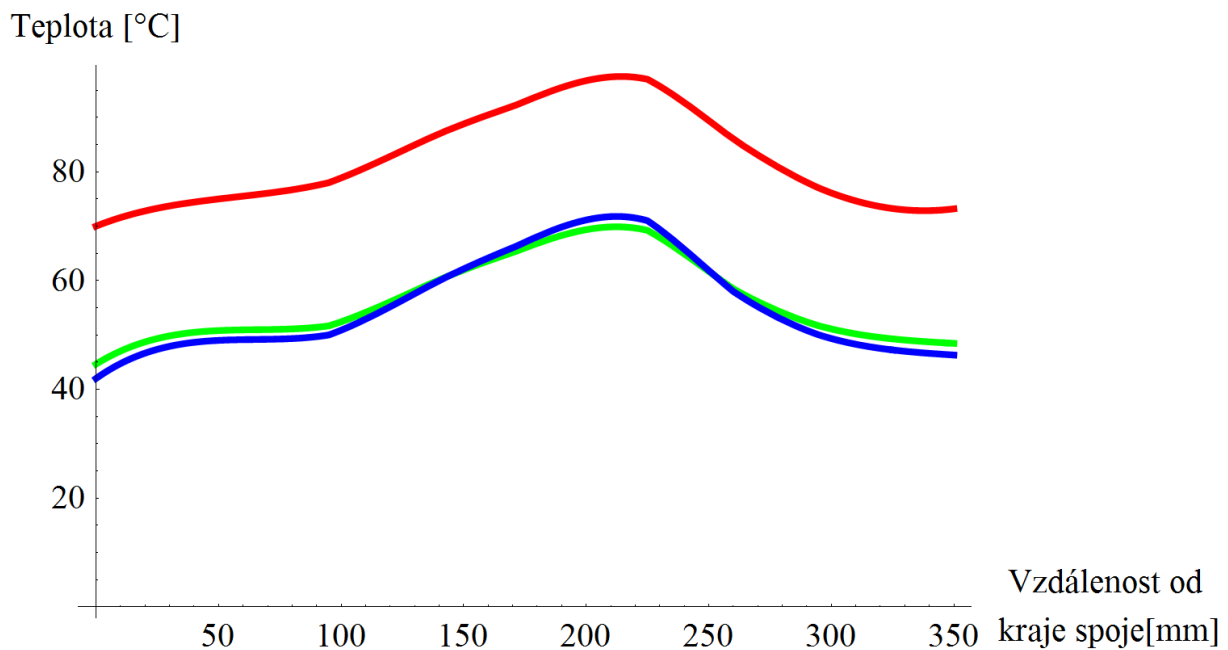
SP4- žlutá

SP5- zelená



Graf 15 - Rozložení teplot na spoji - modře.

Vyznačená střední teplota – červeně

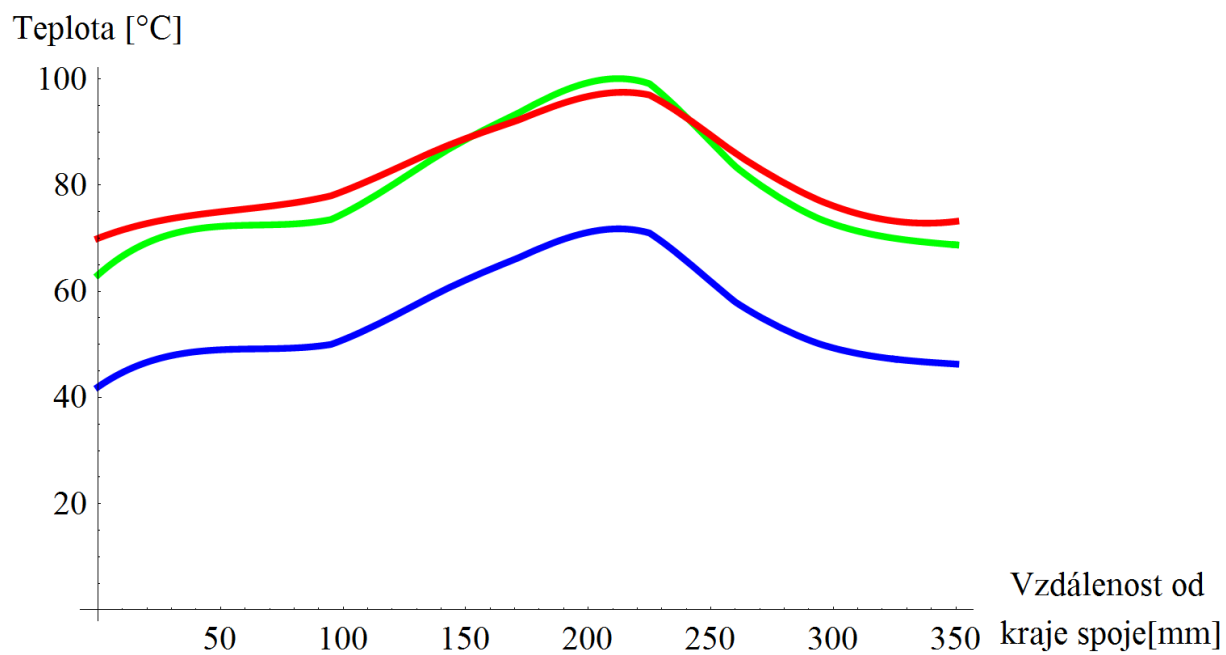


Graf 16 - Rozložení teplot na spoji, včetně korekce pro charakteristický rozměr 40 mm.

Modrá- naměřená křivka ve venkovním prostředí

Červená- naměřená křivka při volné konvekci

Zelená- dopočítaná korekce



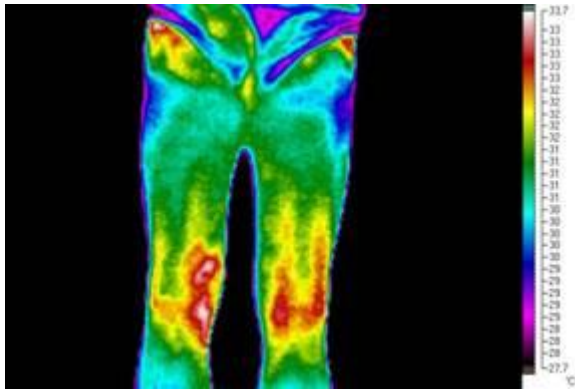
Graf 17 - Rozložení teplot na spoji, včetně korekce na charakteristický rozměr 10 mm.

Modrá- naměřená křivka ve venkovním prostředí

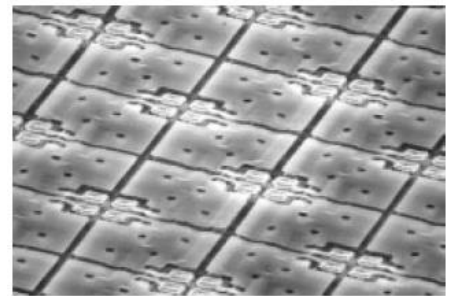
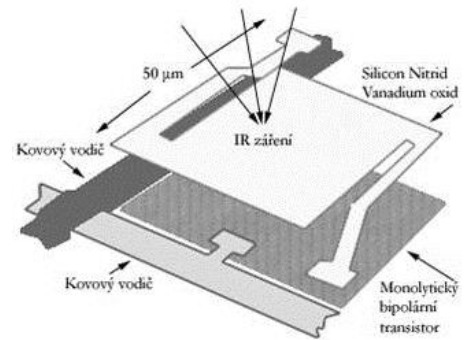
Červená- naměřená křivka při volné konvekci

Zelená- dopočítaná korekce

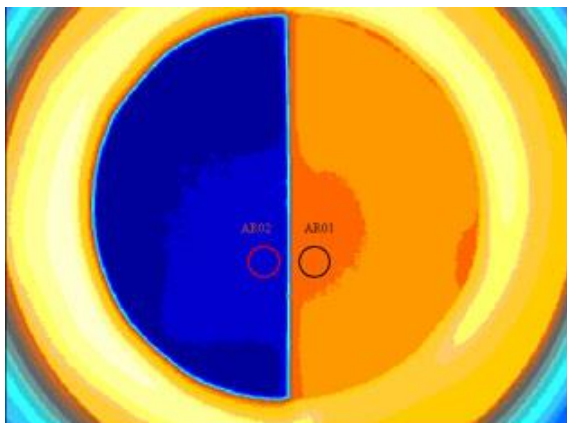
Seznam Obrázků



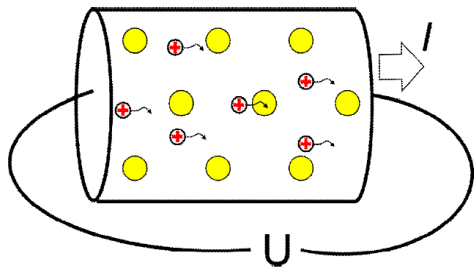
Obrázek 1 - Diagnostika v medicíně za pomoci termografie



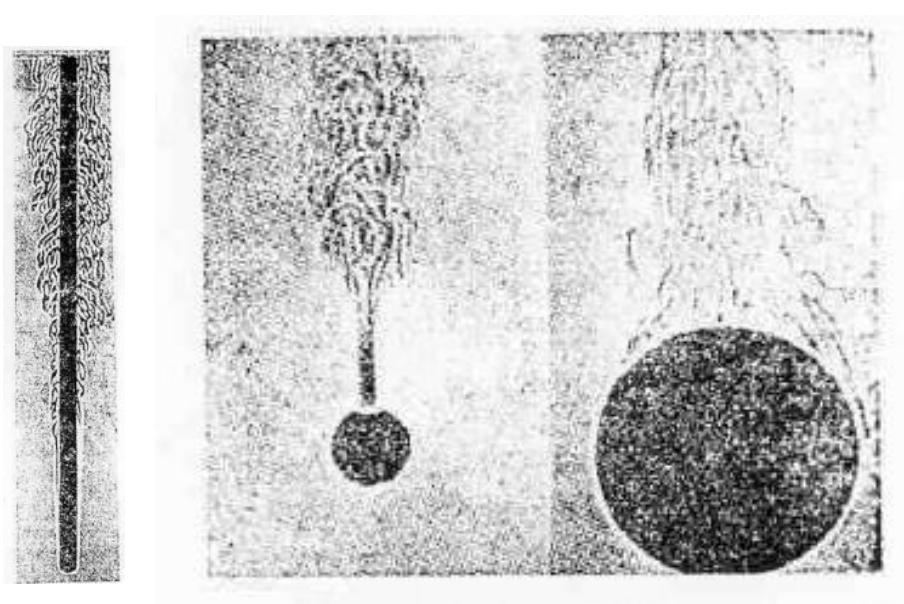
Obrázek 2 - Mikrobolometr a jeho řazení do polí



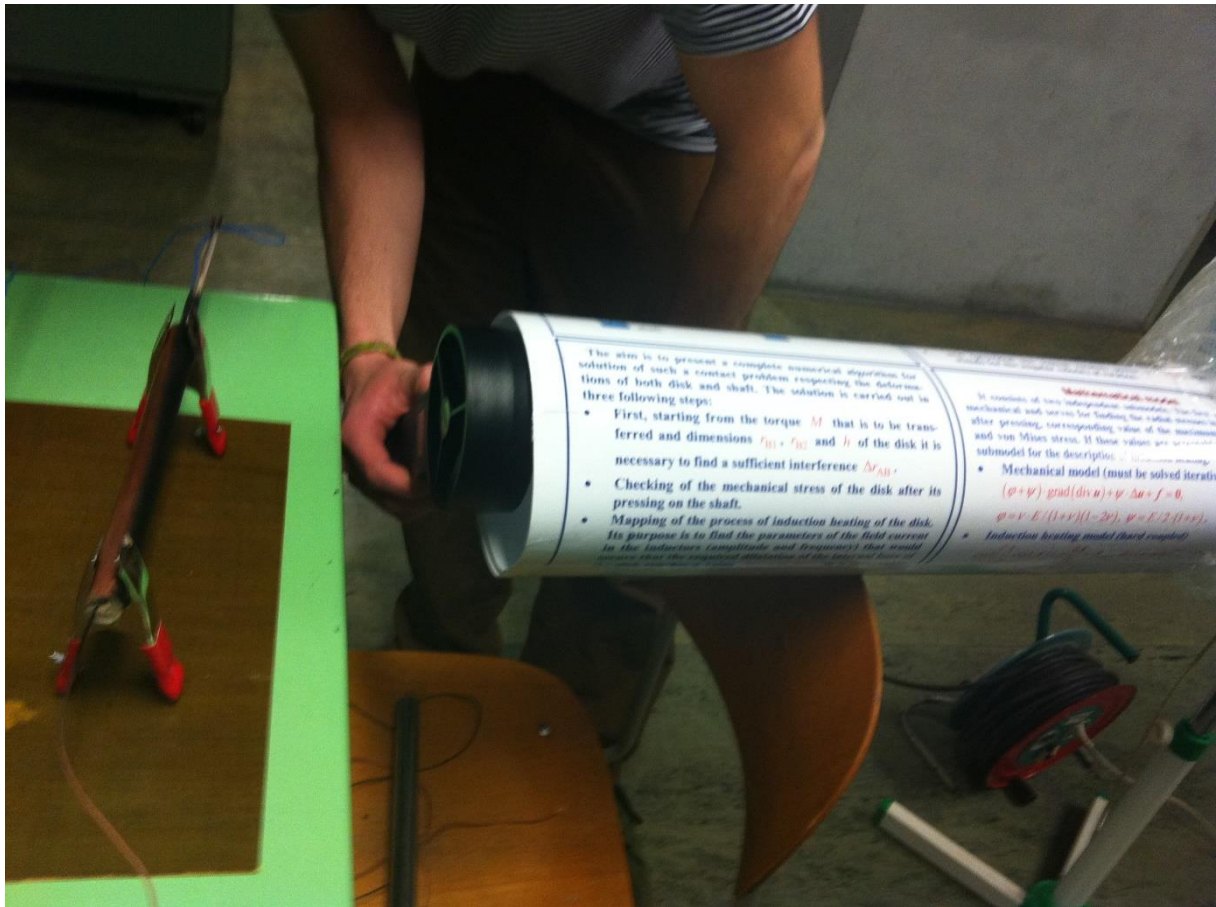
Obrázek 3 - Dvě tělesa se stejnou teplotou, ale rozdílnou emisivitou- pozdější nastavení emisivity



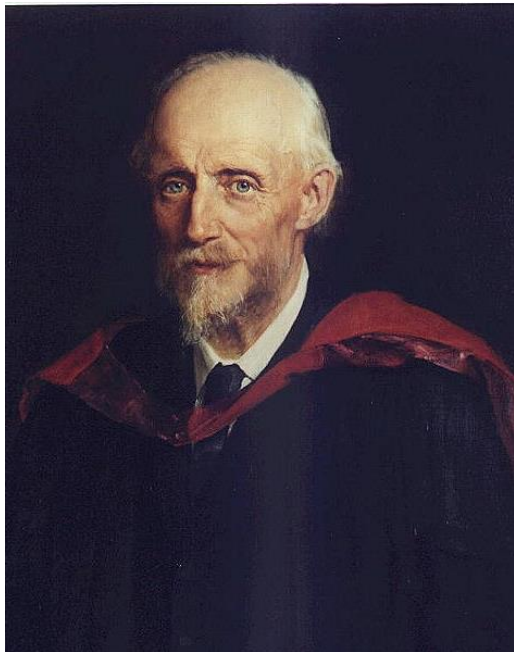
Obrázek 4 - Náboje ve vodiči protékaném elektrickým proudem a jejich srážky



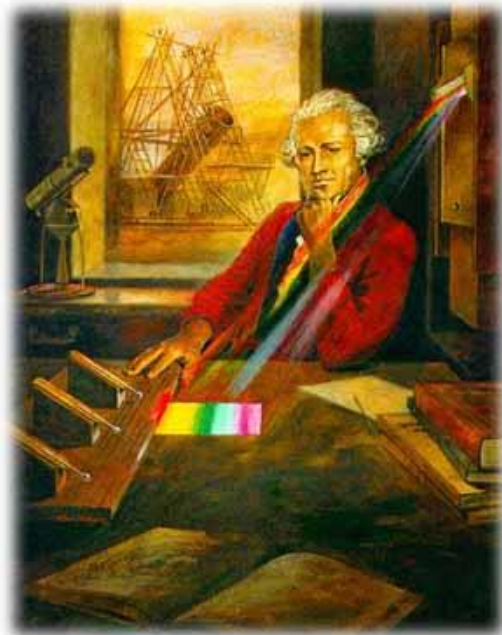
Obrázek 5 - Ukázka kovekce v různém uspořádání



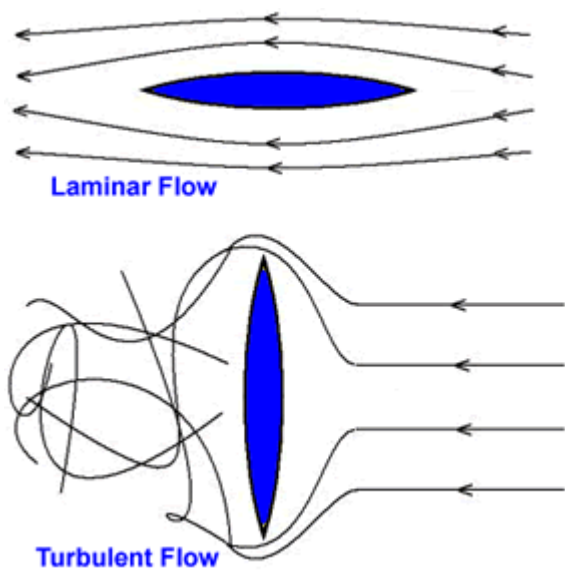
Obrázek 6 - Experiment pro zjištění závislosti Nusseltova a Reynoldsova čísla



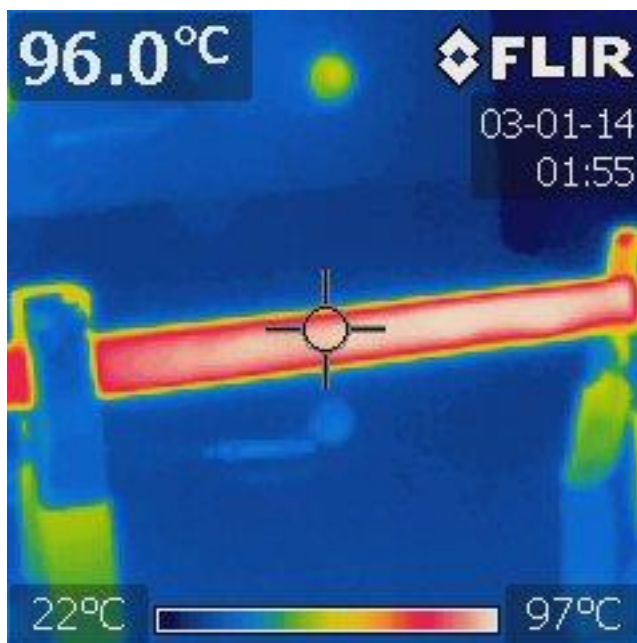
Obrázek 7 - Sir Osborne Reynolds- irský vynálezce, po němž je pojmenováno Reynoldsovo číslo



Obrázek 8 - William Herschel, provádějící experiment s měřením teplot slunečního spektra



Obrázek 9 - Laminární a turbulentní druh proudění



Obrázek 11 - Termografický snímek měření prvního modelu jednoduššího geometrického objektu



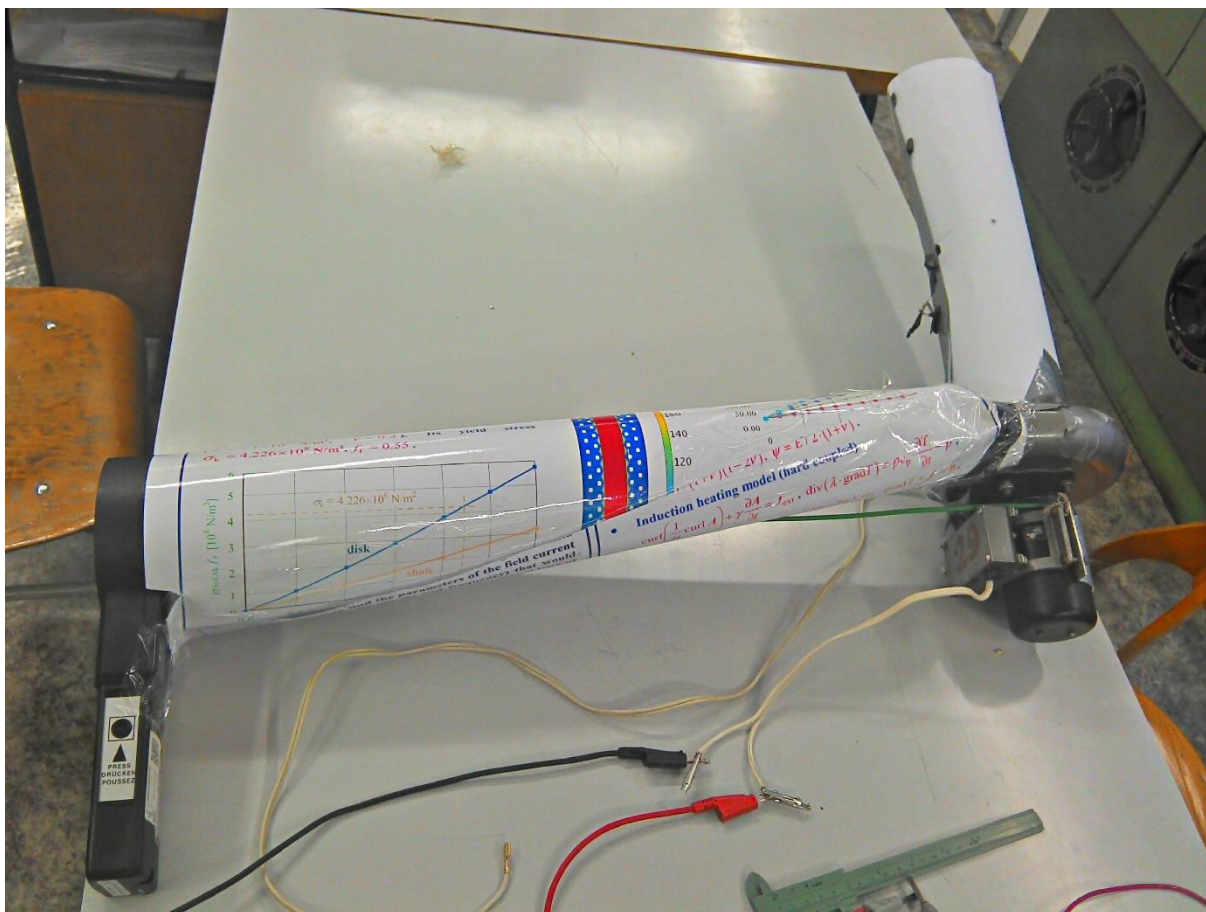
Obrázek 10 - Snaha vytvoření homogenního toku vzduchu



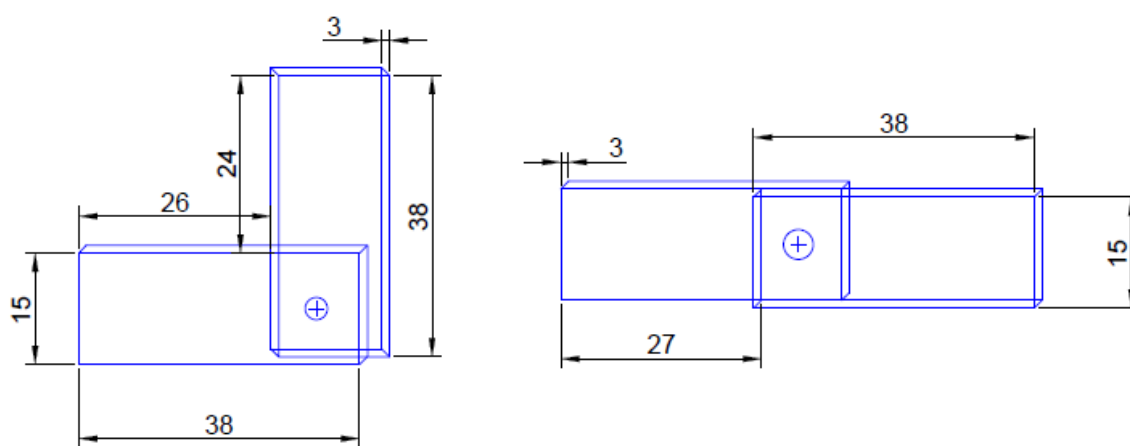
Obrázek 12 - Kontrukce nasávání vzduchu, pro imitování větru



Obrázek 13 - Umístění měřeného objektu v trubici aerodynamického tunelu



Obrázek 14 - Uchycení anemometru pro měření rychlosti vytvořeného větru



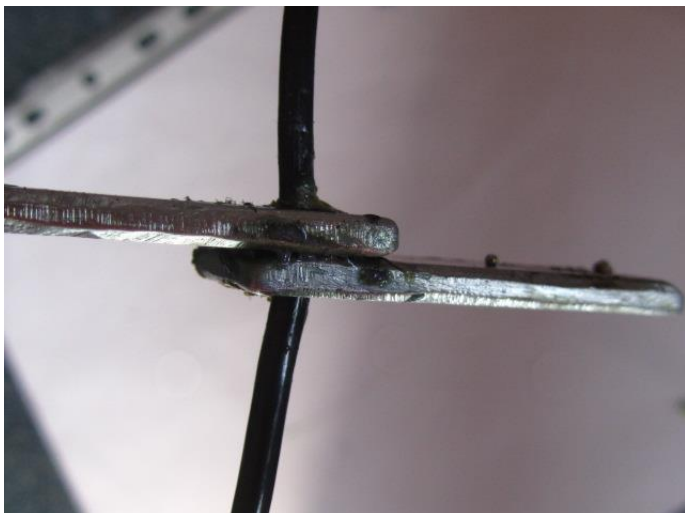
Obrázek 15 - Rozměry modelů šroubových spojů



Obrázek 16 - Odporový drátek, pro simulování koroze šroubového spoje



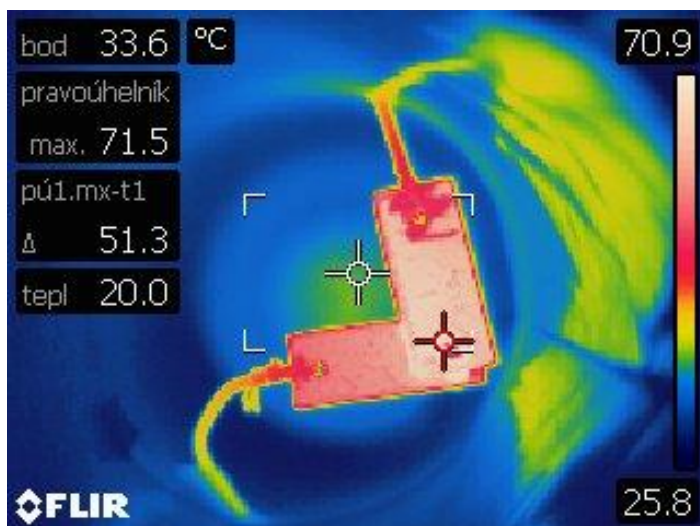
Obrázek 17 - Model šroubového spoje



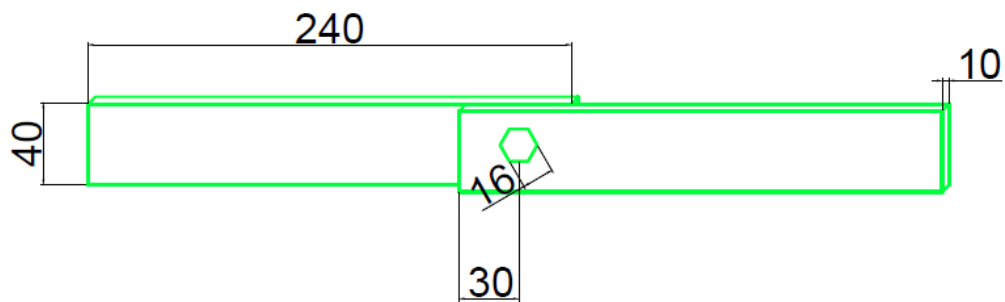
Obrázek 18 - Model šroubového spoje



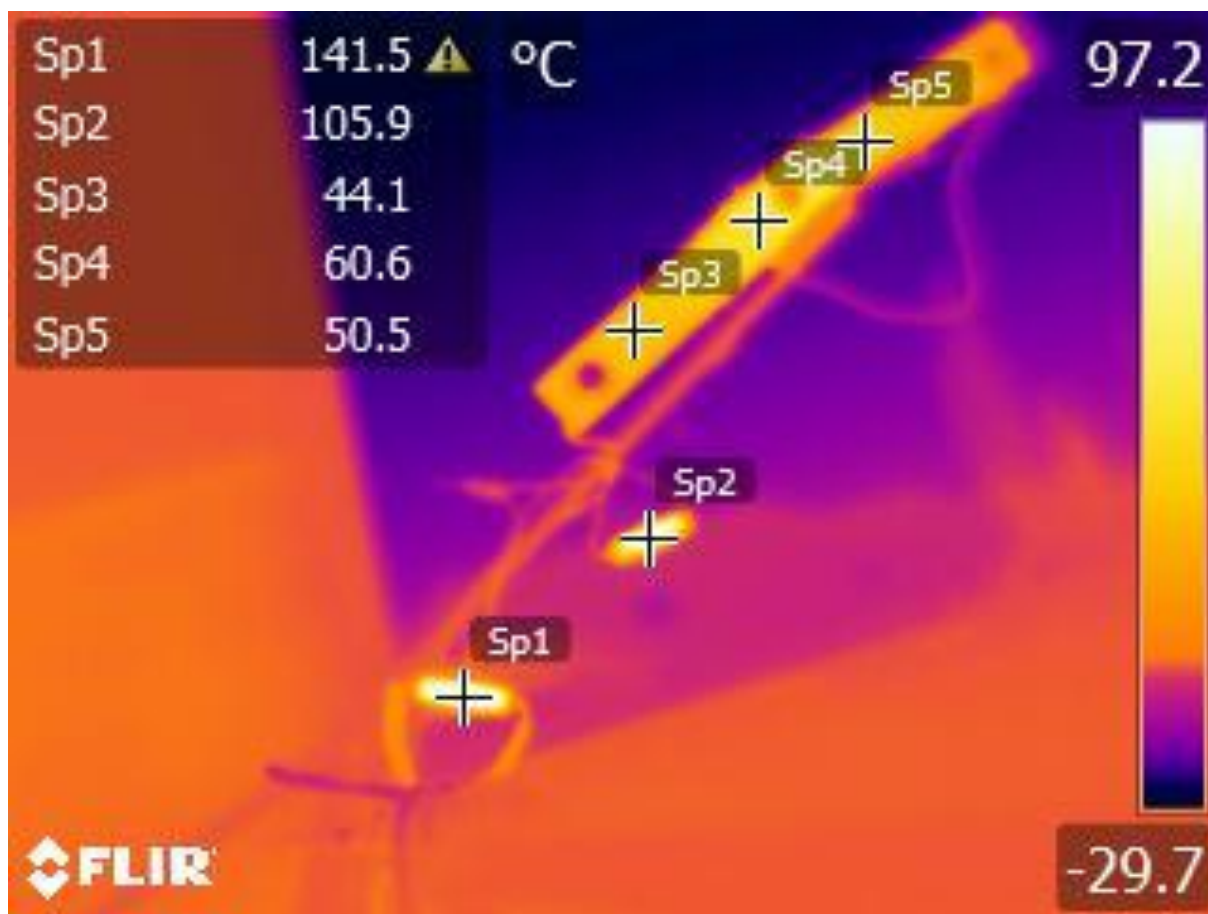
Obrázek 19 - Model šroubového spoje



Obrázek 20 - Rozložení teploty na modelu šroubového spoje



Obrázek 21 - Rozměry modelu reálné velikosti šroubového spoje



Obrázek 22 - Měření na šroubovém spoji ve venkovním prostředí



Obrázek 23 - Rozmístění měřených objektů při experimentu

Seznam tabulek

Prostředí	α pro volnou konvekci $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$	α pro nucenou konvekci $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$
Vzduch	(5-25)	(25-100)
Průmyslové plyny	(3-40)	(40-90)
Voda	(500-1200)	(1200-3000)
Oleje	(50-350)	(350-100)
Průmyslové plyny	(5-10)	(10-350)

Tabulka 1 - Srovnání velikostí koeficientů přestupu tepla při volné a nucené konvekci

Konstanta a	Konstanta b	Velikost Re
0,99	0,305	0 až 4
0,86	0,41	4 až 8
0,59	0,47	8 až 1000
0,665	0,47	1000 až 5000
0,22	0,6	5000 až 50 000
0,026	0,8	Nad 50 000

Tabulka 2 - Konstanty pro určení Nusseltova čísla, v závislosti na velikosti Reynoldsova čísla

Konstanta a	Konstanta b	Velikost součinu Gr*Pr
1	1	0 až 0,001
1,18	0,125	0,001 až 500
0,54	0,25	500 až $2 * 10^7$
0,135	0,33	Nad $2 * 10^7$

Tabulka 3 - Velikost koeficientů pro výpočet Nusseltova čísla z velikosti součinu Grasthofova a Prandtllova čísla

Odpor [Ω]	Průměr [mm]	Délka [mm]	Max. výkon [W]
380	7,5	46	10

Tabulka 4 - Parametry měřeného odporníku

Naměřená teplota [°C]	Rychlost větru [m*s ⁻¹]	Naměřená α [$\frac{W}{m^2 * K}$]	Vypočítaná α [$\frac{W}{m^2 * K}$]	Rozdíl vypočítaných a naměřených hodnot
86	0	15	13	2
62	0.86	19	17	1
51	1.08	27	21	6
48	1.21	35	2	10
41	1.48	46	30	16
35	2.03	48	31	17
34	2.49	50	33	17
34	3	50	34	15
34	3.69	57	38	19
31	4.4	70	43	27

Tabulka 5 - Výsledky měření na jednoduchém geometrickém objektu

Příčný ofuk			Podélný ofuk			ΔRe
Re [-]	T [°C]	Výkon do R [W]	Re [-]	T [°C]	Výkon do R [W]	
0	111	2.3	0	102	2.6	0
114	103	2.3	128	101	2.6	14
190	87	2.3	218	92	2.6	28
280	76	2.3	304	442	2.6	24
437	65	2.3	527	77	2.6	90
475	63	2.3	584	75	2.6	109
527	62	2.3	736	72	2.6	209
566	61	2.3	927	66	2.6	361
723	58	2.3	1192	62	2.6	469
940	53	2.3	1450	58	2.6	510
1187	49	2.3	2090	51	2.6	903

Tabulka 6 - Srovnání měření při příčném a kolmém uspořádání

Naměřená teplota [°C]	Rychlost větru [m*s ⁻¹]	Dopočítaná teplota [°C]	Rozdíl spočítané a naměřené teploty
111	0	111	0
103	0.24	115	-4
87	0.4	107	4
76	0.59	102	9
65	0.92	96	15
64	1	97	14
62	1.11	97	14
63	1.19	99	12
58	1.52	97	14
53	1.98	93	18
49	2.5	95	16
46	3	92	15
43	3.78	89	22
42	4.48	90	21

Tabulka 7 - Vyhodnocení korekce pro jednodušší geometrický objekt

Naměřená α W [$\frac{W}{m^2 * K}$]	Vypočítaná α W [$\frac{W}{m^2 * K}$]	Rozdíl vypočítaných a naměřených hodnot
41	7	34
49	8	41
65	9	56
93	9	84
115	11	104
119	14	105
148	15	133
171	18	153
198	20	178
244	23	221
285	26	259
285	30	255
278	32	246
300	36	264

Tabulka 8 - Koeficienty přestupu tepla při měření na modelu šroubového spoje

Průměr válce [mm]	Spočítaný charakteristický rozměr[mm]	Rozdíl mezi známým a spočítaným rozměrem [mm]	Koeficient přestupu tepla $\frac{W}{[m^2 * K]}$
7.5	11.5	4	12
7.5	13.7	6	14
7.5	11.1	4	17
7.5	10.5	3	21
7.5	9.6	2	26
7.5	9.7	2	27
7.5	10	2	28
7.5	10.7	3	28
7.5	13.3	5	31
7.5	11.8	4	38
7.5	10.5	3	45
7.5	9.8	2	52
7.5	8.8	1	61
7.5	9.7	2	63

Tabulka 9 - Známý a dopočítaný charakteristický rozměr jednoduchého geometrického objektu

Koeficient přestupu tepla $\frac{W}{[m^2 * K]}$	Naměřená teplota [°C]	Vypočítaný charakteristický rozměr [mm]
41	103	0.02
49	100	1
65	80	0.67
93	65	0.55
115	57	0.56
119	55	0.63
148	48	0.55
171	45	0.53
198	43	0.51
244	40	0.41
285	38	0.37
285	38	0.45
278	36	0.45
303	36	0.41

Tabulka 10 - vypočítané charakteristické rozměry pro kolmé uspořádání modelu šroubového spoje

Naměřená teplota [°C]	Rychlost větru [m*s ⁻¹]	Dopočítaná teplota při 15 mm [°C]	Dopočítaná teplota při 0.7 mm [°C]
103	0	103	103
100	0.24	106	115
81	0.26	88	96
65	0.5	80	90
57	0.83	75	88
55	1.01	75	89
48	1.42	73	83
45	1.87	71	82
43	2.42	71	83
40	2.95	67	78
38	3.62	66	77
38	4.34	68	80
36	5.23	66	77

Tabulka 11 - Výpočet korekce pro model šroubového spoje