

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2024

**ERIK
LIBERTIN**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Libertin** Jméno: **Erik** Osobní číslo: **501314**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Studie možného využití vyhřívané rozváděcí lopatky pro snížení eroze v koncových stupních parních turbín

Název bakalářské práce anglicky:

A study of the possible use of heated turbine blades to reduce erosion on the final stages of steam turbines

Pokyny pro vypracování:

Eroze posledních stupňů parních turbín v důsledku přítomnosti kapalně fáze v proudu páry je téma, které si stále zaslouží pozornost. Pro zlepšení spolehlivosti a životnosti parních turbín je nezbytné znát co nejlépe chování kapalně fáze, tak aby bylo možné přijmout odpovídající opatření ke snížení opotřebení oběžných lopatek erozí. Jednou z diskutovaných možností je snížení množství kapalně fáze k oblasti koncových stupňů ohřevem rozváděcích lopatek. Práce je zaměřena na úpravu stávající měřicí trati pro výzkum sekundárních kapek v parní turbíně, umístěné v laboratoři Na Julisce, tak aby bylo možné otestovat elektricky vyhřívanou lopatku.

Práce bude obsahovat:

1. Rešerše stavu poznání o erozi v nízkotlakých dílech parních turbín.
2. Rešerše způsobů snižování vlhkosti v průtočné části parních turbín.
3. Konstrukční návrh vyhřívané lopatky a její implementaci do stávající tratě.
4. Zhodnocení a analýza výsledků měření.

Seznam doporučené literatury:

Podle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Ondřej Bartoš, Ph.D. ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2025**

Ing. Ondřej Bartoš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci "Studie možného využití vyhřívané rozváděcí lopatky pro snížení eroze v koncových stupních parních turbín " vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Ondřeje Bartoše, Ph.D. a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu.

V Praze dne:

.....

Anotační list

- Jméno autora:** Erik Libertin
- Název BP:** Studie možného využití vyhřívané rozváděcí lopatky pro snížení eroze v koncových stupních parních turbín
- Anglický název:** A study of possible use of heated turbine blades to reduce erosion on the final stages of steam turbines
- Akademický rok:** 2023/2024
- Ústav/Odbor:** Ústav energetiky
- Vedoucí BP:** Ing. Ondřej Bartoš, Ph.D.
- Bibliografické údaje:** Počet stran: 87 Počet obrázků: 39
Počet tabulek: 25 Počet příloh: 11
- Klíčová slova:** Eroze, parní turbíny, potlačování eroze, parní elektrárna, turbínové lopatky, experiment, návrh experimentu
- Keywords:** Erosion, steam turbines, reduction of erosion, steam power plant, turbine blades, experiment, experiment design
- Anotace:** Bakalářská práce se soustředí na studii možností využití vyhřívané rozváděcí lopatky za účelem potlačení negativního působení vodních kapek na turbínové lopatce – erozi. Práce obsahuje rešerši mechanismu vzniku eroze a možností snižování vlhkosti v průtočné části turbíny. Praktická část obsahuje návrh a realizaci experimentu, využívající vyhřívanou lopatku včetně analýzy a vyhodnocení.
- Abstract:** This bachelor's thesis pays attention to options of negative effects reduction from water drops - erosion, on turbine blade by using heated stator blade. Thesis includes research of erosion creation mechanism and possibilities of humidity reduction in turbine flow section. Practical section includes design and realisation of experiment using heated stator blade with analysis and evaluation.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Ondřeji Bartošovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat svým blízkým, za projevenou podporu, nejen při práci, ale při celém studiu.

Obsah

| | |
|--|----|
| Seznam symbolů, indexů a zkratk..... | 9 |
| 1 Úvod..... | 12 |
| 2 Problematika eroze lopatek parních turbín | 13 |
| 2.1 Úloha parní elektrárny v rámci české energetiky..... | 13 |
| 2.2 Oběh parní elektrárny..... | 14 |
| 2.3 Parní turbína | 15 |
| 2.3.1 Součásti parní turbíny | 15 |
| 2.4 Vlhká pára, vznik vodního filmu a kapek | 17 |
| 2.5 Eroze lopatek..... | 19 |
| 2.5.1 Průběh erozního poškození..... | 21 |
| 3 Způsoby omezování vzniku vodního filmu | 22 |
| 3.1 Přívod horké páry lopatkami | 22 |
| 3.2 Odsávací systém/regenerační odběr | 22 |
| 3.3 Odsávání skrze lopatky | 22 |
| 3.4 Ohřívání lopatek..... | 23 |
| 3.5 Separátory vlhkosti..... | 23 |
| 3.6 Konstrukční vlivy | 24 |
| 3.6.1 Axiální vzdálenost | 24 |
| 3.6.2 Úprava povrchu lopatek | 24 |
| 3.6.3 Snížení obvodové rychlosti | 25 |
| 3.6.4 Baumannův stupeň | 25 |
| 3.6.5 Délka lopatek..... | 25 |
| 3.6.6 Přihřívání a teplota páry | 26 |
| 3.7 Pasivní způsoby ochrany lopatek | 26 |

| | |
|--|----|
| 4 Návrh experimentu využívající vyhřívaný model lopatky | 28 |
| 4.1 Fungování měřící trati | 28 |
| 4.2 Návrh lopatek | 30 |
| 4.2.1 Geometrické charakteristiky lopatkového profilu NACA 0010..... | 30 |
| 4.3 Navržené způsoby vyhřívání..... | 31 |
| 4.4 Výpočty výkonů potřebných k ohřevu lopatek | 33 |
| 4.4.1 Aproximace deskou | 33 |
| 4.4.2 Výpočet skrze experimentální korelaci dle [36]..... | 37 |
| 4.4.3 Soupis vypočtených výkonů..... | 38 |
| 4.5 Návrh usazení lopatek | 38 |
| 4.6 Zapojení experimentu..... | 40 |
| 4.6.1 Užití typů čidel a jejich umístění | 40 |
| 5 Výsledná podoba experimentu..... | 41 |
| 5.1 Výsledná podoba vyrobených součástí | 41 |
| 5.2 Výsledná podoba měřícího tunelu..... | 42 |
| 5.3 Výsledná podoba topných systémů | 43 |
| 5.4 Výsledná podoba systému regulace | 44 |
| 6 Vyhodnocení a analýza měření..... | 45 |
| 6.1 Provedená měření..... | 45 |
| 6.2 Vyhodnocované veličiny a jejich výpočetní modely | 46 |
| 6.2.1 Tlak..... | 46 |
| 6.2.2 Teplota..... | 47 |
| 6.2.3 Hustota..... | 47 |
| 6.2.4 Rychlost před a za dýzovými bloky, hmotnostní průtok | 47 |
| 6.2.5 Odváděný výkon..... | 48 |
| 6.2.6 Porovnávací součinitel přestupu..... | 48 |

| | |
|--|----|
| 6.2.7 Teplota stěny lopatky a proudu | 48 |
| 6.2.8 Přechodový jev | 49 |
| 6.3 Průběhy veličin a dosažené hodnoty porovnávacího součinitele | 51 |
| 6.4 Analýza přechodových jevů | 56 |
| 6.4.1 Průběhy přechodových jevů – celkový ohřev lopatek | 57 |
| 6.4.2 Průběhy přechodových jevů – místní ohřev lopatek | 59 |
| 6.4.3 Průběhy přechodových jevů – ohřev s náklonem lopatky | 63 |
| 6.4.4 Vztah součinitele C a K pro jednotlivé typy ohřevů | 66 |
| 6.5 Určení množství kapek dopadlých na povrch lopatky | 69 |
| 6.5.1 Předpoklad odparu vodních kapek | 69 |
| 6.5.2 Předpoklad ohřevu vodních kapek na teplotu stěny lopatky | 70 |
| 6.5.3 Předpoklad kombinace ohřevu a odpaření | 71 |
| 6.5.4 Porovnání s množstvím vlhkosti přivedené do tunelu | 72 |
| 6.6 Diskuze výsledků | 73 |
| 6.6.1 Diskuze přechodových součinitelů | 73 |
| 6.6.2 Diskuze množství dopadlých kapek | 74 |
| 6.7 Poznatky a nepřesnosti vnesené do měření | 74 |
| 6.8 Přesnost použitých čidel | 76 |
| 7 Závěr | 77 |
| Literatura | 78 |
| Seznam obrázků | 83 |
| Seznam grafů | 85 |
| Seznam tabulek | 86 |
| Seznam příloh | 87 |

Seznam symbolů, indexů a zkratek

| | |
|--|--|
| Re [-] | Reynoldosovo číslo |
| Pr [-] | Prandtlovo číslo |
| Nu [-] | Nusseltovo číslo |
| L [m] | Charakteristický rozměr |
| b [m] | Tloušťka stěny |
| m [m] | Šířka axiální mezery mezi rozváděcími a obežnými lopatkami |
| $\rho_{vz} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ | Hustota proudícího vzduchu |
| $\rho_1 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ | Hustota vzduchu před dýzovými bloky |
| $\rho_2 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ | Hustota vzduchu za dýzovými bloky |
| $\rho_0 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ | Stagnační hustota |
| μ_{vz} [Pa*s] | Dynamická viskozita vzduchu |
| $c_{p/vz} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ | Měrná tepelná kapacita vzduchu |
| $c_{p/vod} \left[\frac{J}{g*K} \right]$ | Měrná tepelná kapacita vody |
| $c_{p/lop} \left[\frac{J}{kg*K} \right]$ | Měrná tepelná kapacita lopatky |
| $l \left[\frac{J}{g} \right]$ | Měrné skupenské teplo vypařování |
| $\lambda_{vz} \left[\frac{W}{m*K} \right]$ | Součinitel tepelné vodivosti vzduchu |
| $\lambda_{stěny} \left[\frac{W}{m*K} \right]$ | Tepelná vodivost stěny |
| $\lambda_{lop} \left[\frac{W}{m*K} \right]$ | Tepelná vodivost materiálu lopatky |
| $r \left[\frac{J}{kg*K} \right]$ | Měrná plynová konstanta vzduchu |
| $\alpha \left[\frac{W}{m^2*K} \right]$ | Součinitel přestupu tepla |
| S_{lop} [m ²] | Povrch lopatky |
| A_1 [m ²] | Průtočná plocha před dýzovými bloky |
| A_2 [m ²] | Průtočná plocha za dýzovými bloky |
| \dot{Q} [W] | Obecný tepelný tok |
| \dot{Q}_{1c} [W] | Tepelný tok pro celkový ohřev |
| \dot{Q}_{1ck} [W] | Tepelný výkon pro celkový ohřev - kontrolní |
| \dot{Q}_{1L} [W] | Tepelný výkon pro lokální ohřev, dolní hranice |
| \dot{Q}_{2L} [W] | Tepelný výkon pro lokální ohřev, horní hranice |
| \dot{Q}_{1Lk} [W] | Tepelný výkon pro lokální ohřev, dolní hranice -kontrolní |
| \dot{Q}_{2Lk} [W] | Tepelný výkon pro lokální ohřev, horní hranice – kontrolní |
| $\dot{Q}_{c/ex}$ [W] | Tepelný tok pro celkový ohřev – dle empirické rovnice |

| | |
|--|---|
| $\dot{Q}_{1L/ex}$ [W] | Tepelný výkon pro lokální ohřev, dolní hranice – dle experimentální rovnice |
| $\dot{Q}_{2L/ex}$ [W] | Tepelný výkon pro lokální ohřev, horní hranice – dle experimentální rovnice |
| $P_{přivedené}$ [W] | Topný výkon přiváděný do lopatky |
| $P_{odvedené}$ [W] | Topný výkon odváděný z lopatky |
| $P_{akumulované}$ [W] | Topný výkon akumulovaný v lopatce |
| $P_{odvedené}^s$ [W] | Výkon odvedený při suchém měření |
| $P_{odvedené}^v$ [W] | Výkon odvedený při vlhkém měření |
| u $\left[\frac{m}{s}\right]$ | Obvodová rychlost |
| c_1 $\left[\frac{m}{s}\right]$ | Výstupní rychlost z rozváděcích lopatek |
| v_1 $\left[\frac{m}{s}\right]$ | Rychlost před dýzovými bloky |
| v_2 $\left[\frac{m}{s}\right]$ | Rychlost za dýzovými bloky |
| v_{vz} $\left[\frac{m}{s}\right]$ | Rychlost proudícího vzduchu |
| \dot{m} $\left[\frac{kg}{s}\right]$ | Hmotnostní průtok |
| γ_v $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ | Měrná váha vody za teploty ve stupni |
| σ $\left[\frac{kg}{m}\right]$ | Povrchové napětí kapek |
| γ_p $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ | Měrná váha vody za tlaku ve stupni |
| β_1 [-] | Vstupní úhel profilu |
| p_0 [Pa] | Stagnační tlak |
| p_1 [Pa] | Tlak vzduchu před dýzovými bloky |
| p_2 [Pa] | Tlak vzduchu za dýzovými bloky |
| κ [-] | Poissonova konstanta |
| U [V] | Napětí |
| I [A] | Proud |
| $m_{kap/odpa}$ [g] | Hmotnost odpařených kapek |
| $m_{kap/ohř}$ [g] | Hmotnost ohřátých kapek |
| m_{lop} [kg] | Hmotnost lopatky |
| $T_{st/lop}$ [°C] | Teplota stěny lopatky |
| T_{pr} [°C] | Teplota nerušeného proudu |
| $T_{stěny 1}$ [°C] | Teplota stěny - vyšší |
| $T_{stěny 2}$ [°C] | Teplota stěny - nižší |
| $T_{1;2průměr}$ [°C] | Průměrná teplota stěny lopatky naměřená termočlánky |
| T [°C] | Modelovaná teplota lopatky |
| T_1 [°C] | Počáteční teplota přechodového děje |
| T_{pokoj} [°C] | Pokojeová teplota |

| | |
|--|---|
| T_0 [°K] | Stagnační teplota |
| $\Delta T_{Lopatky}$ [°C] | Změna teploty lopatky |
| ΔT [°C] | Teplotní rozdíl mezi lopatkou a nerušeným proudem |
| t [s] | Čas |
| $\tilde{K} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]; \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ | Porovnávací součinitel přestupu |
| $C \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]; \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ | Modelovaný přestupový součinitel |
| I [-] | Násobící součinitel |
| x [-] | Suchost páry |
| KVET | Kombinovaná výroba elektřiny a tepla |

1 Úvod

Jedním ze základních zdrojů elektrické energie v České republice jsou po mnoho let elektrárny využívající parní turbíny. Výhody, nevýhody a možnosti těchto zařízení jsou důkladně prozkoumány. Jedná se tak o osvědčenou a zvládnutou technologii. Nicméně momentální značný rozvoj obnovitelných zdrojů, díky snaze o dosažení uhlíkové neutrality, nutí v posledních letech k provozování těchto zařízení mimo podmínky pro něž jsou navrženy. Chod v těchto nenávrhových režimech vede ke zvýšenému opotřebení lopatek erozním působením dopadajících kapek vody, která je nejrozšířenějším médiem používaným pro pohon. Tímto působením jsou ohroženy zejména poslední turbínové stupně, kde se koncentruje nejvyšší množství vodních kapek. Omezení projevů tohoto fenoménu tak může vést k menšímu úbytku účinnosti a snížení nákladů na výměnu lopatek provozovaných právě v těchto režimech, na rozdíl od provozu v návrhovém režimu, kdy je tento jev méně znatelný.

Tato práce je v teoretické části zaměřena na vysvětlení způsobu vzniku eroze turbínových lopatek. Pro lepší pochopení kontextu je také vysvětlena relevantní část problematiky parních turbín, konstrukce jejich vybraných součástí, teoretický oběh s parní turbínou a pozice parních elektráren v rámci české energetiky. Dále jsou probrány možnosti snižování vlhkosti v parní turbíně, která erozi ovlivňuje. Ty jsou různého charakteru a mohou být přímo součástí turbíny, plynout z její konstrukce, případně se může jednat o samostatná zařízení.

Praktická část se věnuje testování možnosti využití vyhřívané rozváděcí lopatky. V rámci této části byly navrženy dvě lopatky s různými typy topného systému, společně se způsobem jejich implementace do stávající tratě pro výzkum vodních disperzí. Tato část se také věnuje vyhodnocení a analýze výsledků měření. V jejichž rámci jsou hodnoceny součinitelé reprezentující přestup tepla mezi lopatkou a proudem vzduchu a na lopatku dopadlé množství vodních kapek.

2 Problematika eroze lopatek parních turbín

Působení eroze na lopatky je ovlivňováno poměrně širokou škálou jevů působících v konstrukčně náročném zařízení, které je součástí většího celku. Pro lepší pochopení kontextu tohoto jevu, je v této kapitole, kromě samotné rešerše poznání o erozi a možnostech snižování jejího negativního vlivu, umístěna i část věnující se zařazení parních turbín do širších souvislostí v rámci energetiky, jejich pozice v rámci elektrárny a vybraných součástí turbíny.

2.1 Úloha parní elektrárny v rámci české energetiky

Cílem parních elektráren je výroba elektrické a tepelné energie z energie vázané v palivech. Ta jsou svým charakterem velmi různorodá. Můžeme je dělit např. podle skupenství, způsobu uvolňování energie nebo původu. Jako elektrárnská paliva v ČR využíváme např. uhlí, zemní plyn, biomasu nebo též odpady. Případně se za účelem získání požadovaného vstupního tepla používají paliva jaderná. [1]

Parní elektrárny se v minulosti značně prosadily díky kombinaci dostupnosti hnědého uhlí v oblasti Podkrušnohoří, černého uhlí v Ostravsko-karvinské pánvi a tlaku na stavbu elektrárnských kapacit pro hospodářství. [2][3] To do takové míry, že dodnes tvoří stěžejní součást české energetiky s nemalým množstvím výroby elektrické energie. Pro představu, v roce 2022 vyrobily přes 31 TWh elektrické energie (zhruba 37 % celkové výroby), respektive 72 TWh při započtení jaderných elektráren. [1]

Při vhodném návrhu (teplárnském zapojení) navíc lze dosáhnout také značné hospodárnosti kombinací výroby elektřiny s výrobou tepla, kdy se energie páry použité k výrobě elektrické energie dále využívá pro např. vytápění nebo technologické procesy. Což je výhodné, jelikož samostatná výroba elektrické energie dosahuje nižší účinnosti – elektrárny skupiny ČEZ dosahují účinnosti 34 až cca 40%. [3][4]

Další významnou úlohu zastávají v účinných paroplynových cyklech, kde se teplo horkých spalín z plynové turbíny používá dále v parní části cyklu. Takový cyklus dosahuje vyšších hodnot účinnosti než oddělená výroba a při kombinaci s KVET nejvyšší hospodárnosti. [4][5]

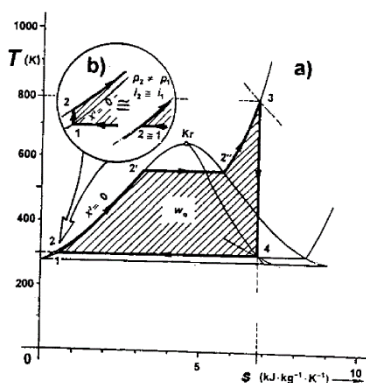
2.2 Oběh parní elektrárny

Teoretickým základem parní elektrárny je její oběh, tento oběh je nazýván Rankin – Clausiův (zkráceně R-C) Jedná se o uzavřený systém na sebe navazujících změn stavů média, které umožňují přeměnu vstupní energie paliva na výstupní formu - mechanickou práci, respektive elektrickou energii. V praxi se setkáváme zejména s médiem ve formě vody a vodní páry a s jinými médii pouze ve zdůvodněných případech např. při požadavku na využití zdroje tepla o nízké teplotě. [6][7]

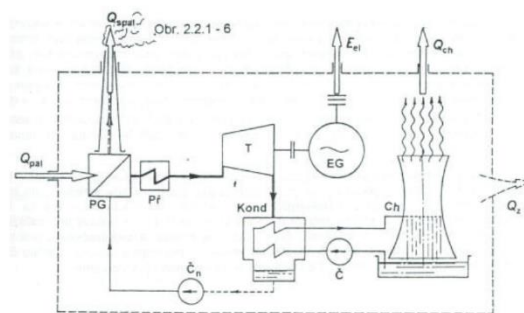
Základní součásti tvořící R-C oběh (Obrázek 1) , včetně idealizovaného děje jsou:

- kotel, pro ohřev vody a tvorbu páry - izobarický přívod tepla, složený z dílčího ohřevu syté vody, jejího vypaření a přehřátí vzniklé páry mezi body 2 a 3;
- parní turbína pro převod energie páry na mechanickou práci – adiabatická expanze mezi body 3 a 4;
- kondenzátor, zajišťující kondenzaci expandované páry – izotermická kondenzace mezi body 4 a 1;
- oběhové čerpadlo, zajišťující průtok vody a páry oběhem – adiabatická komprese mezi body 1 a 2. [6]

Tato zařízení tvoří s chladícím okruhem a dalšími neoddělitelnými součástmi (napájecí nádrž, kondenzátní čerpadlo, generátor elektrické energie a další) (Obrázek 2) zmíněný uzavřený okruh, jehož stavy odpovídají rovnovážným stavům dle diagramu T-s vody a vodní páry (Obrázek 1). [6][8]



Obrázek 1 - T-s diagram stavových změn v R-C oběhu [9]



Obrázek 2 - Okruh R-C oběhu s chladícím okruhem [10]

2.3 Parní turbína

Turbína je lopatkový stroj, sloužící k přeměně energie jí protékajícího média na mechanickou práci. Ta mohou být obecně různá (vodní pára, horké spaliny, organické látky). [11] Nicméně vzhledem k zaměření práce se budeme dále věnovat pouze turbínám, jež využívají vodní páru, tedy parním turbínám.

Přeměna energie média na mechanickou práci se děje pomocí soustavy rozváděcích a oběžných kol, tzv. stupňů. V této soustavě pára expanduje ze vstupního tlaku na nižší výstupní tlak a předává prostřednictvím lopatek kol svou energii otáčejícímu se hřídeli. Stupně můžeme mít rovnotlaké a přetlakové v závislosti na tom, zda při průchodu oběžným kolem snižuje (u stupně přetlakového) nebo nesnižuje (u stupně rovnotlakého) médium dále svůj tlak. Celá turbína může být následně kondenzační nebo protitlaká, případně u větších turbín s odběrem. [11]

Kondenzační turbína umožňuje maximální přeměnu energie páry na mechanickou práci. Ta kondenzuje na velmi nízký tlak jednotek až desítek kPa, který je dán teplotou chlazení. Protitlaká turbína se uplatňuje ve zmíněných systémech kombinovaných dodávek elektřiny a tepla. Ostrá pára v ní expanduje na úroveň tlaku požadovanou následným spotřebičem – technologií nebo systémem vytápění. [11]

2.3.1 Součásti parní turbíny

Parní turbína je samostatný celek tvořený mnoha součástmi, jež mají za úkol zajistit požadovaný přenos energie páry, při zajištění požadované účinnosti po chtěnou provozní dobu. Pro lepší pochopení celého celku rozebereme nejpodstatnější části v následujících kapitolách:

2.3.1.1 Lopatkování

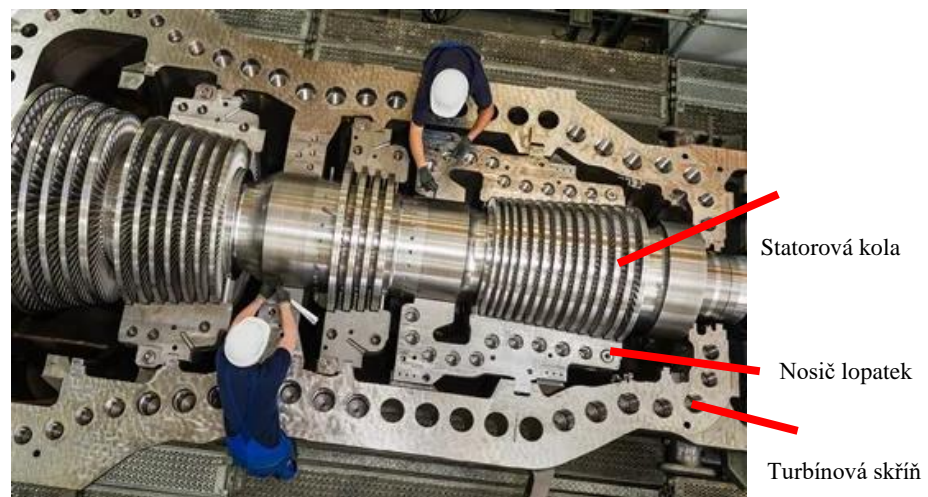
Jak bylo nastíněno, pro přenos energie v parní turbíně se užívají soustavy statorových a oběžných kol. Pro plnění této funkce jsou tato kola opatřena lopatkováním.

Lopatkování rozváděcího kola tvoří soustavu kanálů, kde vlivem tvarování lopatek dochází ke změně jejich průřezu – dýz. Průtok touto soustavou má za následek zvýšení rychlosti proudu média. V závislosti na tomto zvýšení se pak používají buď dýzy se stále se zužujícím kanálem (pro rychlosti nižší než rychlost zvuku) nebo dýzy s rozšiřujícím se kanálem. Usazení lopatek je buď do tzv. mezistěny (u rovnotlakého stupně) nebo nosiče lopatek (u přetlakového stupně) s dělicí rovinou shodnou s dělicí

rovinou skříně (Obrázek 3 a 4). Užití takových typů usazení má výhodu v jednodušší výrobě a celkové konstrukci skříně. [6][12]



Obrázek 3 - Ukázka usazení lopatek v mezistěných [13](UPRAVENO)



Obrázek 4 - Ukázka usazení lopatek do nosiče lopatek [14] (UPRAVENO)

Lopatkování oběžného kola tvoří bezprostředně následující soustavu průtočných kanálů za rozváděcím kolem. Tyto lopatky odebírají protékající páře energii a přenášejí ji na rotující hřídel, s nímž jsou spojeny zámky různých konstrukcí v patě lopatky. Pokud oběžné kolo zpracovává kromě kinetické energie i energii tlakovou, hovoříme o přetlakovém stupni, pokud lopatky zpracovávají pouze kinetickou energii páry získanou v rozváděcím kole, jedná se o stupeň rovnotlaký. [6][12][15]

Výhodou rovnotlakého stupně je možnost zpracování vyššího entalpického spádu, což snižuje celkově potřebný počet stupňů. Jako nevýhodu lze uvést oproti přetlakovému stupni nižší účinnost. [6][12][15]

Naopak výhoda přetlakového stupně spočívá ve vyšší účinnosti, která je kompenzována vyšším počtem stupňů. Jedná se tak o optimalizační úlohu. Nevýhodou takového stupně je také vyšší axiální síla působící na uložení. [6][12][15]

2.3.1.2 Skříň

Turbínová skříň tvoří základní nosnou část (v podstatě nádobu) celé turbíny a slouží k uložení všech ostatních součástí, jako jsou regulační ventily, mezistěny, vstupní dýzy, ucpávky a další. Z pevnostního pohledu se jedná o velmi složitou součást, namáhanou jak značným vnitřním přetlakem páry, tak zejména u kondenzačních turbín vnějším přetlakem okolní atmosféry. To vše za podmínek značného tepelného pnutí a podmínky dodržení těsnosti. Je tak vhodné, turbínové skříň konstruovat co nejjednodušší a maximálně souměrné, zásadně pak s horizontální dělicí rovinou z důvodu jednodušší výroby a montáže. [6][12]

2.3.1.3 Uložení

Uložení hřídele turbíny vůči skříni se provádí, nejedná-li se o turbíny velmi malých výkonů, výhradně pomocí kluzných ložisek ve směru radiálním i axiálním. Využití kluzného ložiska plyne zejména z požadavku na snášlivost ke značným pracovním tlakům a vysokým obvodovým rychlostem. Taková ložiska zároveň zaručují turbíně klidnější chod, včetně dostatečného mazání a chlazení. [6][12]

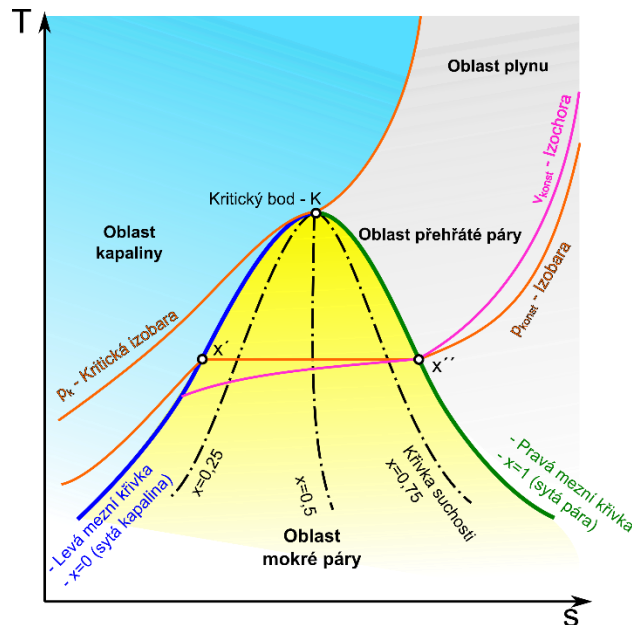
2.3.1.4 Ucpávky

V systému parní turbíny se k utěsnění jednotlivých částí a zamezení únikům z vnitřku skříňe do vnějšího prostředí (a obráceně v částech o nízkém tlaku) využívá tzv. labyrintových ucpávek, výjimku tvoří pouze utěsnění dělicí roviny skříňe, která se těsní pomocí těsnicí pasty a přitažením spojovacích šroubů. Nejzákladnější provedení labyrintových ucpávek spočívá ve vytvoření soustavy komůrek a tenkých břitů mezi utěšňovanými částmi. Přičemž mezi koncem břitu a nejbližší plochou zůstává velmi malá vůle. Při průchodu páry touto vůlí je pára značně urychlena a v komůrce, kam následně vstupuje, intenzivně víří. Kaskáda několika takových komůrek a břitů klade páře značný odpor a velmi omezuje únik páry. [6][12]

2.4 Vlhká pára, vznik vodního filmu a kapek

Vlhká pára je směs syté páry a kapek vody, jež vzniká při stavech vody, které odpovídají oblasti pod mezní křivkou syté páry (Obrázek 5 – žlutá oblast). Nedílným

důsledkem proudění páry s obsahem vodních kapek turbínou je zvýšení ztrát jevy, jako urychlování vzniklých vodních kapek, vzájemné tření fází nebo třecí ztráty ve vodním filmu. Tyto ztráty snižují účinnost turbíny s množstvím vlhkosti a odpovídají asi 1% snížení účinnosti na 1% zvýšení vlhkosti páry – tzv. Baumannovo kritérium. [9][16]



Obrázek 5 - Diagram T-s vody a vodní páry [17]

Dosažení tohoto proudění je při provozu kondenzační turbíny prakticky nevyhnutelné, jelikož se expanze dříve, či později dostává do oblasti vlhké páry. Samotný vznik vodních kapek je oproti momentu překročení tlaku syté páry opožděný, protože expanze páry je velice rychlá a nestíhají se plně uplatnit termodynamické děje. Stíhá se tak projevit pouze tzv. heterogenní nukleace na povrchu pevných částic nebo chemických nečistot unášených proudem. Takto dochází k jevu známému jako „podchlazení“, respektive „přesycení páry“ a vzniku nerovnovážného stavu, kdy se pára stále chová, jako kdyby byla přehřátá. Tento nerovnovážený stav trvá při pokračující expanzi až do překročení tzv. Wilsonovy linie, která kopíruje křivku syté páry, avšak nachází se o něco níže. Při jejím překročení již dojde k zahájení homogenní nukleace, vzniku volných molekul vody a rozběhu kondenzace vlhkosti standardní rychlostí. [18][19][20]

Výše popsaným mechanismem vznikají tzv. primární kapky. Ty se následně tříští na lopátkách statorových kol a působením vnitřních sil formují vodní film rozložený po celé délce lopatek až k jejich odtokovým hranám. Na odtokových hranách se vzniklý

vodní film tříští na sekundární kapky, řádově o průměru desítek až stovek μm , které jsou volně unášeny párou dále na oběžné kolo. [16][18][21]

2.5 Eroze lopatek

Jak již bylo naznačeno v předchozí kapitole na oběžné kolo dopadají sekundární kapky různé velikosti, rychlosti a hmotnosti. Dochází tak k neperiodické zátěži lopatky rázy, které mají za následek její poškození. [18] To je následně nejviditelnější u poslední čtvrtiny až třetiny její délky (ve směru od vnitřního k vnějšímu průměru lopatky), kde vzniklé kapky mají nejvyšší kinetickou energii a obecně se zde koncentruje vlivem proudění páry nejvíce vlhkosti. [16] Příkladem výsledků takového zatěžování je Obrázek 6. Přesto mohutnost poškození jako takového nemusí nutně být úměrná vlhkosti páry, eroze se může vyskytovat u lopatek vystavených relativně nízké vlhkosti ($x=0,95$) a zároveň se nemusí vyskytovat u lopatek vystavených vlhkosti vyšší ($x=0,87$). [12] Za lepší ukazatel lze dle [12] považovat kapkami vyvinutý střední měrný tlak. Ten lze určit např. vztahem dle [12], kde se na dopad kapky na povrch lopatky pohlíží jako na úder mezi elastickou plochou a tuhou koulí:

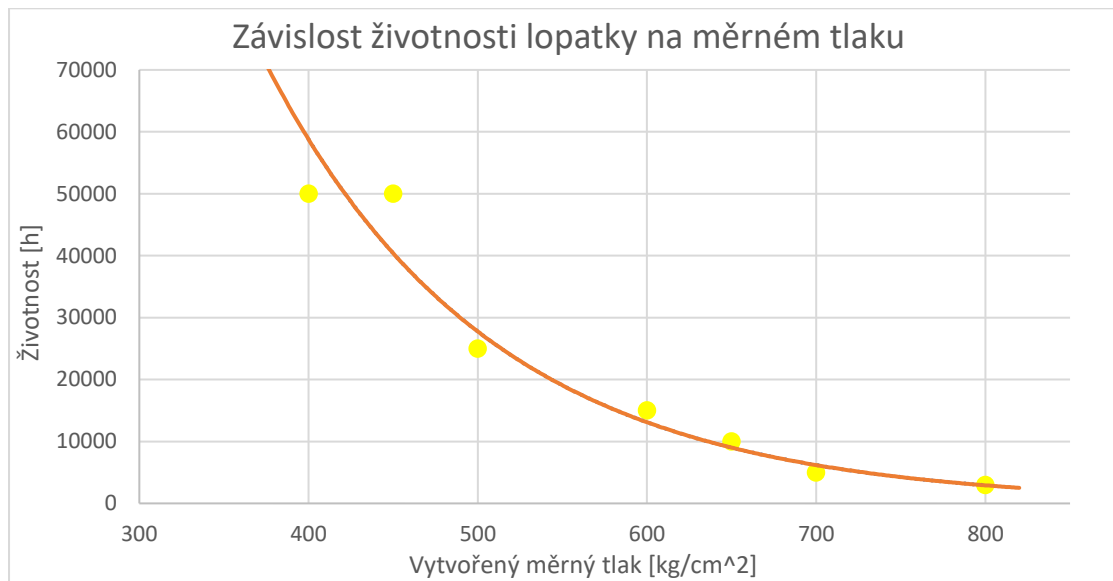
$$p = 6,8 * 10^{-3} * u^2 * \sin^2 \beta_1 * \left(1 - 2,42 * \frac{\mu}{\sigma} * \gamma_p * c_1^2 * \sqrt{\frac{m}{\sigma * \gamma_v}} \right)^2 \quad (1)$$

Experimentálně zjištěná doba životnosti běžných lopatek, bez aplikace opatření vedoucích ke zvýšení erozní odolnosti z chromové nebo niklové oceli v závislosti na měrném tlaku, může vypadat tedy např. takto:

Tabulka 1 - Životnost lopatek dle vyvinutého měrného tlaku [12]

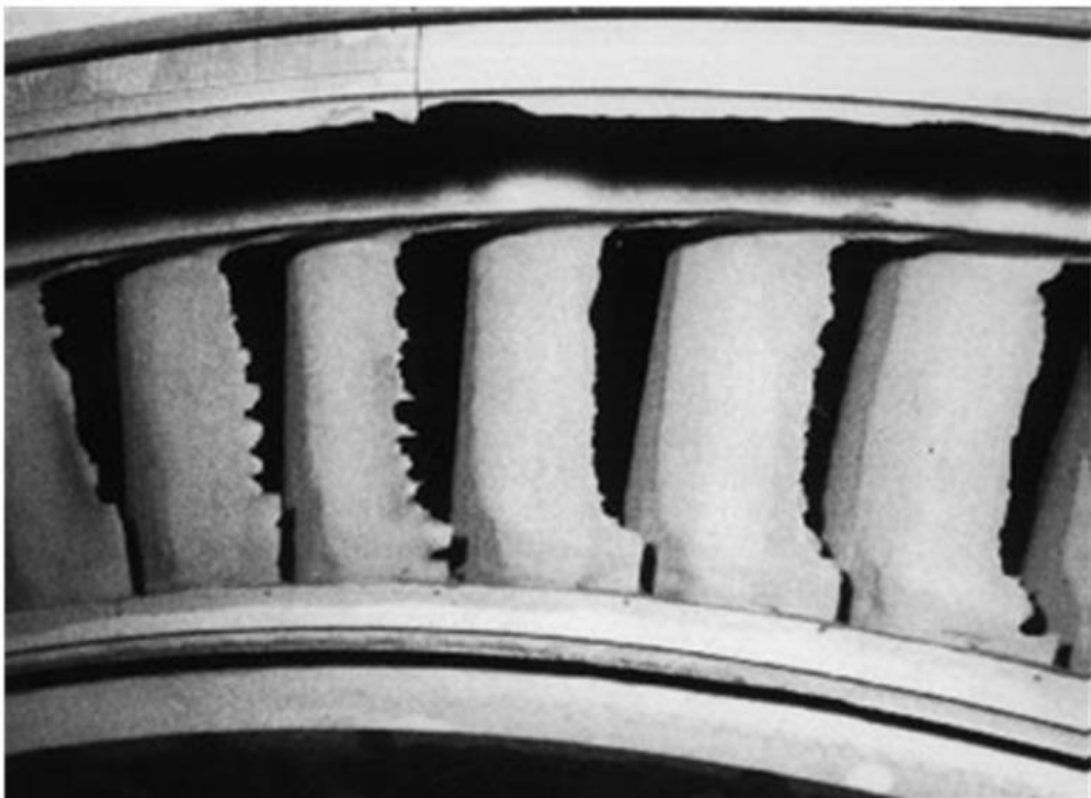
| Vyvinutý měrný tlak [kg/cm^2] | Doba životnosti [h] |
|---|-------------------------|
| Do 250 | Bez pozorovatelné eroze |
| 300 až 350 | Nad 50 000 |
| 400 až 450 | Cca. 50 000 |
| 500 až 600 | 15 000 až 25 000 |
| 650 až 700 | 5 000 až 10 000 |
| Nad 700 | 3 000 |

Pro lepší reprezentaci grafické znázornění vypadá takto:



Graf 1 - Závislost životnosti lopatek na vytvořeném měrném tlaku (data převzata z [12])

Toto zatěžování a poškozování lze redukovat různými prostředky, jenž se dělí na aktivní a pasivní. Zejména pokud jsou oba typy kombinovány lze dosáhnout velmi výrazného snížení poškození lopatek (řádově o desítky procent při samostatném použití, kombinovaně o více než 80%). [16][22]



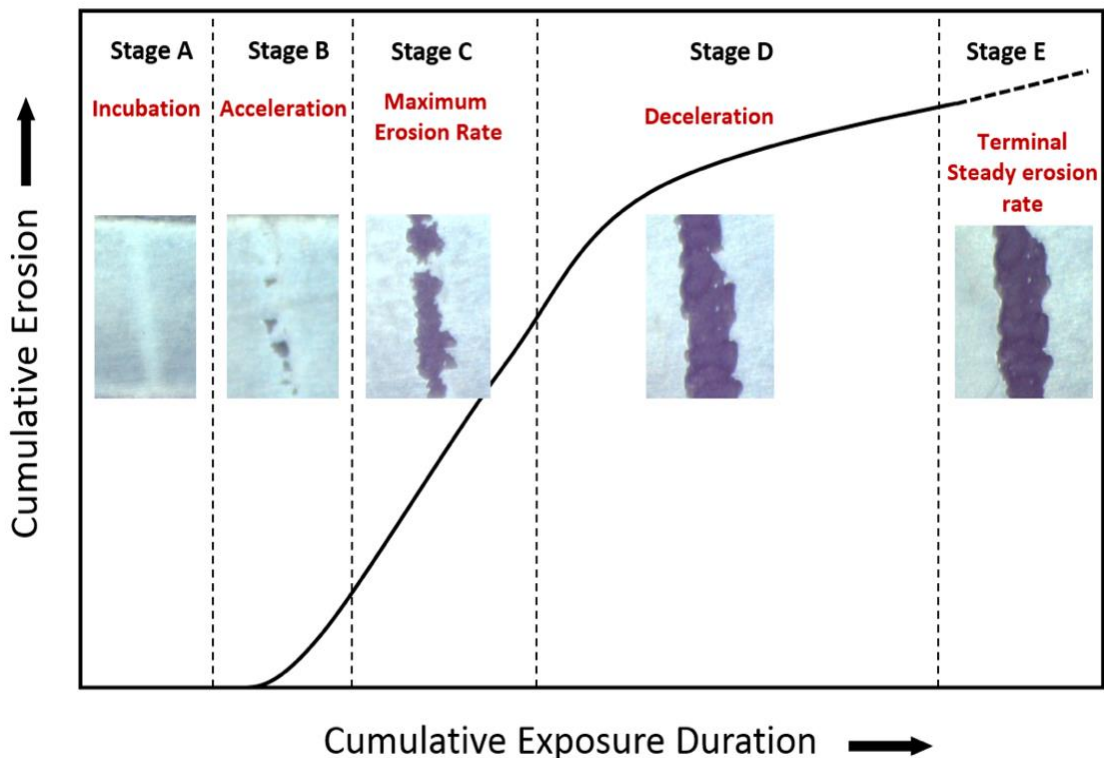
Obrázek 6 - Ukázka erozního poškození lopatek [23]

2.5.1 Průběh erozního poškození

Erozní poškození vzniká v několika fázích. Typicky se skládá z pěti period:

- perioda inkubační - poškození nespočívá v úbytku materiálu ale vzniku plastických deformací a změnám parametrů povrchu (drsnost, struktura, růst mikrotvrlosti atd);
- přechodová perioda - zde dochází k viditelným úbytkům materiálu s rychle rostoucí intenzitou a vzniku důlků v povrchu lopatky;
- ustálený úbytek - přestávají vznikat plastické deformace a tlakové pulsy již iniciují pouze vznik trhlin, jejichž spojováním je vylamován materiál lopatky, důlky se prohlubují;
- druhá přechodová perioda - dochází ke snižování rychlosti růstu poškození, mezi důlky se vytvořilo značné množství ostrých vrcholků a šikmých povrchů, poškození se koncentruje do dna důlků, protože vrcholky a šikmé povrchy jsou vůči erozi odolnější;
- druhá ustálená oblast - na povrchu existuje takový reliéf, kdy už je růst poškození lineární. [18]

Příklad grafické reprezentace jednotlivých period – viz Obrázek 7



Obrázek 7 - Typický průběh křivky erozního poškození [24]

3 Způsoby omezování vzniku vodního filmu

Vodní film, generaci vodních kapek a pozorovatelnou míru eroze lze potlačovat různými způsoby. Jak bylo zmíněno, tato opatření se mohou dělit na aktivní a pasivní. A to podle toho zda se opatření zaměřuje na potlačování vlhkosti nebo na zvyšování odolnosti exponovaných částí. Principiálně se jedná o opatření různého charakteru, jelikož se mohou týkat úprav turbínové skříně, lopatkování, případně oběhu jako celku.

3.1 Přívod horké páry lopatkami

Tento způsob redukce vodního filmu spočívá v přívodu přehřáté nebo syté páry skrze otvory v dutých rozváděcích lopatkách. Aplikace tohoto opatření přináší jednotky procent zvýšení účinnosti. To je zapříčiněno redukcí vznikajícího vodního filmu na povrchu lopatek a snížením průměrné velikosti letících kapek. [25] Míra zlepšení účinnosti závisí mimo jiné na parametrech přívodních štěrbin. [26]

3.2 Odsávací systém/regenerační odběr

Spočívá v kontinuálním odebírání části turbínou protékající páry, mimo její obvyklý výstup, štěrbinami v tělese turbíny, za účelem např. přehřevu napájecí vody, případně může být odběr napojen přímo na kondenzátor. Pokud se odběr nachází v oblasti vlhkého stupně, odchází s odběrovou parou část sekundárních kapek (do 25%). [12][16] Toto spojení odběru, za účelem regeneračního ohřevu napájecí vody vlhkou parou, je dle [15] považováno za zvláště vhodné. Pro maximalizaci odvodu zkondenzované vlhkosti, je vhodné odběry situovat i do nejnižších míst turbínové skříně, kde se zkondenzovaná vlhkost přirozeně hromadí. [12]

3.3 Odsávání skrze lopatky

Tento prostředek redukce vodního filmu spočívá ve využití dutých rozváděcích lopatek na jejichž podtlakové straně se nachází štěrbin, které mohou být umístěny v různé vzdálenosti od odtokové hrany. Tyto štěrbin jsou pro zajištění potřebné tlakové difference mezi vnitřkem skříně a vnitřkem lopatky spojeny buď s odběrem páry o nízkém tlaku nebo kondenzátorem. [16] Podle experimentů s mokrou parou je za nejeftektivnější považován tlakový poměr 0,9-0,92 mezi tlakem ve stupni a uvnitř lopatky. Vyššího množství odvedené vlhkosti lze dosáhnout umístěním štěrbin blíže odtokovým hranám. V závislosti na konkrétních hodnotách Machova čísla je pak

vhodný buď zaoblený tvar vstupní hrany nebo schodovitého tvaru. [27] Nadále některé experimenty naznačují, že limit tohoto prostředku se nachází v oblasti provozu turbíny na velmi nízký výkon. V takových oblastech může dojít k selhání sacího systému na posledních stupních, jelikož už paradoxně nemusí docházet k expanzi protékající páry ale k její kompresi. V takovém případě tok skrze sací otvory v lopatkách mění směr, dochází k jeho otočení a návratu odsávané směsi zpět do prostor turbíny. Provoz v této oblasti tak může být, co se týče erozního působení, nevhodný, pokud nejsou aplikována další opatření. [28]

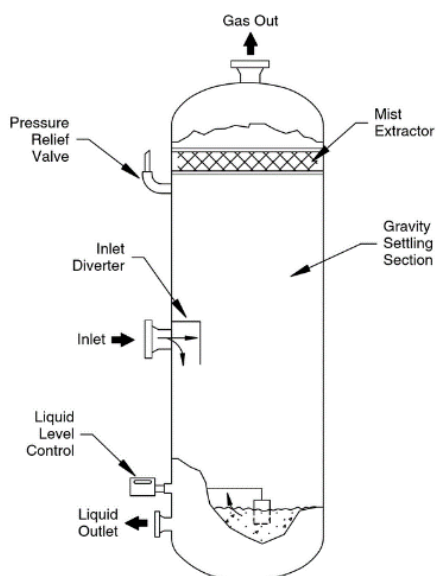
3.4 Ohřívání lopatek

Tento způsob redukce vodního filmu spočívá ve vzniku řízené teplotní difference mezi lopatkami rozváděcího kola a procházející parou. Nejlépe takové, kdy bude dosaženo Leidenfrostova jevu¹ a tvorby vrstvy páry mezi hlavním proudem páry a lopatkou. Při tomto jevu nejsou kapky schopny kvůli vzniklé vrstvě smáčet povrch lopatky. Vodní film tak nemůže vzniknout. Pro efektivní použití tohoto opatření, musí být napřed dosaženo řádného vysušení lopatky. [29]

3.5 Separátory vlhkosti

Separátory vlhkosti se uplatňují zejména u jaderných elektráren, kde vyráběná pára dosahuje poměrně nízkého tlaku a je pouze mírně přehřátá nebo se nachází na mezi sytosti. Při expanzi tak dochází k poměrně rychlému dosažení maximální přípustné vlhkosti. K jejímu odvodu se ve velké míře užívají separátory vlhkosti. To jsou samostatná zařízení různé konstrukce a principu (gravitační, síťové, lamelové, žaluziové a další) sloužící k oddělení zkondenzované vlhkosti od proudu páry. Pro zvýšení účinnosti mohou být kombinovány s přihříváním páry. [8] Ukázkou separátorů můžeme vidět na další straně na Obrázcích 8 a 9.

¹ Leidenfrostův jev je proces, který se uplatňuje při kontaktu kapek kapaliny s výrazně teplejším povrchem. Spočívá v tom, že mezi povrchem a kapkou vzniká kontinuálně vrstva odpařených par kapaliny, díky níž se nemohou mezi povrchem a kapalinou uplatnit adhezní síly. [30]



Obrázek 8 - Vertikální gravitační separátor vlhkosti [31]



Obrázek 9 – Síťový separátor vlhkosti [32]

3.6 Konstrukční vlivy

Tyto způsoby omezování vzniku vodního filmu nejsou přímými technickými řešeními pro omezení působení vodního filmu, ale spíše soustava vlivů vyplývajících z konstrukce, které erozi ovlivňují a je tedy vhodné je mít na paměti při návrhu.

3.6.1 Axiální vzdálenost

Tento konstrukční vliv spočívá ve zvýšení osové mezery mezi statorovým a oběžným kolem stupně. Taková konstrukční úprava má za následek vyšší urychlení kapek, které podporuje jejich tříštění za letu. [12][15][16]

3.6.2 Úprava povrchu lopatek

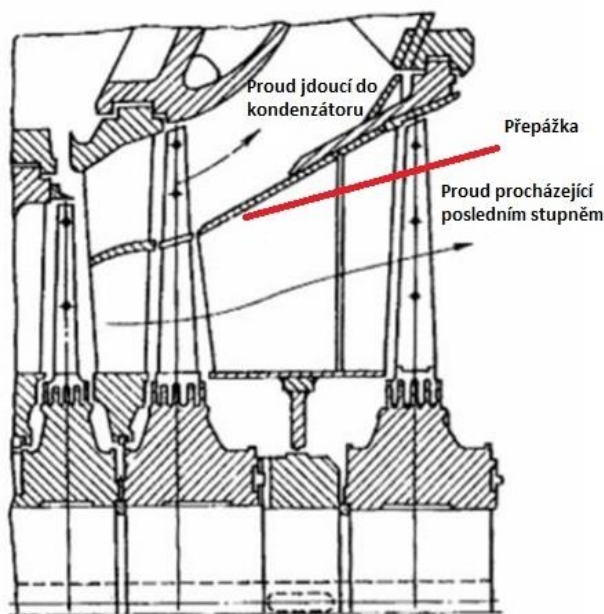
Ve zmíněné očekávané oblasti výskytu eroze lze využít zdrsnění povrchu lopatky případně záměrného radiálního drážkování. Tyto úpravy povrchu mají za následek vznik vodního polštáře, který sám o sobě tlumí nárazy dopadajících kapek. [15]

3.6.3 Snížení obvodové rychlosti

Dalším možným vlivem, který může vést k omezení tvorbě kapek, je snížení obvodové rychlosti oběžných lopatek. Tato úprava snižuje množství vlhkosti odtržené z vodního filmu. [15]

3.6.4 Baumannův stupeň

Toto konstrukční řešení spočívá v rozdělení průtočné části turbíny na vrchní a dolní oddíl v oblasti předposledního a posledního stupně. Horní část se bez využití odvádí do kondenzátoru a spodní patro pokračuje do posledního stupně, viz Obrázek 10. Jelikož se vlhkost koncentruje především do poslední třetiny délky lopatky, dochází k odvodu značného množství vlhkosti pryč. Toto rozdělení původního proudu má za následek zmenšení hmotnostního toku na posledním stupni a také potřebné průtočné plochy včetně délky lopatek. [15]



Obrázek 10 - Baumannův stupeň [15] (UPRAVENO)

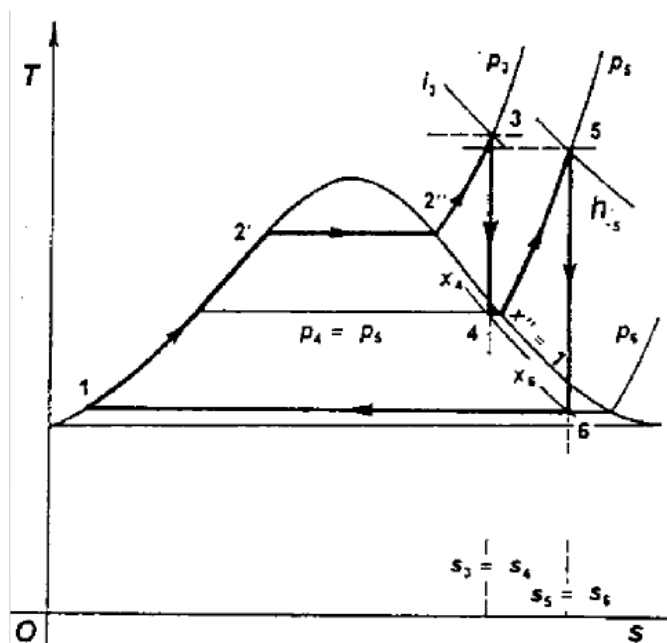
3.6.5 Délka lopatek

Dalším konstrukčním vlivem je délka samotných lopatek oběžného kola. Na jedné straně je žádoucí co nejvyšší délka, jelikož má za následek zvýšení účinnosti stupně. Na straně druhé je přímým důsledkem zvýšení délky lopatek nižší erozní odolnost vlivem vyšší obvodové rychlosti. [21]

3.6.6 Přihřívání a teplota páry

Přihřívání vodní páry spočívá v přerušení expanze páry v turbíně a jejím vyvedení zpět do systému kotle, za účelem zvýšení její teploty za konstantního tlaku. Tímto procesem dojde k posunu expanzní křivky v T-s diagramu do oblasti, kde dojde k pozdějšímu zahájení kondenzace kapek a celkovému snížení výstupní vlhkosti (Obrázek 11). Stejného účinku lze dosáhnout zvýšením teploty páry před vstupem do turbíny. Tento postup však naráží na zejména materiálová omezení. [8][12]

Toto opatření má, kromě snížení eroze posledních stupňů, také za následek zvýšení účinnosti samotného cyklu o jednotky procent. Při požadavcích na další zvýšení účinnosti lze přihřátí opakovat. [8]

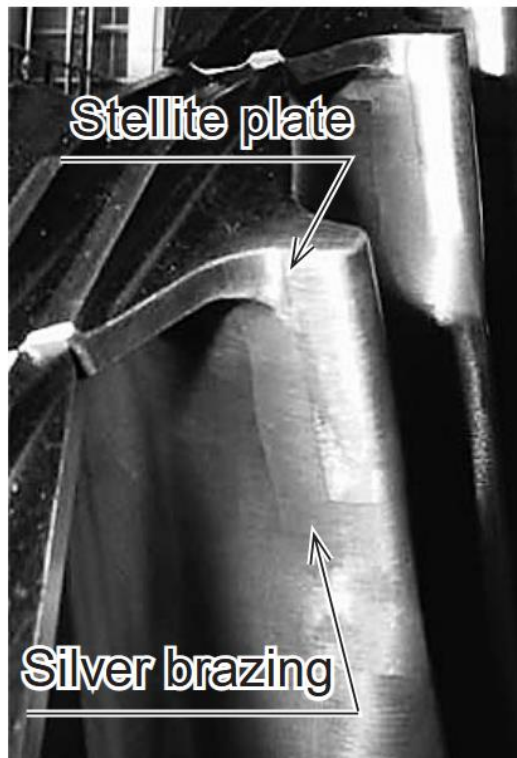


Obrázek 11 - Posuv expanzní čáry při přihřívání páry [9]

3.7 Pasivní způsoby ochrany lopatek

Na rozdíl od předchozích způsobů omezení eroze se tyto opatření nezaměřují na potlačení vodního filmu a kapek jako takových, ale na ochranu před jejich působením. Nejběžněji se jedná o povrchové kalení lopatek v exponované oblasti nebo povrchovou ochranu lopatek pomocí připájení destiček z tvrdých kovů nebo speciální ochranné vrstvy na bázi stelitu². Ukázkou takto upravené lopatky můžeme vidět na Obrázku 12 níže. [16]

² Stelity jsou kategorie slitin kobaltu s chromem, uhlíkem a dalšími prvky. Vynikají odolností vůči kavitaci, korozi, tření a dalším druhům opotřebení. Jsou vhodné pro vysokoteplotní zatížení. [33]

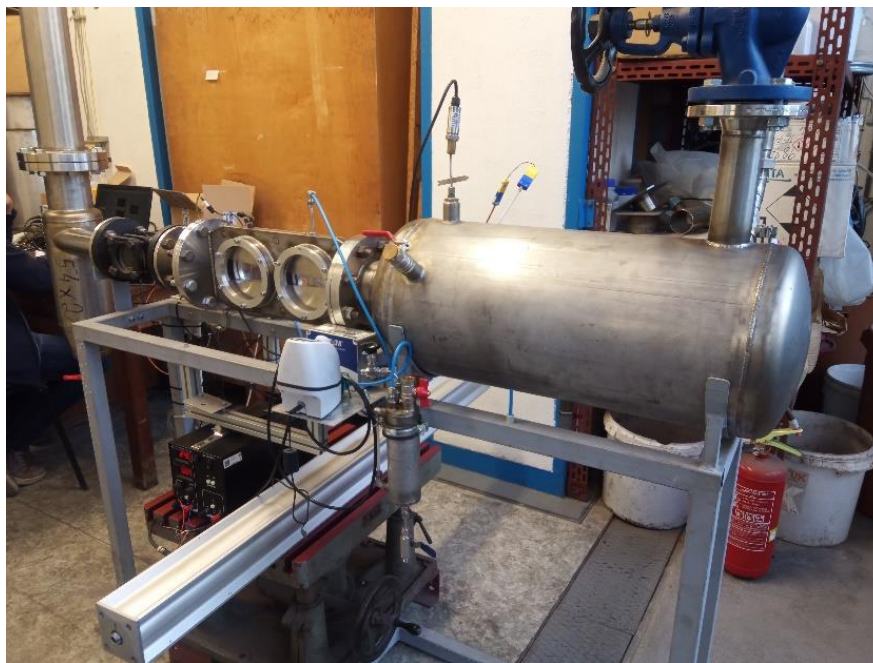


Obrázek 12 - Lopatka se stelitovou vrstvou [34]

4 Návrh experimentu využívající vyhřívaný model lopatky

Experimentální část práce se zabývá konstrukcí vyhřívané lopatky, která bude umístěna do již existující testovací tratě a vyhodnocením naměřených dat. Testovací trať je umístěná v laboratořích ČVUT na Julisce a využívá se ke studiu vodních disperzí. Její momentální vzhled můžeme vidět na Obrázku 13 níže.

K účelu testování byly vybrány dva způsoby ohřevu. Prvním je celkový ohřev lopatky na vybranou teplotu. Druhý spočívá v lokálním ohřevu malé části lopatky na vyšší teplotu, než je uvažována pro celkový ohřev a to nejlépe takové, která odpovídá teplotě jevu výskytu Leidenfrostova jevu mezi lopatkou a dopadající vlhkostí.



Obrázek 13 - Měřicí trať ke studiu vodních disperzí

4.1 Fungování měřicí trati

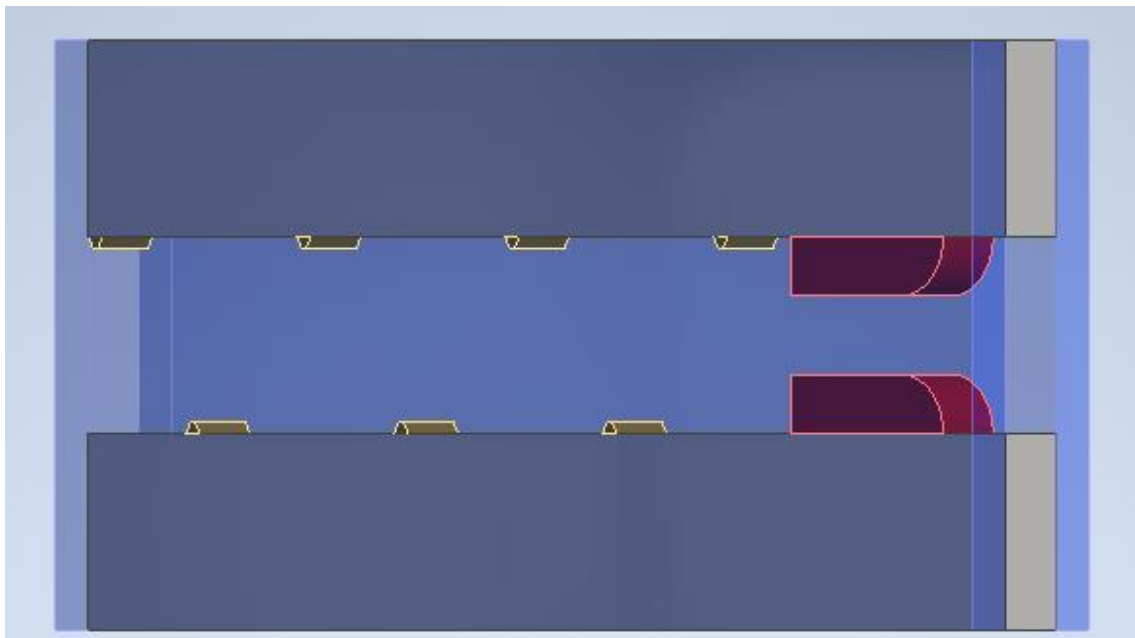
Experimentální trať se skládá ze dvou samostatných paralelně zapojených kompresorů, zásobníku stlačeného vzduchu o objemu $0,5 \text{ m}^3$ o maximálním přetlaku 1 MPa, uklidňovací komory a dýzového měřicího úseku. Za ním následuje výfuk do atmosféry.

Po natlakování vzdušníku je vzduch otevřením uzavíracího ventilu přepouštěn do uklidňovací komory za účelem snížení rychlosti přitékajícího proudu a snížení

turbulencí. Proud následně postupuje do dýzového úseku, v níž je umístěn model lopatky a přívod vody. Z něj proudícím vzduchem strhávané kapky simulují primární vlhkost. V našem případě nicméně nebude vzdušník využit a měření bude probíhat za plynulého přívodu vzduchu z kompresoru.

Měřicí trať může být osazena dvěma různými dýzovými úseky. První můžeme vidět na Obrázku 13 výše. Ten má dvě průhledítka a lopatka se do ní usazuje tak, aby odtoková hrana zaujímal rovnooběžný směr s průhledítky. Přívod vlhkosti je zde řešen přímým rozvodem na plochu lopatky.

Druhý dýzový úsek, který bude s úpravami využit pro měření, je řešen jako kompletně průhledný (pro možnost využití optických měřících metod), kdy průtočný kanál je tvořen polykarbonátovými deskami, jenž tvoří boční stěny a příčkami tvořící středovou část. Pro zlepšení tokových vlastností proudu uvnitř měřicí komory (omezení přimykání proudu ke stěnám kanálu) je středová část vybavena soustavou žeber, které udržují proud v optimální oblasti průtočného průřezu (středu měřicího kanálu). U vstupu do průtočné části se nachází dýzové bloky s přívodem vody. Vizualizaci tohoto kanálu před úpravou můžeme vidět na Obrázku 14 níže. Oba konce průtočného kanálu jsou navíc oproti vizualizaci vybaveny za účelem připojení ke zbytku měřicí trati kruhovými přírubami.

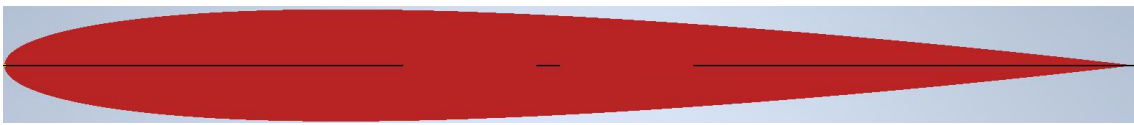


Obrázek 14 - Měřicí kanál před úpravami

Pro navržený experiment je využit tento výše popsaný úsek s několika úpravami, které zahrnují zejména systém usazení lopatek pomocí kruhových desek, stahovací víčka, lopatky a jejich systém vytápění.

4.2 Návrh lopatek

Návrh modelu lopatek se řídil kritérii levné a jednoduché výroby, jednoduchou matematickou popsatelností modelu, jeho prozkoumaností a kritériem dostatečné tloušťky pro vložení topných systémů. Základním profilem lopatky byl zvolen profil NACA0010 délky 5cm. Pro potřeby experimentu byly vytvořeny lopatky používající dva způsoby vyhřívání. Základní tvar profilu viz Obrázek 15.



Obrázek 15 - Základní tvar modelu lopatky

4.2.1 Geometrické charakteristiky lopatkového profilu NACA 0010

Zvolený typ lopatky patří do skupiny standardizovaných profilů, jejichž číselné označení sděluje základní charakteristiky. Rozbor jednotlivých charakteristik je rozebrán níže v posloupnosti čísel zleva doprava:

Tabulka 2 - Rozbor standardizovaného profilu NACA

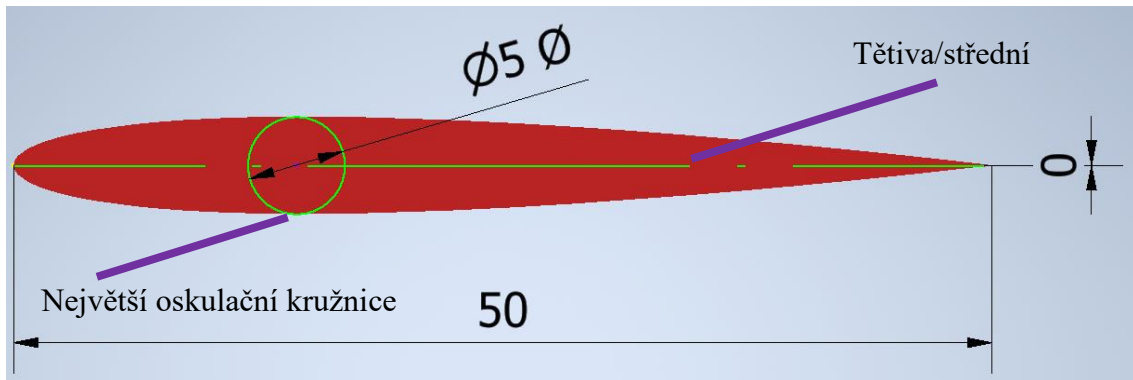
| | |
|----|--|
| 0 | Hodnota maximálního prohnutí střední křivky vůči těživě profilu v % délky těivy [35] |
| 0 | Pozice maximálního vyklenutí v % dělená deseti [35] |
| 10 | Maximální tloušťka profilu v % délky těivy [35] |

Jak lze odvodit ze zvolené délky a rozboru charakteristik výše, má profil následující charakteristiky:

Tabulka 3 – Základní geometrické charakteristiky modelu lopatky

| | |
|-------------------------------------|--|
| Délka těivy | 50 mm |
| Prohnutí střední křivky vůči těživě | 0 mm (oskulační kružnice leží na těživě profilu) |
| Maximální tloušťka | 5 mm (Průměr největší oskulační kružnice) |
| Symetričnost | Symetrický podle těivy a střední čáry |

Další parametry, jako úhel odtokové hrany, poloměr náběžné hrany a jiné, nejsou důležité pro provedení a vyhodnocení experimentu, jsou tudíž vynechány. Na Obrázku 16 lze vidět vizualizaci základního profilu se zanesenými geometrickými charakteristikami dle Tabulky 3.



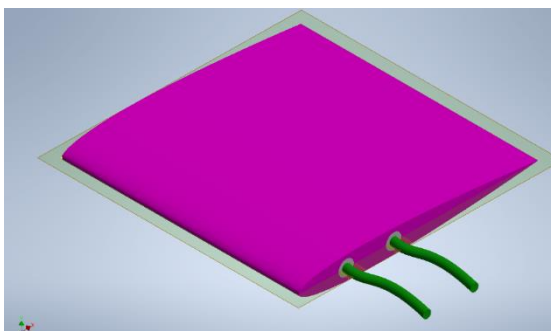
Obrázek 16 - Základní tvar modelu profilu se zanesenými geometrickými charakteristikami

4.3 Navržené způsoby vyhřívání

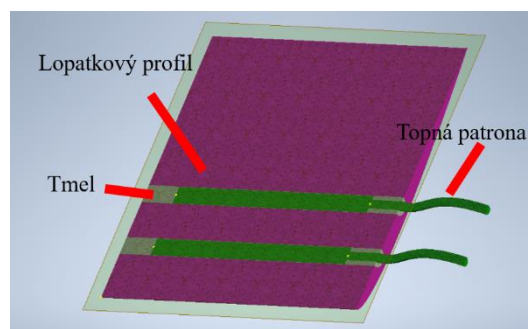
Za účelem provedení experimentu jsou navrženy lopatky výše popsaného profilu se dvěma topnými systémy. Do obou lopatek jsou vytvořeny kromě topného systému také otvory pro vložení termočlánků za účelem sledování dosažené teploty.

4.3.1 Vyhřívání celkové

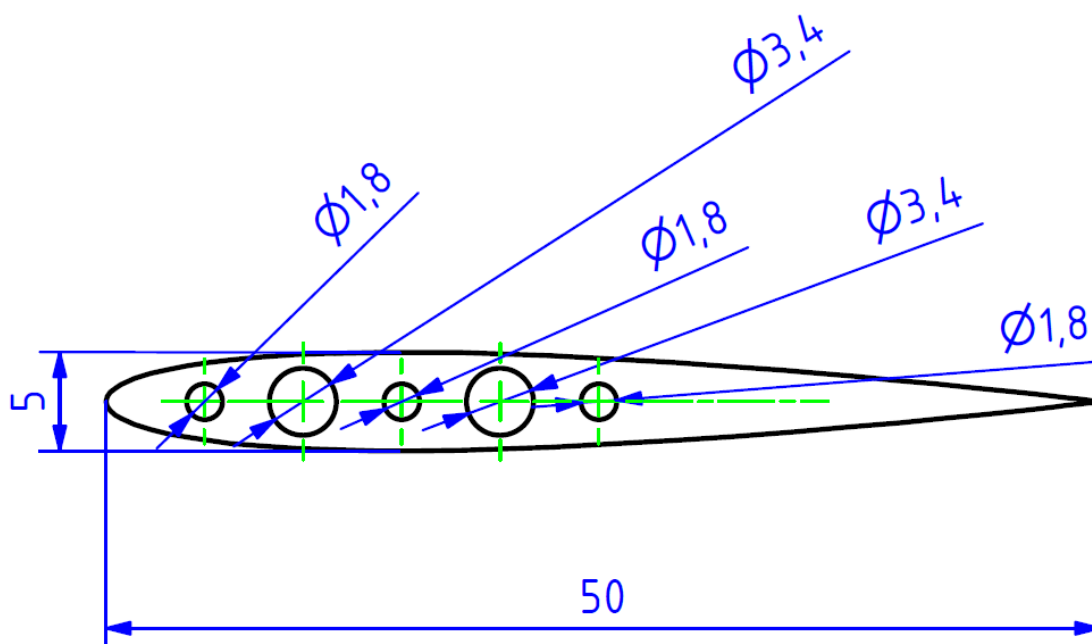
Celkové vyhřívání je zajištěno umístěním dvou topných patron do otvorů vyvrtaných v použité lopatce. Pro zlepšení přestupu tepla je zbývající prostor otvoru včetně spáry vyplněn teplovodivým tmelem. Vizualizaci můžeme vidět na Obrázcích 17 a 18 níže. Teplotu sledujeme termočlánky umístěnými do předvrtaných otvorů (otvory 1,8 mm na Obrázku 19). Opět s výplní spáry ve formě teplovodivého tmelu. Náhled části výrobního výkresu se vstupy pro termočlánky – viz Obrázek 19.



Obrázek 17 - Vizualizace celkového ohřevu - celkový pohled



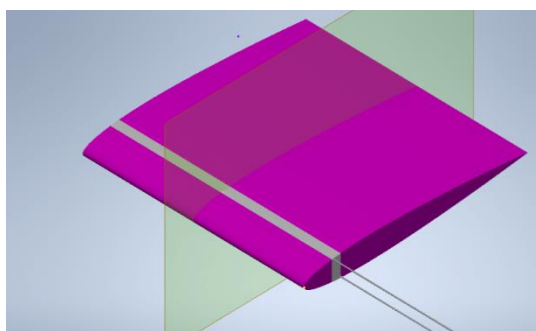
Obrázek 18 - Vizualizace celkového ohřevu - poloviční řez



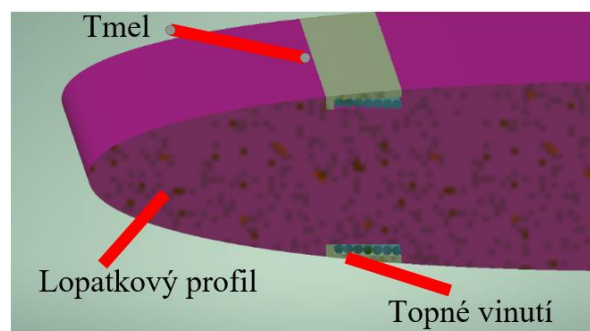
Obrázek 19 - Náhled části výrobního výkresu modelu experimentální lopatky - celkový ohřev

4.3.2 Vyhřívání místní

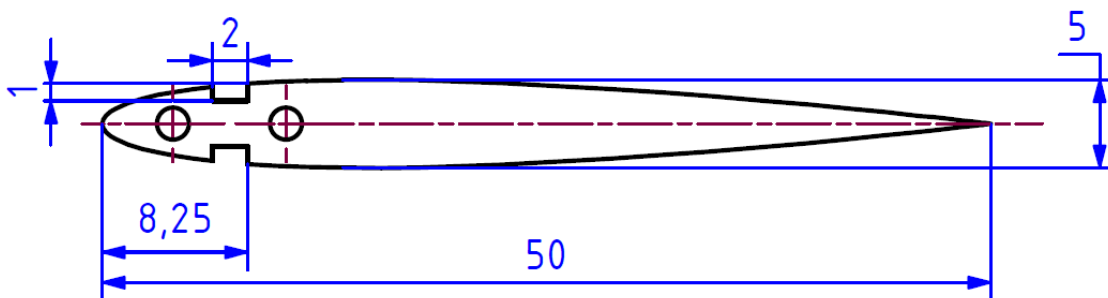
System lokálního ohřevu lopatky spočívá v navinutí odporového drátu do drážky připravené v lopatce. Následně je pro zlepšení přestupu tepla zbývající prostor drážky vyplněn vytvrditelným teplovodivým tmelem a povrch opracován pro zachování profilu použité lopatky. Vizualizace můžeme vidět na Obrázcích 20 a 21 níže. Dosaženou teplotu sledujeme termočlánky umístěnými do předvrtaných otvorů v blízkosti topného vinutí, znovu s využitím teplovodivého tmelu pro zaplnění spáry. Náhled části výrobního výkresu včetně otvorů pro termočlánky – viz Obrázek 22



Obrázek 20 - Vizualizace lokálního ohřevu - celkový pohled



Obrázek 21 - Vizualizace lokálního ohřevu - poloviční řez



Obrázek 22- Náhled výrobního výkresu experimentální lopatky - lokální ohřev

4.4 Výpočty výkonů potřebných k ohřevu lopatek

Výpočet výkonů potřebných k ohřevu lopatek je proveden dvěma způsoby. V prvním případě je obtékání lopatky aproximováno jako obtékání desky, v druhém případě je využita empirická rovnice.

Zmíněná aproximace deskou spočívá v myšleném nahrazení lopatkového profilu obtékaného nucenou konvekcí, deskou o shodné velikosti charakteristického rozměru se zachováním parametrů proudění. V druhém případě je přestup tepla (Nusseltovo číslo) počítán empirickou rovnicí, která je výsledkem studie [36], kde byl experimentálně ověřován přestup tepla mezi obtékanou lopatkou a vzduchem.

Chybu plynoucí ze zmíněné aproximace, respektive empirické rovnice zanedbáváme, jelikož výpočet má pouze přibližný charakter za účelem nákupu součástí pro experiment a základní návrh.

4.4.1 Aproximace deskou

Na obtékání pozorované lopatky je v tomto případě nahlíženo jako na obtékání desky o charakteristickém rozměru, který odpovídá celkové délce tětiny lopatky 50 mm nucenou konvekcí. V úvaze je zanedbána změna přestupu tepla vlivem smáčení povrchu lopatky kapkami vody. Na obtékání nahlížíme jako na obtékání suchým vzduchem.

4.4.1.1 Výpočet tepelného výkonu pro celkový ohřev.

Tato část se věnuje výpočtu výkonu k ohřevu lopatky nad teplotu sytých par vody. Za relevantní teplotu lopatky byla pro tento případ zvolena teplota 120°C. Pro výpočet jsou užity parametry suchého vzduchu při teplotě 40°C dle [37].

Pro výběr vhodné kritériální rovnice pro výpočet Nu proudění určíme Reynoldsovo a Prandtlovo číslo:

$$Re = \frac{\rho_{vz} * v_{vz} * L}{\mu_{vz}} = \frac{1,1119 * 200 * 0,050}{19 * 10^{-6}} = 585\,211 \quad (2)$$

$$Pr = \frac{\mu_{vz} * c_{p/vz}}{\lambda_{vz}} = \frac{19 * 10^{-6} * 1006}{0,027} = 0,71 \quad (3)$$

Spočtené hodnoty Re a Pr se nachází v oblasti platnosti kritériální rovnice pro turbulentní obtékání dle [38] uvedené níže. Splněné podmínky platnosti této rovnice jsou: hodnota Re v rozmezí $5 * 10^5 \div 10^8$ a hodnota Pr v rozmezí $0,6 \div 60$. Použitá kritériální rovnice má tvar:

$$Nu = (0,037 * Re^{0,8} - 870) * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Dosazením pak dostaneme

$$Nu = 580 \quad (5)$$

Na základě spočtené hodnoty Nu jsme již schopni určit součinitel přestupu tepla mezi lopatkou a proudícím vzduchem:

$$\alpha = \frac{Nu * \lambda_{vz}}{L} = \frac{580 * 0,027}{0,050} = 313,2 \frac{W}{m^2 * K} \quad (6)$$

Nyní určíme tepelný výkon:

$$\dot{Q}_{1C} = \alpha * S_{lop} * \Delta T = 313,2 * (2 * 0,050^2 + 2 * 0,050 * 0,005) * 80 \doteq 137,8 W \quad (7)$$

Pro kontrolu uvádíme nadále i výpočet předpokládající laminární profil proudění. To je provedeno vzhledem k nejistotám plynoucím z přijmutých zjednodušujících aproximací. Kritériální rovnice za tohoto předpokladu nabyde dle [38] následující tvar, pro rozsah možných hodnot Re $0 \div 5 * 10^5$, rozmezí platných hodnot Pr $0,6 \div 60$:

$$Nu = 0,664 * Re^{0,5} * Pr^{\frac{1}{3}}$$

(8)

Dosažením hodnot Re a Pr z rovnice (2) a (3) získáme hodnotu Nu:

$$Nu = 453$$

(9)

Hodnotu součinitele přestupu tepla spočteme stejně jako v rovnici (6):

$$\alpha = \frac{Nu * \lambda_{vz}}{L} = \frac{453 * 0,027}{0,050} = 244,5 \frac{W}{m^2 * K}$$

(10)

Tepelný výkon spočteme stejným vztahem jako v rovnici (7):

$$\dot{Q}_{1ck} = \alpha * S_{lop} * \Delta T = 244,5 * (2 * 0,050^2 + 2 * 0,050 * 0,005) * 80 \doteq 107,6 W$$

(11)

4.4.1.2 Využití Leidenfrostova jevu – místní ohřev

Leidenfrostův jev nastává při styku kapaliny s výrazně teplejším povrchem než je její teplota varu při daném tlaku. Projevuje se vznikem vrstvy kapalinových par mezi povrchem a kapalinou, která tak nemůže smáčet daný povrch. Konkrétní teplota povrchu, při které se tento jev objevuje, je závislá na kombinaci povrchu a kapaliny, okolním tlaku, rychlosti kapaliny před dopadem na povrch a dalších faktorech. [39][40][41]

Vzhledem k faktu, že do hodnoty teploty Leidenfrostova jevu se propisuje řada výše zmíněných faktorů, dochází k rozkolu ve zdrojích v konkrétních hodnotách pro danou kombinaci kapaliny a povrchu. Tento rozchod dosahuje rozmezí desítek stupňů. Leidenfrostova teplota povrchu pro kombinaci ocel/voda by se tak měla nacházet v rozmezí 250 – 310°C, výpočet je tedy proveden pro obě krajní hodnoty. [39][42]

4.4.1.3 Výpočet tepelného výkonu pro dosažení Leidenfrostova jevu

Výpočet v této části experimentu se shoduje v rovnicích (2-6), protože mění pouze způsob vyhřívání modelového profilu a předpokládané parametry proudění zůstávají zachovány. Uvádíme zde tedy pouze poslední rovnice výpočtu výkonu pro horní a dolní mez předpokládaných teplot. S tím rozdílem, že požadovaných teplot je nutno dosáhnout pouze v malém pásmu materiálu o výrazně menší ploše, než je zbytek lopatky:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{1L} &= \alpha * S_{lop} * \Delta T = 313,2 * (2 * 0,002 * 0,050 + 2 * 0,002 * 0,00425) * 210 \\ &\doteq 14 \text{ W}\end{aligned}\tag{12}$$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{2L} &= \alpha * S_{lop} * \Delta T = 313,2 * (2 * 0,002 * 0,050 + 2 * 0,002 * 0,00425) * 270 \\ &\doteq 18,3 \text{ W}\end{aligned}\tag{13}$$

Kontrolní výpočet provedeme za stejných předpokladů, které jsou uvedeny u rovnic (8-10), tedy za předpokladu, že nebude dosaženo turbulentního proudění, ale pouze laminárního:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{1Lk} &= \alpha * S_{lop} * \Delta T = 244,5 * (2 * 0,002 * 0,05 + 2 * 0,002 * 0,00425) * 210 \\ &\doteq 11,1 \text{ W}\end{aligned}\tag{14}$$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{2Lk} &= \alpha * S_{lop} * \Delta T = 244,5 * (2 * 0,002 * 0,05 + 2 * 0,002 * 0,00425) * 270 \\ &\doteq 14,3 \text{ W}\end{aligned}\tag{15}$$

4.4.1.4 Omezení výpočetních vztahů

Vzhledem k použití kritériálních rovnic pro výpočet Nusseltova čísla odvozených pro případ paralelního obtékání rovinné desky, je nutné připustit, že sdílení tepla v rámci prováděného experimentu se může do značné míry lišit nebo nemusí vypočteným výkonům vůbec odpovídat.

Zároveň byla při výpočtech výkonu při celkovém ohřevu použita pouze zjednodušená plocha ve formě dvou čtvercových ploch reprezentující horní a dolní plochu lopatky a dvou obdélníkových ploch reprezentující boční plochy lopatky. U výpočtu výkonu pro místní ohřev byla použita též zjednodušená plocha reprezentující obdélníkovou plochu drážky s topným drátem a odpovídající boční plochy.

Výpočet nicméně slouží pouze jako orientační za účelem návrhu experimentu a nákupu součástí. Má tedy pouze charakter řádového určení potřebného výkonu. Z těchto důvodů jsou tyto nepřesnosti zanedbány ve prospěch zjednodušení a urychlení výpočtů.

4.4.2 Výpočet skrze experimentální korelaci dle [36]

Citovaná experimentální studie pokusně ověřovala přenos tepla na profilu NACA za použití vzduchu a došla k nalezení empirické závislosti pro výpočet Nu . Zmíněný empirický vztah má tvar:

$$Nu = 0,0943 * Re^{0,636} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

Rozsah platnosti odpovídá hodnotám Re vyšším než $5 * 10^5$, bez stanoveného horního limitu, tedy v oblasti, která odpovídá turbulentnímu obtékání. Pokud aplikujeme tuto kritériální rovnici na předchozí výpočty získáme:

$$Nu \doteq 391 \quad (17)$$

Hodnotu součinitele přestupu tepla spočteme stejně jako v rovnicích (6) a (10):

$$\alpha = \frac{Nu * \lambda_{vz}}{L} = \frac{391 * 0,027}{0,050} = 211,3 \frac{W}{m^2 * K} \quad (18)$$

Stejně tak určíme výkony pro celkový ohřev a předpokládané teploty pro oblast Leidenfrostova jevu:

$$\dot{Q}_{c/ex} = \alpha * S_{lop} * \Delta T = 211,3 * (2 * 0,050^2 + 2 * 0,050 * 0,005) * 80 \doteq 93 W \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{1L/ex} &= \alpha * S_{lop} * \Delta T \\ &= 211,3 * (2 * 0,002 * 0,05 + 2 * 0,002 * 0,00425) * 210 \doteq 9,6 W \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{2L/ex} &= \alpha * S_{lop} * \Delta T \\ &= 211,3 * (2 * 0,002 * 0,05 + 2 * 0,002 * 0,00425) * 270 \doteq 12,4 W \end{aligned} \quad (21)$$

4.4.2.1 Omezení výpočetního modelu

Omezení tohoto přístupu k výpočtu přestupu tepla spočívá v návaznosti na experimentální data, která jsou provedena na jiném typu profilu lopatky (jmenovitě NACA 63421), než je lopatkový profil užitý pro tento experiment. Přesto nám může užití tohoto přístupu přinést nový obraz do problematiky, jelikož se tento postup více

blíží k podmínkám při experimentu než předchozí aproximace deskou. Zároveň byla i při těchto výpočtech výkonu použita pouze zjednodušená přestupná plocha.

4.4.3 Soupis vypočtených výkonů

Pro zpřehlednění uvádíme výše vypočtené výkony ještě jednou v přehledné tabulce:

Tabulka 4 - Vypočtené výkony pro ohřev

| Výpočetní aproximace | Předpokládané proudění | Typ ohřevu | Výkon [Watt] |
|----------------------|------------------------|------------|------------------|
| Deska | Turbulentní | Celkový | 137,8 |
| | Laminární | Celkový | 107,6 |
| | Turbulentní | Leiden | 14-18,3 |
| | Laminární | Leiden | 11,1-14,3 |
| Experiment. Korelace | Turbulentní | Celkový | 93 |
| | | Leiden | 9,6-12,4 |

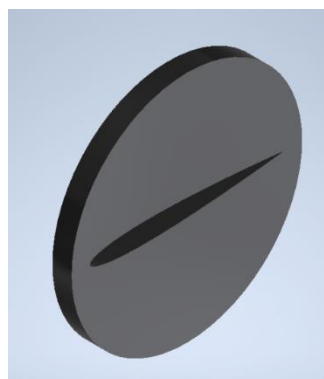
Ze soupisu lze vidět, že výsledné výkony leží velmi blízko sebe, zejména u teplot týkajících se Leidenfrostova jevu. Nejvyšších rozdílů dosahuje celkový ohřev, nicméně vzhledem k charakteru výpočtů se jedná o přijatelný rozsah.

4.5 Návrh usazení lopatek

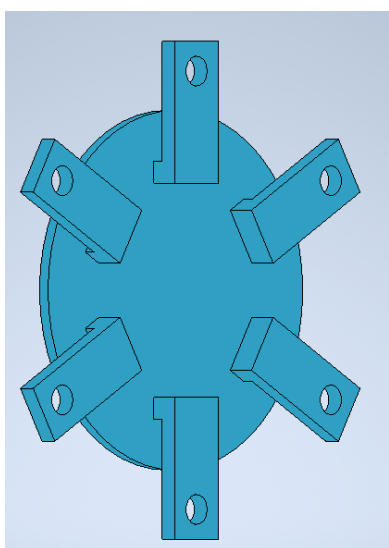
Usazení lopatek v měřicím tunelu je realizováno dvěma průchozími kruhovými deskami s otvorem tvaru profilu (vizualizace viz Obrázky 23 a 24, výkres a model viz Přílohy 1 a 2). Tyto dvě desky jsou následně usazeny do připravených otvorů v již existujících polykarbonátových deskách, opřeny o boky střední kovových příček tvořící průtočný kanál a sevřeny kruhovými víčky přišroubovanými do boční desky pomocí patek po obvodu víček – viz Obrázky 25 a 26 níže. Zbytek tunelu zůstává nezměněn – vizualizace upraveného průtočného kanálu můžeme vidět na Obrázcích 27 a 28 na další straně.



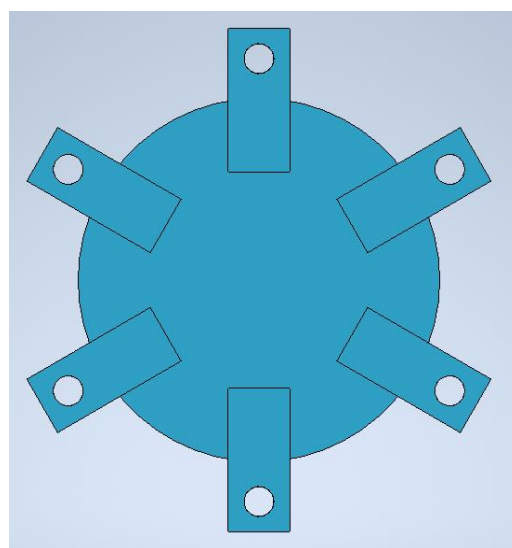
Obrázek 23 - Kruhová deska - pohled A



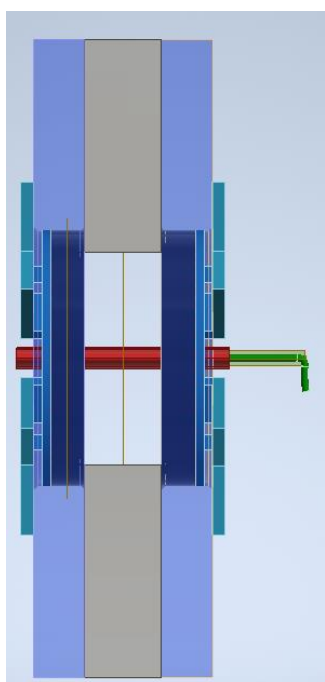
Obrázek 24 - Kruhová deska - pohled B



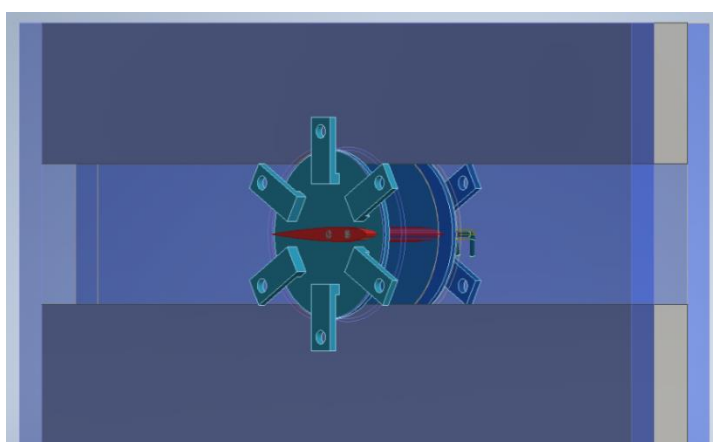
Obrázek 25 - Svírací víčko - pohled A



Obrázek 26 - Svírací víčko - pohled B



Obrázek 27 - Vizualizace upraveného průtočného kanálu - čelní pohled



Obrázek 28 - Vizualizace upraveného průtočného kanálu - boční pohled

4.6 Zapojení experimentu

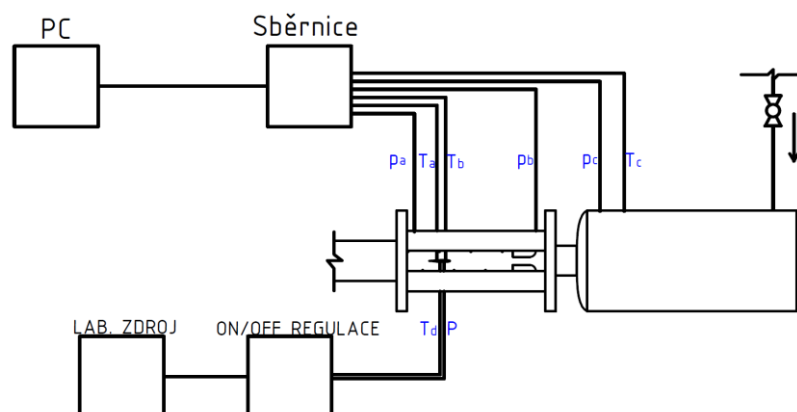
Zapojení experimentu je navrženo následujícím způsobem. Měřicí čidla jsou zapojena do univerzální sběrnice připojené k PC, pro záznam a vyhodnocení dat je využito prostředí LabVIEW. Dále je zaveden systém řízení ohřevu, který se skládá z ON/OFF regulátoru a napájecího zdroje. Regulace je prováděna za účelem dosažení konstantní teploty. Třetím okruhem je samotné dávkování vody automatickým dávkovačem s kontinuálním průtokem.

4.6.1 Užití typů čidel a jejich umístění

Měřidla jsou umístěna na různých místech po celé měřicí trati až k vyústění dýzy. Zde uvádíme seznam včetně umístění a účelu:

- tlaková
 - v uklidňovací komoře – pro měření stagnačního tlaku přitékajícího vzduchu – větev p_c ve vizualizaci;
 - v prostoru dýzy – pro měření statického tlaku před vstupem do dýzy a za lopatkou – větve p_a ; p_b ve vizualizaci;
- teplotní
 - v těle lopatky – pro měření dosažené teploty lopatky a za účelem regulace – větve T_a ; T_b ; T_d ve vizualizaci;
 - v ustalovací komoře – pro měření stagnační teploty vzduchu – větev T_c ve vizualizaci;
- průtoková
 - součást dávkovacího systému vody.

Vizualizaci tohoto zapojení s měřicími větvemi můžeme vidět na Obrázku 29.



Obrázek 29 – Vizualizace zapojení měření trati a regulace

5 Výsledná podoba experimentu

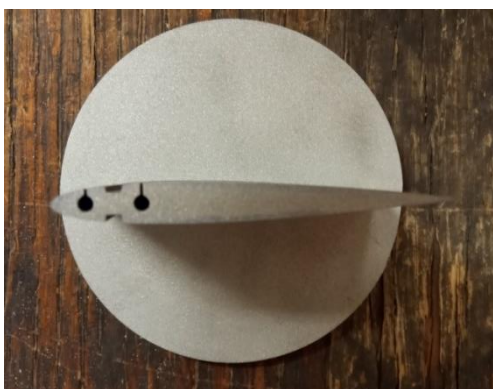
Při provedení experimentu došlo k úpravám různých částí. Zde uvádíme odchýlení od návrhu a zdůvodnění odlišností.

5.1 Výsledná podoba vyrobených součástí

Na obrázcích lze vidět výslednou podobu vytvořených součástí pro experiment. Oproti výkresům a vizualizacím můžeme postřehnout drážky vedoucí do každého otvoru. Tyto drážky jsou technologickými vstupy z výroby lopatek. Zároveň si lze povšimnout, že na obrázcích nejsou zmiňovaná víčka, která měla svírat obě průchozí desky. Tato odlišnost vznikla po realizaci kruhových desek k usazení lopatky a úpravě polykarbonátových bočnic z důvodu zjednodušení výroby a časových možností. Usazení desek v požadované pozici bylo zajištěno pružným rozevíracím kroužkem.



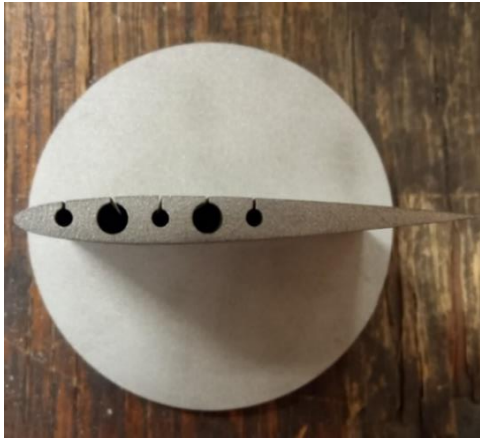
Obrázek 30 - Realizace kruhové desky držící lopatku



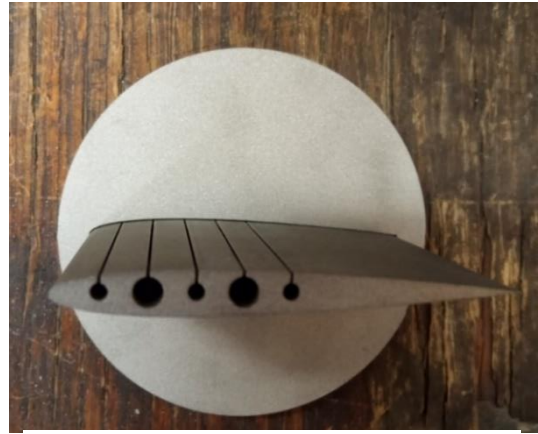
Obrázek 31 - Realizace Lopatky pro místní ohřev – pohled A



Obrázek 32 - Realizace Lopatky pro místní ohřev – pohled B



Obrázek 33 - Realizace lopatky pro celkový ohřev –
pohled A



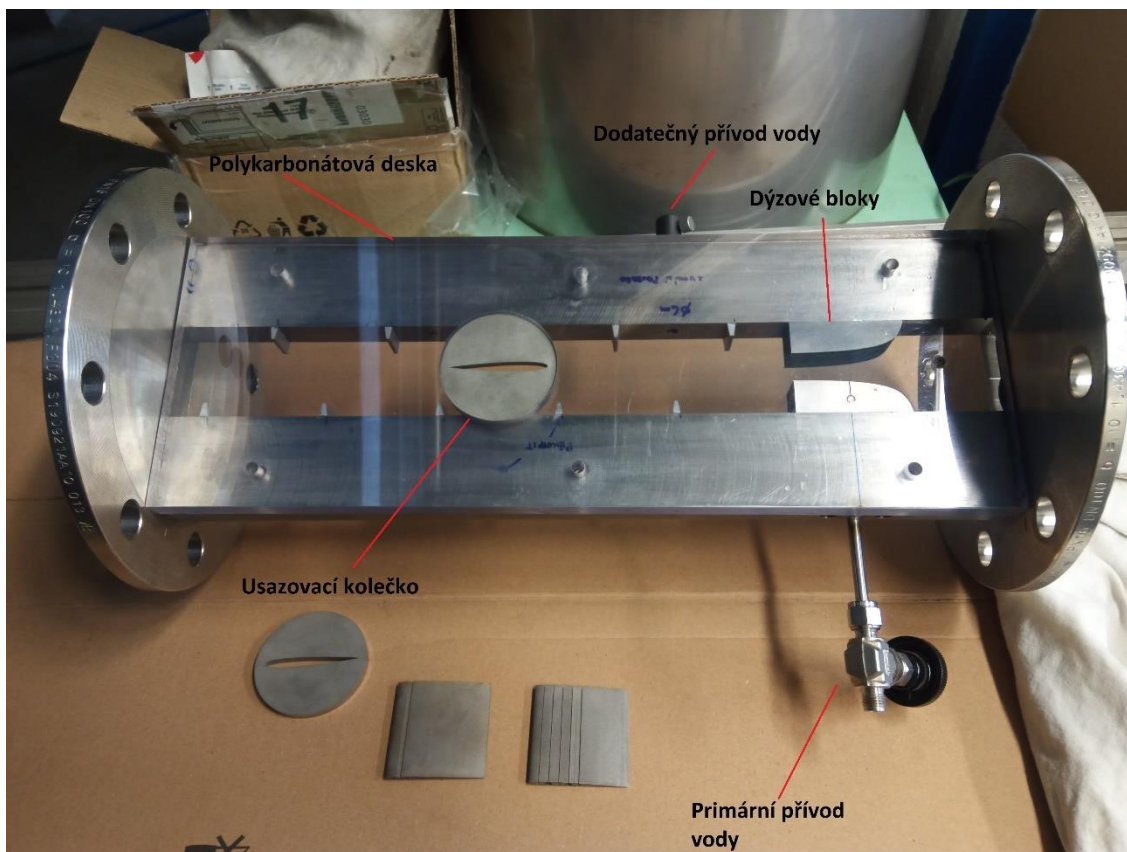
Obrázek 34 - Realizace lopatky pro celkový ohřev –
pohled B



Obrázek 35 – Lícování lopatky v deskách

5.2 Výsledná podoba měřícího tunelu

Na obrázcích níže můžeme vidět realizaci upraveného tunelu. Ten je vybaven upravenými bočnicemi s otvorem pro usazení kruhové desky. Na obrázku chybí svírací víčka, která se z popsaných důvodů nerealizovala. Zároveň lze vidět dýzové bloky. Z důvodu stabilizace proudu před dosažením náběhové hrany jsou kruhové desky umístěny za čtvrté žebro od dýzových bloků ve vzdálenosti 113 mm.



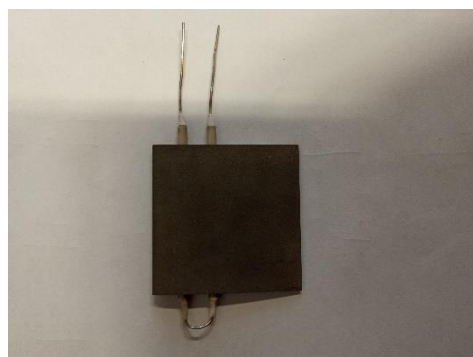
Obrázek 36 - Upravená podoba měřícího tunelu

5.3 Výsledná podoba topných systémů

V rámci systému celkového ohřevu byla přijata jeho úprava pro nedostupnost topných patron. Systém byl tak upraven do podoby, kdy topné patrony byly nahrazeny topným drátem. Rozdíl v průměrech je vykompenzován vložení odporového drátu do keramického pouzdra vhodných rozměrů – viz Obrázky 36 a 37. Lopatky pro místní ohřev jsou vyrobeny ve shodě s návrhem – viz Obrázek 38.



Obrázek 37 - Výsledná podoba systému pro celkový ohřev



Obrázek 38 - Výsledná podoba lopatky pro celkový ohřev s vloženým systémem



*Obrázek 39 - Výsledná podoba lopatky
pro místní ohřev*

5.4 Výsledná podoba systému regulace

Oproti návrhu došlo i ke změně systému regulace. Při realizaci experimentu se ukázalo jako jednodušší pro vyhodnocení, nahradit regulaci na konstantní teplotu lopatky regulací na konstantní topný výkon. Z tohoto důvodu bylo přikročeno ke změně navržené ON/OFF regulace na ruční nastavování konstantního výkonu zdroje.

6 Vyhodnocení a analýza měření

Tato kapitola se věnuje vyhodnocení provedených měření. V rámci těchto měření jsou analyzovány parametry popisující veličiny proudění a přestupů tepla. Dále analyzujeme průběhy hmotnostního průtoku, rychlostí před a za dýzovými bloky, porovnávacího součinitele přestupu tepla. Následně hodnotíme přechodové jevy plynoucí ze skokového zvýšení nebo snížení výkonu elektrického zdroje a vlhkost zachycená na lopatce.

6.1 Provedená měření

V rámci práce byla provedena následující měření za různých podmínek:

- celkový ohřev lopatek
 - s 1 kompresorem, bez přívodu vlhkosti;
 - se 2 kompresory v paralelním zapojení, bez přívodu vlhkosti;
 - se 2 kompresory v paralelním zapojení, s přívodem vlhkosti 5 ml/min;
- ohřev lopatky pro Leidenfrostův jev
 - s 1 kompresorem, bez přívodu vlhkosti;
 - se 2 kompresory v paralelním zapojení, bez přívodu vlhkosti;
 - se 2 kompresory v paralelním zapojení, s přívodem vlhkosti 5 ml/min;
- celkový ohřev s různými náběhovými úhly
 - s 1 kompresorem, bez přívodu vlhkosti, 0° náběhový úhel;
 - se 2 kompresory v paralelním zapojení, bez přívodu vlhkosti, 0° náběhový úhel;
 - s 1 kompresorem, bez přívodu vlhkosti, 5° náběhový úhel;
 - se 2 kompresory v paralelním zapojení, bez přívodu vlhkosti, 5° náběhový úhel;
 - s 1 kompresorem, bez přívodu vlhkosti, 10° náběhový úhel;
 - se 2 kompresory v paralelním zapojení, bez přívodu vlhkosti, 10° náběhový úhel;
 - se 2 kompresory v paralelním zapojení, s přívodem vlhkosti 2 ml/min, 0° náběhový úhel;
 - se 2 kompresory v paralelním zapojení, s přívodem vlhkosti 2 ml/min, 5° náběhový úhel;

- se 2 kompresory v paralelním zapojení, s přívodem vlhkosti 2 ml/min, 10° náběhový úhel;
- se 2 kompresory v paralelním zapojení, s přívodem vlhkosti 5 ml/min, 0° náběhový úhel.

Měření celkového ohřevu jsou provedena v celkem 4 ohřivacích periodách charakterizovaných dodávaným výkonem zdroje a jedné chladicí periodě. Výkon je řízen změnou napětí zdroje, využitá napětí (výkony) jsou 10V (2,8W), 20V (11,4W), 30V (25,8W), 40V (44,4W), 0V (0W).

Měření s místním ohřevem jsou provedena v celkem 4 ohřivacích periodách charakterizovaných dodávaným výkonem zdroje a jedné chladicí periodě, respektive dvou u prvního měření. Výkon je řízen změnou napětí zdroje, využitá napětí (výkony) při prvním měření jsou 10V (6,4W), 20V (24,6W), 30V (54,3W), 25V (38 W), 0V (0W), při druhém a třetím 10V (6,4W), 20V (24,6W), 25V (38 W), 0V (0W).

Měření s různými náběhovými uhly jsou provedena v celkem 4 ohřivacích periodách charakterizovaných dodávaným výkonem zdroje a jedné chladicí periodě. Výkon je řízen změnou napětí zdroje, využitá napětí (výkony) jsou 10V (3,1W), 20V (12,4W), 30V (27,9W), 40V (48,4W), 0V (0W).

6.2 Vyhodnocované veličiny a jejich výpočetní modely

V rámci vyhodnocení dat naměřených při celkovém ohřevu lopatky byly hodnoceny veličiny tlaku, rychlostí před a po průchodu proudu vzduchu tryskou (dýzovými bloky) $v_1; v_2$, hmotnostního průtoku \dot{m} , odvedený tepelný výkon $P_{odvedené}$ a porovnávací součinitel přestupu tepla \tilde{K} . Tento součinitel se svým charakterem blíží standardnímu součiniteli přestupu tepla α způsobem výpočtu a jednotkou. Nicméně z charakteru výpočtu jej tak nelze nazvat, jelikož by pro jeho určení bylo nutno provést hlubší rozbor proudění, vedení tepla a dalších parametrů, které by vyhodnocení této práce značně komplikovaly nebo přímo znemožnily. Kompletní výpočty všech těchto veličin viz Přílohy 3; 4; 5.

6.2.1 Tlak

Tlaky jsou přímo měřeny soustavou čidel a slouží jako vstup pro výpočet dalších veličin. Je prováděn odběr stagnačního tlaku před vstupem do měřícího kanálu, odběr statických tlaků před vstupem do dýzových bloků a za lopatkou. Při experimentech bylo

zjištěno, že tlaková čidla se odchylojí v měřených hodnotách oproti nezávislému staničnímu barometru. Změřené tlaky jsou tudíž zkalibrovány o zjištěnou odchylku.

6.2.2 Teplota

Teploty jsou přímo měřeny soustavou termočlánků. Je prováděn odběr teplot v lopatkách a odběr stagnační teploty v ustalovací komoře. Hodnoty teplot jsou využity pro výpočet dalších veličin.

6.2.3 Hustota

V rámci výpočtu jsou vyhodnoceny celkem tři různé hustoty proudícího vzduchu, a to stagnační hustota ρ_0 , a hustoty před a po průchodu dýzovými bloky ρ_1 a ρ_2 . Ty jsou určeny následujícími vzorci:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{r * T_0} \quad (22)$$

$$\rho_1 = \rho_0 * \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (23)$$

$$\rho_2 = \rho_0 * \left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (24)$$

Veličina ρ_0 plyne ze stavové rovnice pro stagnační stav proudu; veličiny ρ_1 ; ρ_2 plynou z Poissonova zákona ve tvaru:

$$\frac{p}{\rho^\kappa} = \frac{p_0}{\rho_0^\kappa} \quad (25)$$

6.2.4 Rychlost před a za dýzovými bloky, hmotnostní průtok

Rychlost před dýzovými bloky je určena pomocí Saint Vénantovy – Wantzelovy rovnice ve tvaru:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 * \kappa}{\kappa - 1} * r * T_0 * \left[1 - \left\{\frac{p_1}{p_0}\right\}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]} \quad (26)$$

Výstupní rychlost je následně vyhodnocena vyjádřením hmotnostního toku:

$$\dot{m} = v_1 * A_1 * \rho_1 = v_2 * A_2 * \rho_2 \quad (27)$$

$$v_2 = \frac{\dot{m}}{A_2 * \rho_2} \quad (28)$$

6.2.5 Odváděný výkon

Výpočet odváděného výkonu vychází z bilanční rovnice:

$$P_{\text{přivedené}} - P_{\text{odvedené}} = P_{\text{akumulované}} \quad (29)$$

Přivedený výkon lze určit z nastavení laboratorního zdroje pomocí vzorce pro výpočet elektrického výkonu:

$$P_{\text{přivedené}} = U * I \quad (30)$$

Akumulovaný výkon lze určit pomocí teplotní změny mezi měřeními touto rovnicí:

$$P_{\text{akumulované}} = m_{\text{lop}} * c_{p/\text{lop}} * \Delta T_{\text{Lopatky}} \quad (31)$$

6.2.6 Porovnávací součinitel přestupu

Porovnávací součinitel přestupu slouží k porovnání odvedeného tepla mezi jednotlivými měřeními. Je počítán pomocí rovnice:

$$\tilde{K} = \frac{P_{\text{odvedené}}}{S_{\text{lop}} * (T_{\text{st/lop}} - T_{\text{pr}})} \quad (32)$$

6.2.7 Teplota stěny lopatky a proudu

Teploty potřebné k výpočtu porovnávacího součinitele přestupu jsou teplota stěny lopatky $T_{\text{st/lop}}$ a teplota nerušeného proudu T_{pr} . Pro prvotní hodnocení v rámci této práce zjednodušíme kvůli složitosti teplotního pole lopatky výpočet zmíněných teplot. Jako zjednodušení modelujeme tyto teploty pomocí Fourierova zákona pro vedení tepla neomezenou rovinnou stěnou. Rovnice má pro tento případ tvar:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda_{stěny}}{b} * (T_{stěny 1} - T_{stěny 2}) \quad (33)$$

Pro náš případ vedení tepla rovnice přechází do tvaru, kdy $T_{stěny 1}$ nahradíme průměrnou teplotou termočlánků $T_{1;2průměr}$ (z důvodu nerovnoměrnosti teplotního pole) v lopatce a $T_{stěny 2}$ nahradíme za $T_{st/lop}$, dále obecný tepelný tok \dot{Q} zaměníme za dříve vypočtený proudem odvedený výkon $P_{odvedené}$, $\lambda_{stěny}$ nahradíme λ_{lop} , která je materiálovou konstantou lopatky a za b dosadíme $\frac{1}{2}$ tloušťky lopatky. Rovnice vedení tepla tak po zavedení veličin a úpravě přejde na tvar:

$$T_{st/lop} = T_{1;2průměr} - \frac{P_{odvedené} * b}{\lambda_{lop}} \quad (34)$$

Teplotu nerušeného proudu určíme ze stagnační teploty a rychlosti proudu za dýzovými bloky v_2 , s využitím měrné tepelné kapacity vzduchu $c_{p/vz}$ vyvozením ze vzorce:

$$T_0 = T_{pr} + \frac{v_2^2}{2 * c_{p/vz}} \quad (35)$$

Odvozená rovnice má tvar:

$$T_{pr} = T_0 - \frac{v_2^2}{2 * c_{p/vz}} \quad (36)$$

6.2.8 Přejímový jev

V rámci práce je hodnocen přejímový jev při změně dodávaného tepelného výkonu. Přejímový jev matematicky modelujeme jako diferenciální rovnici 1. řádu. Tato rovnice vychází z bilance výkonu:

$$P_{přivedené} - P_{odvedené} = P_{akumulované} \quad (37)$$

Výchozí rovnice je převedena do tvaru:

$$P_{přivedené} - C * (T - T_{pr}) = m_{lop} * c_{p/lop} * \frac{dT}{dt} \quad (38)$$

V této rovnici jakož C předpokládáme přestupový součinitel rozměru $\frac{W}{m^2 \cdot K}$, respektive u místního ohřevu $\frac{W}{m \cdot K}$, jedná se o matematický ekvivalent dříve vyhodnoceného porovnávacího součinitele přestupu \tilde{K} a v rovnici volený parametr, jehož optimální hodnotu se snažíme nalézt.

Pro zjednodušení výpočtu je součin $m_{lop} \cdot c_{p/lop}$ zaveden jako konstanta k_1 , součin $C \cdot T_{pr}$ jako k_2 , a C zaveden jako záporná hodnota k_3 , rovnice tak přejde na tvar:

$$k_1 \cdot \frac{dT}{dt} = k_2 + k_3 \cdot T \quad (39)$$

Po další úpravě a zavedení poměrných konstant $a = \frac{k_3}{k_1}$, $b = \frac{k_2}{k_1}$ získáme rovnici řešitelnou metodou separace proměnných:

$$\frac{dT}{a \cdot T + b} = dt \quad (40)$$

Tuto rovnici integrujeme v mezích (0;t) pro dt a (T_1 ;T), kde T_1 představuje počáteční teplotu přechodového děje při změně výkonu. Integrovaná rovnice má tvar:

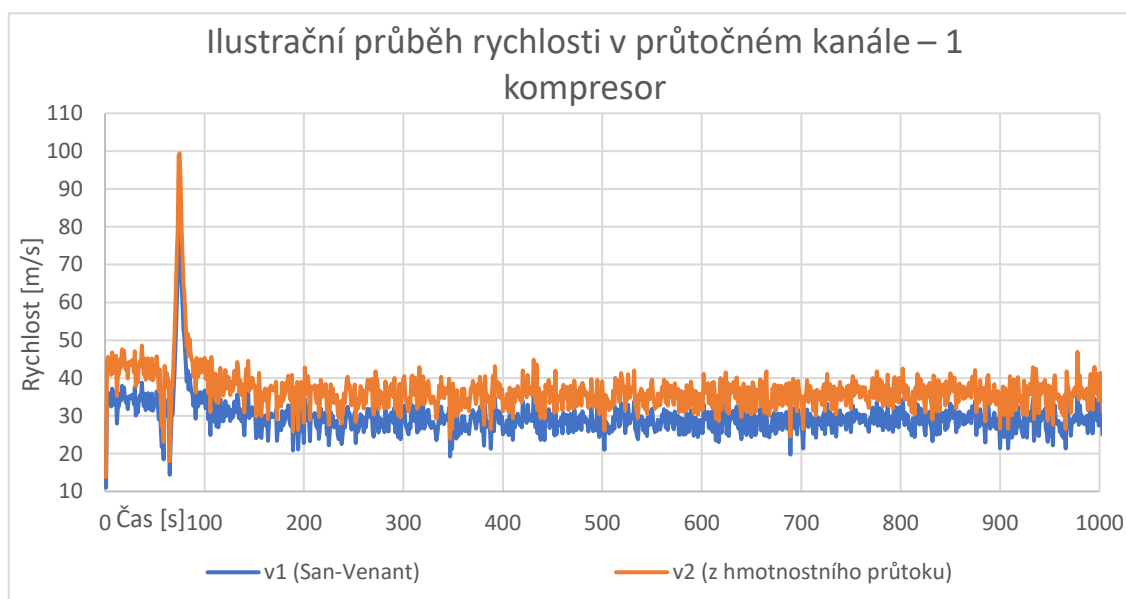
$$\frac{1}{a} \cdot \ln|a \cdot T + b| - \frac{1}{a} \cdot \ln|a \cdot T_1 + b| = t \quad (41)$$

Další úpravou a zavedením $\frac{1}{a} \cdot \ln|a \cdot T_1 + b| = k_4$ získáme finální rovnici přechodového děje ve tvaru:

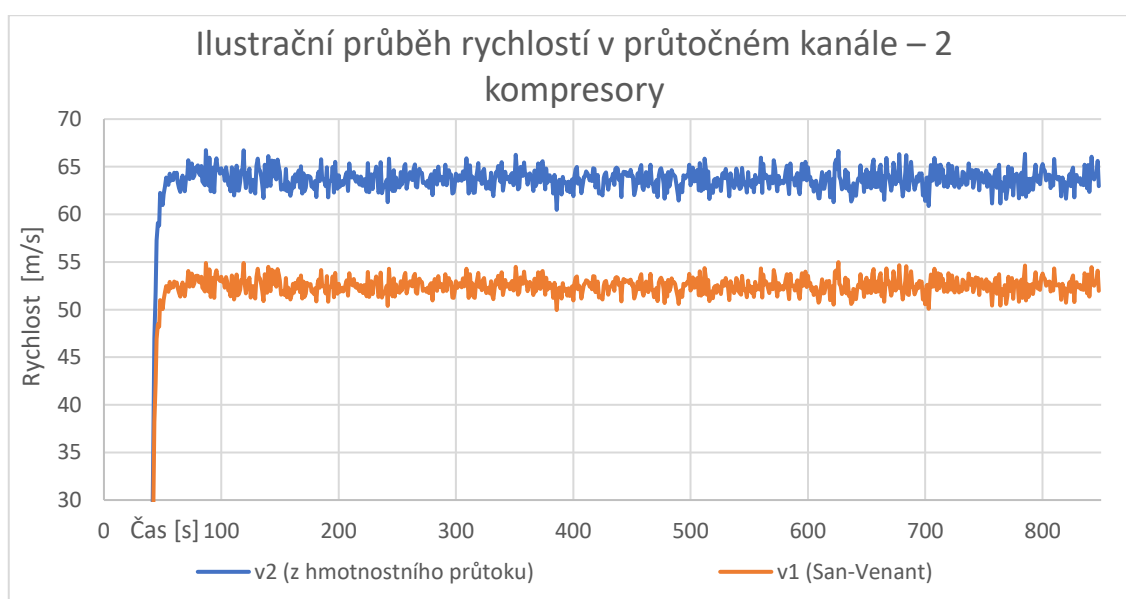
$$T = \frac{-b + e^{(a \cdot t + k_4)}}{a} \quad (42)$$

6.3 Průběhy veličin a dosažené hodnoty porovnávacího součinitele

Tato kapitola se věnuje vyobrazení ilustračních průběhů křivek vytvořených na základě změřených a vypočtených hodnot (výpočty veličin viz kapitola 6.2) z provedených měření a soupisu průměrných dosažených porovnávacích součinitelů přestupu \tilde{K} . Ve vyhodnocení místního ohřevu je porovnávací součinitel přestupu vztažen vzhledem k malé vytápěné ploše na délkový rozměr lopatky 50 mm, oproti celkovému ohřevu, který je vztažen na plochu lopatky – detailní průběhy pro všechna měření viz Přílohy 3; 4; 5.



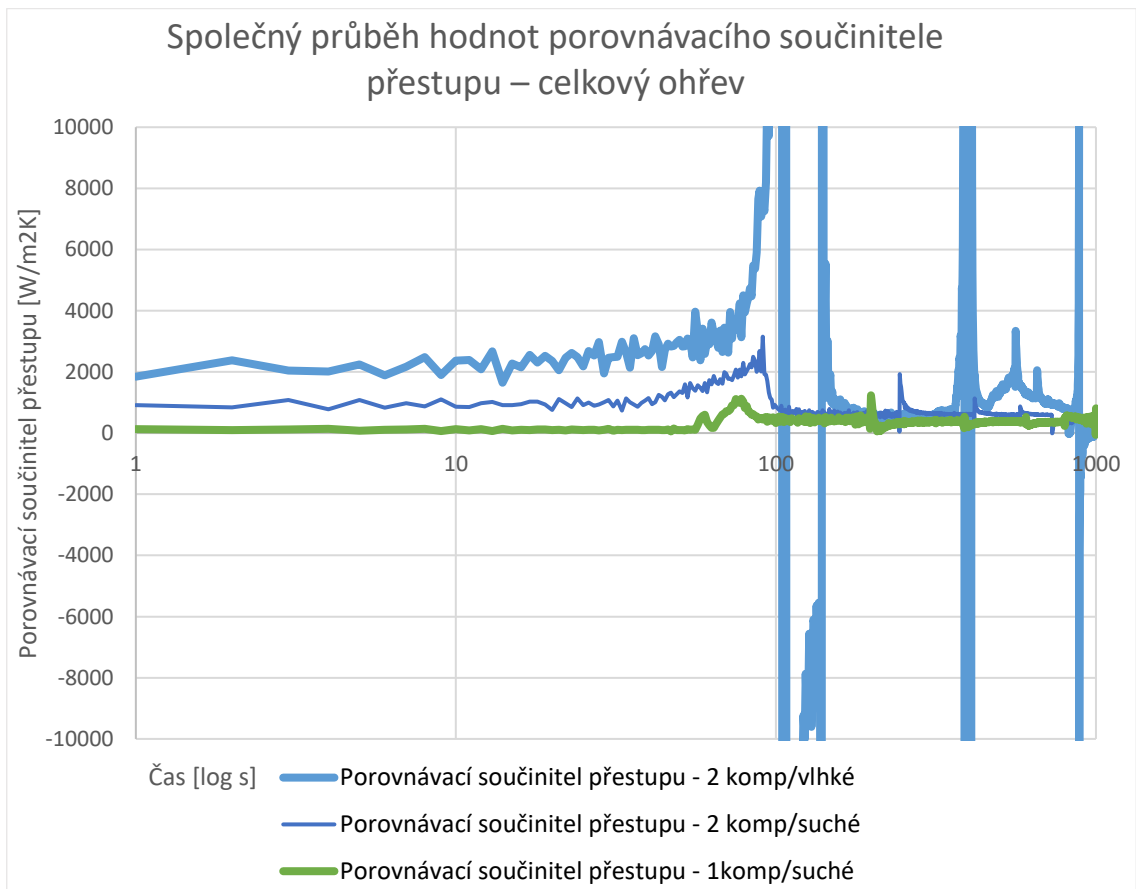
Graf 2 – Ilustrační průběh rychlosti v průtočném kanále – 1 kompresor



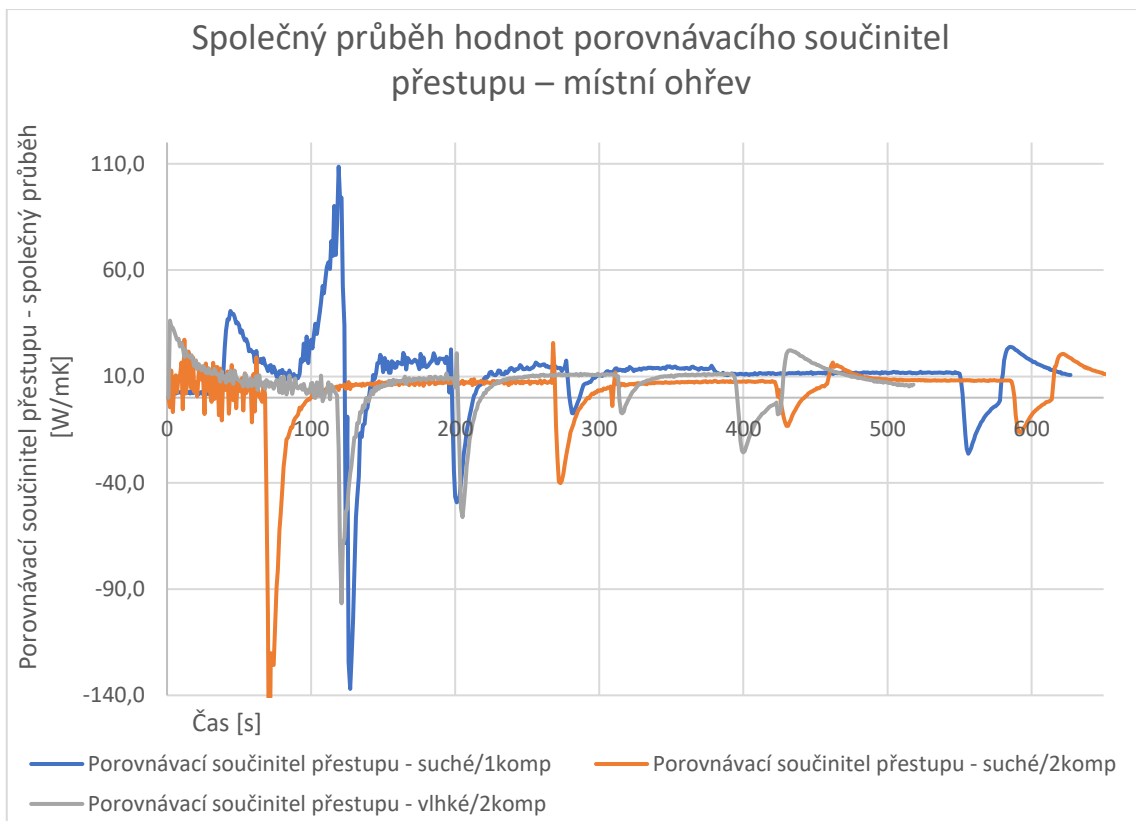
Graf 3 – Ilustrační průběh rychlostí v průtočném kanále – 2 kompresory



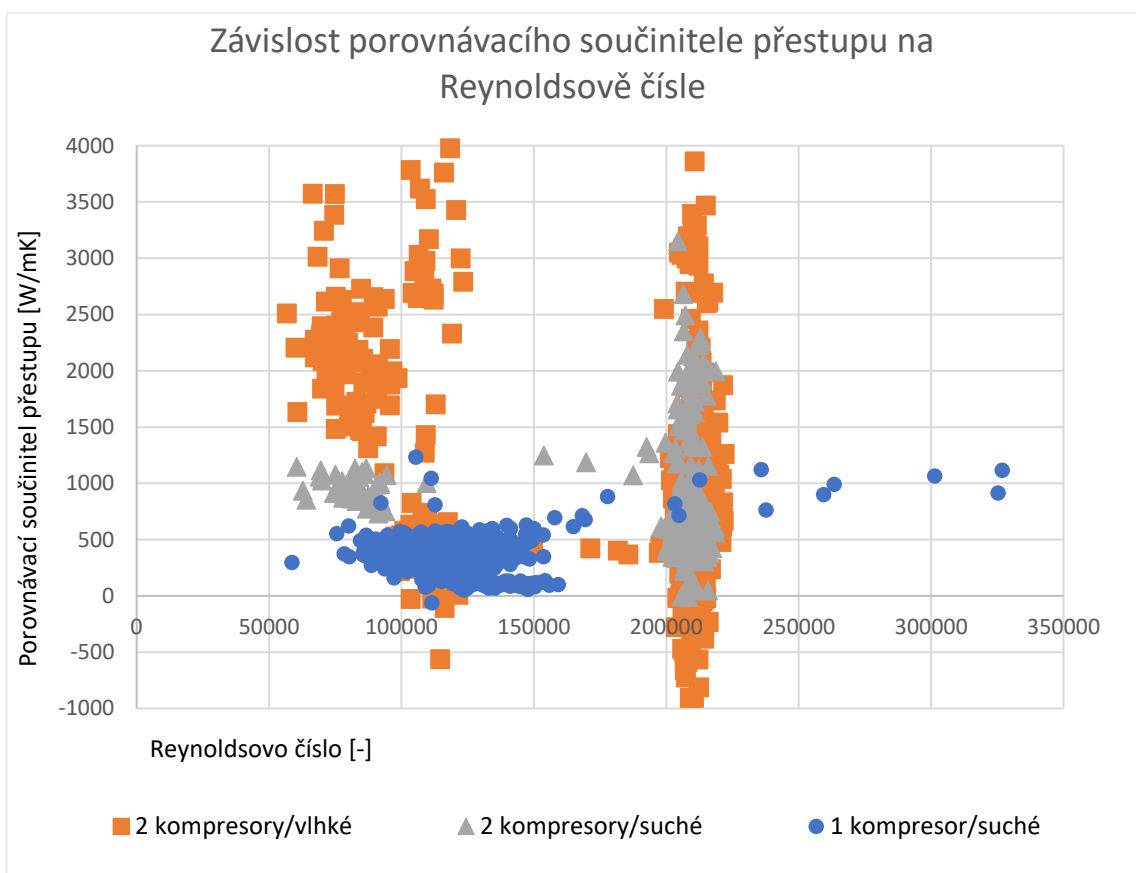
Graf 4 – Ilustrační průběh porovnávacího součinitele přestupu



Graf 5 – Společný průběh hodnot porovnávacího součinitele přestupu – celkový ohřev



Graf 6 - Společný průběh hodnot porovnávacího součinitele přestupu – místní ohřev



Graf 7 - Společná závislost porovnávacího součinitele přestupu na Re – místní ohřev

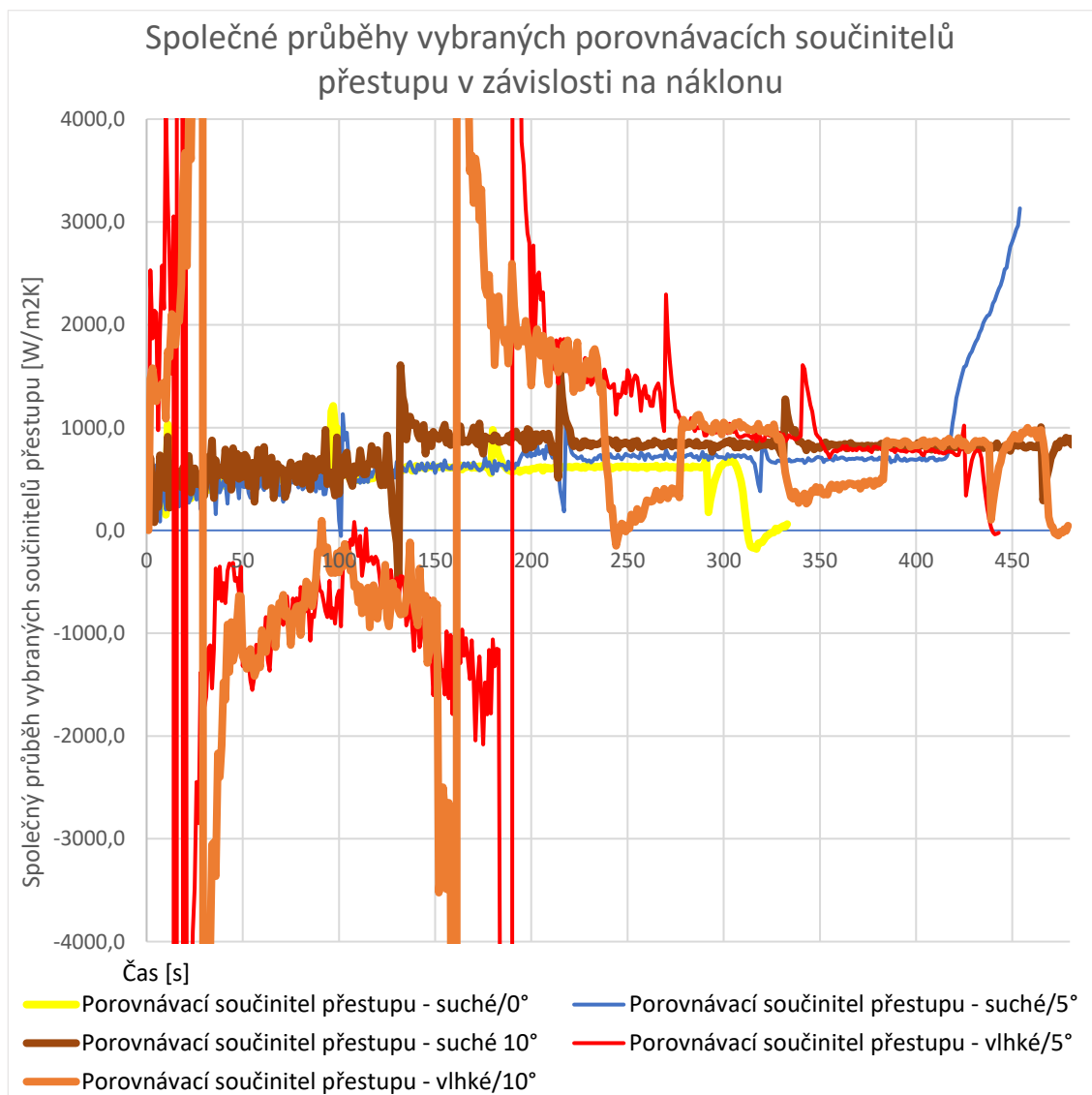
V rámci měření celkového a místního ohřevu bylo dosaženo následujících průměrných hodnot porovnávacího součinitele přestupu \tilde{K} v průběhu přechodových jevů:

Tabulka 5 - Dosažené hodnoty porovnávacího součinitele – celkový ohřev

| | | |
|----------------------|------------------|---------------------|
| 1 kompresor - suché | | $\frac{W}{m^2 * K}$ |
| 1. ohřev | 378,65 | |
| 2. ohřev | 379,07 | |
| 3. ohřev | 360,97 | |
| Chladnutí | 368,75 | |
| 2 kompresory - suché | | |
| 1. ohřev | 538,77 | |
| 2. ohřev | 558,07 | |
| 3. ohřev | 572,48 | |
| Chladnutí | 494,67 | |
| 2 kompresory - vlhké | | |
| 1. ohřev | 628,25 | |
| 2. ohřev | 1 101,78 | |
| 3. ohřev | 758,96 | |
| Chladnutí | -1 187,37 | |

Tabulka 6 - Dosažené hodnoty porovnávacího součinitele – místní ohřev

| | | |
|----------------------|--------------|-------------------|
| 1 kompresor - suché | | $\frac{W}{m * K}$ |
| 1. ohřev | 7,35 | |
| 2. ohřev | 7,57 | |
| 3. ohřev | 5,32 | |
| 4. ohřev | 10,96 | |
| 1. Chladnutí | 8,06 | |
| 2 kompresory - suché | | |
| 1. ohřev | 8,83 | |
| 2. ohřev | 10,84 | |
| 3. ohřev | 10,82 | |
| 4. ohřev | 13,23 | |
| Chladnutí | 8,22 | |
| 2 kompresory - vlhké | | |
| 1. ohřev | 16,87 | |
| 2. ohřev | 14,18 | |
| 3. ohřev | 14,02 | |
| 4. ohřev | 11,74 | |
| 5. ohřev | 10,12 | |
| Chladnutí | 14,59 | |



Graf 8 - Společné průběhy vybraných porovnávacích součinitelů přestupu v závislosti na náklonu

Následující tabulka shrnuje dosažené průměrné hodnoty porovnávacího součinitele přestupu při měření pro různé náklony:

Tabulka 7 - Dosažené hodnoty porovnávacího součinitele - měření s náklonem lopatky

| | | | |
|--|----------------|---|----------------|
| Měření suché/1kompresor/0° náklon [W/m ² K] | | Měření suché/2kompresory/0° náklon [W/m ² K] | |
| 1. Ohřev | 370,6 | 1. Ohřev | 321,9 |
| 2. Ohřev | 384,7 | 2. Ohřev | 505,0 |
| 3. Ohřev | 384,1 | 3. Ohřev | 615,3 |
| 4. Ohřev | 386,7 | 4. Ohřev | 616,3 |
| Chlazení | 326,0 | Chlazení | 590,2 |
| Měření suché/1kompresor/5° náklon [W/m ² K] | | Měření suché/2kompresory/5° náklon [W/m ² K] | |
| 1. Ohřev | 494,3 | 1. Ohřev | 437,0 |
| 2. Ohřev | 440,7 | 2. Ohřev | 645,2 |
| 3. Ohřev | 433,0 | 3. Ohřev | 720,1 |
| 4. Ohřev | 419,6 | 4. Ohřev | 690,6 |
| Chlazení | 679,3 | | |
| Měření suché/1kompresor/10° náklon [W/m ² K] | | Měření suché/2kompresory/10° náklon [W/m ² K] | |
| 1. Ohřev | 768,2 | 1. Ohřev | 623,9 |
| 2. Ohřev | 504,8 | 2. Ohřev | 899,2 |
| 3. Ohřev | 477,1 | 3. Ohřev | 838,6 |
| 4. Ohřev | 455,9 | 4. Ohřev | 818,2 |
| Chlazení | 785,8 | Chlazení | 693,0 |
| Měření vlhké/2kompresory/0° náklon [W/m ² K] | | Měření s vlhké/2kompresory/5° náklon [W/m ² K] | |
| 1. Ohřev | 1 044,8 | 1. Ohřev | 835,4 |
| 2. Ohřev | 797,5 | 2. Ohřev | 1 382,0 |
| 3. Ohřev | 691,6 | 3. Ohřev | 919,6 |
| Chlazení | 727,9 | 4. Ohřev | 767,2 |
| | | Chlazení | 600,2 |
| Měření s vlhké/2kompresory/10° náklon [W/m ² K] | | Měření s vlhké/2kompresory/0° náklon [W/m ² K] | |
| 1. Ohřev | 665,6 | 1. Ohřev | 461,5 |
| 2. Ohřev | 1 648,8 | 2. Ohřev | 2 083,4 |
| 3. Ohřev | 1 001,8 | 3. Ohřev | 1 084,0 |
| 4. Ohřev | 846,9 | 4. Ohřev | 788,9 |
| Chlazení | 757,6 | 1. Chlazení | 790,9 |
| | | 2. Chlazení | 790,9 |

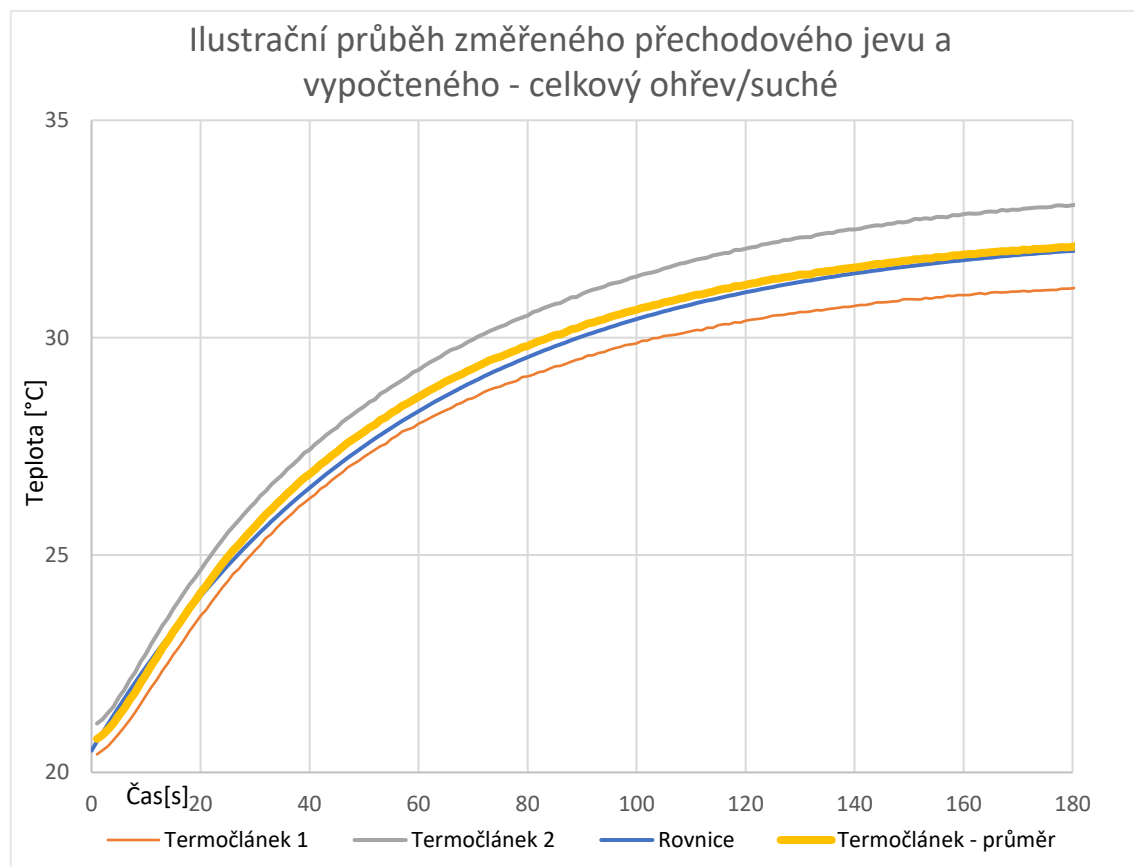
6.4 Analýza přechodových jevů

Na základě rovnice (42) odvozené v kapitole 6.2.8 jsou vymodelovány křivky přechodových dějů. Tyto křivky jsou modelovány se snahou dosáhnout shody s přechodovým dějem zjištěným při měření. U celkového ohřevu a celkového ohřevu v náklonu kvůli nehomogenitě teplotního pole modelujeme na křivku průměrů z obou termočlánků a u místního ohřevu modelujeme kvůli velmi malé vytápěné ploše dvě

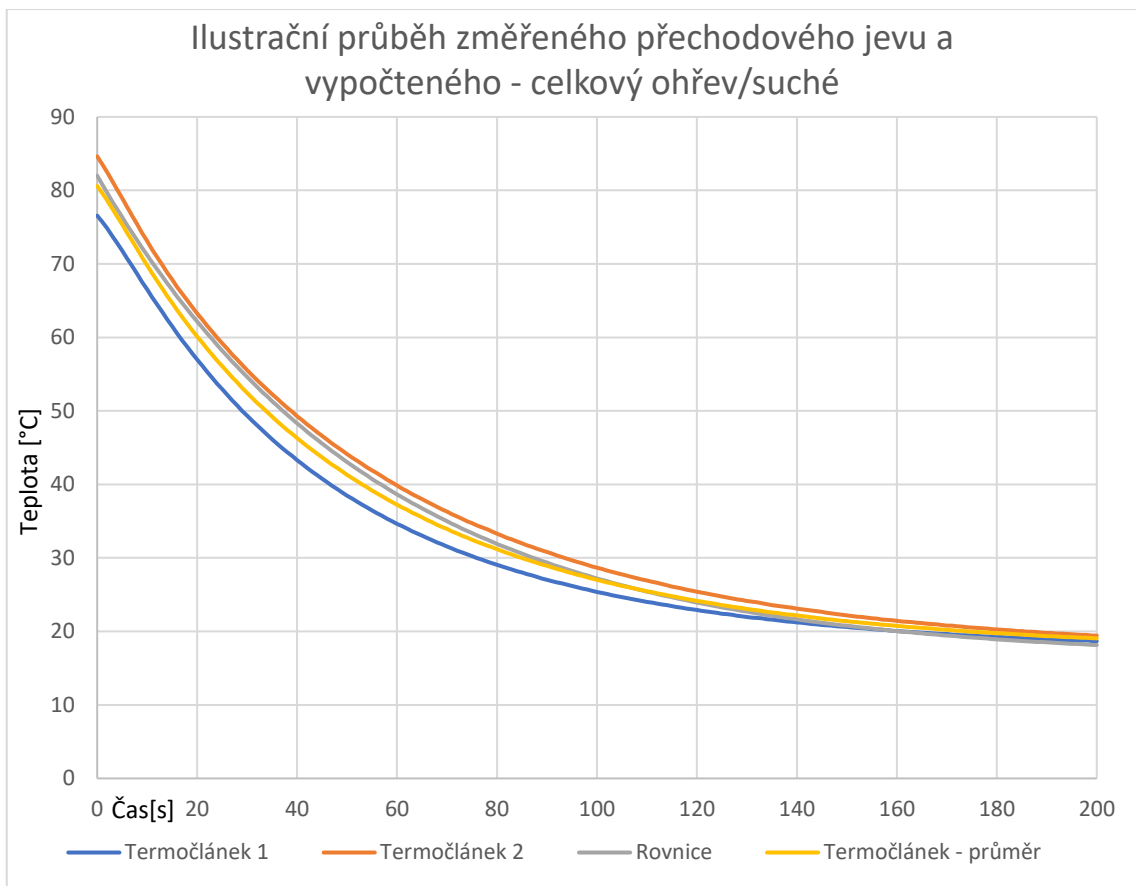
křivky pro oba termočlánky. Nejoptimálnější křivku se snažíme nalézt určením optimální hodnoty konstanty C . U měření, kde nelze dosáhnout optimální vizuální shody s průměrovou křivkou z termočlánků, je nejoptimálnější křivka vyhodnocena pomocí minimalizace součtu druhých mocnin rozdílů mezi teplotou naměřenou termočlánky, respektive průměrem a hodnotou dle rovnice (42). Křivky jsou modelovány pro konstantní hodnoty součinu hmotnosti a tepelné kapacity. Kromě zmíněných křivek je vynesena i závislost součinitele C na topném výkonu. Detailní průběh všech křivek viz Přílohy 3; 4; 5.

6.4.1 Průběhy přechodových jevů – celkový ohřev lopatek

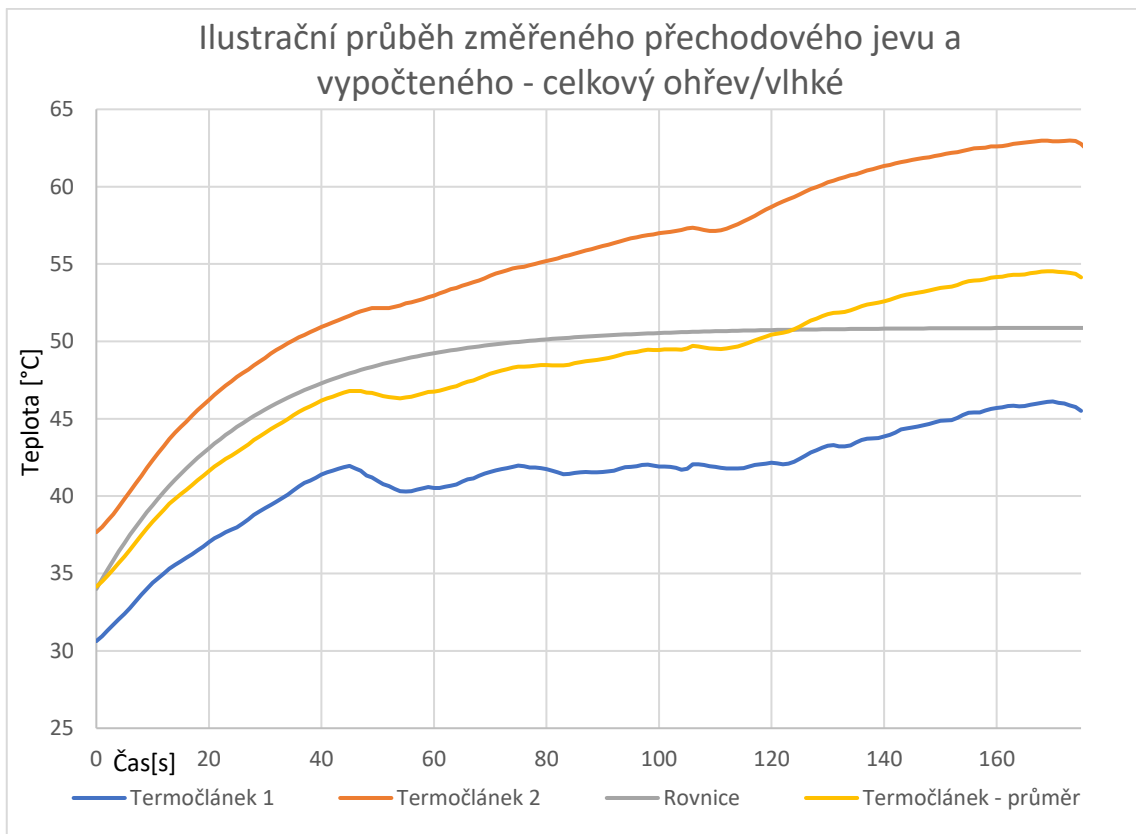
Tato kapitola se věnuje vyobrazení ilustračních průběhů křivek modelovaných při měřeních, kde byl testován celkový ohřev lopatek při 3 různých situacích – bez přívodu vlhkosti s jedním a dvěma kompresory a s přívodem vlhkosti při 2 sepnutých kompresorech.



Graf 9 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu - suché



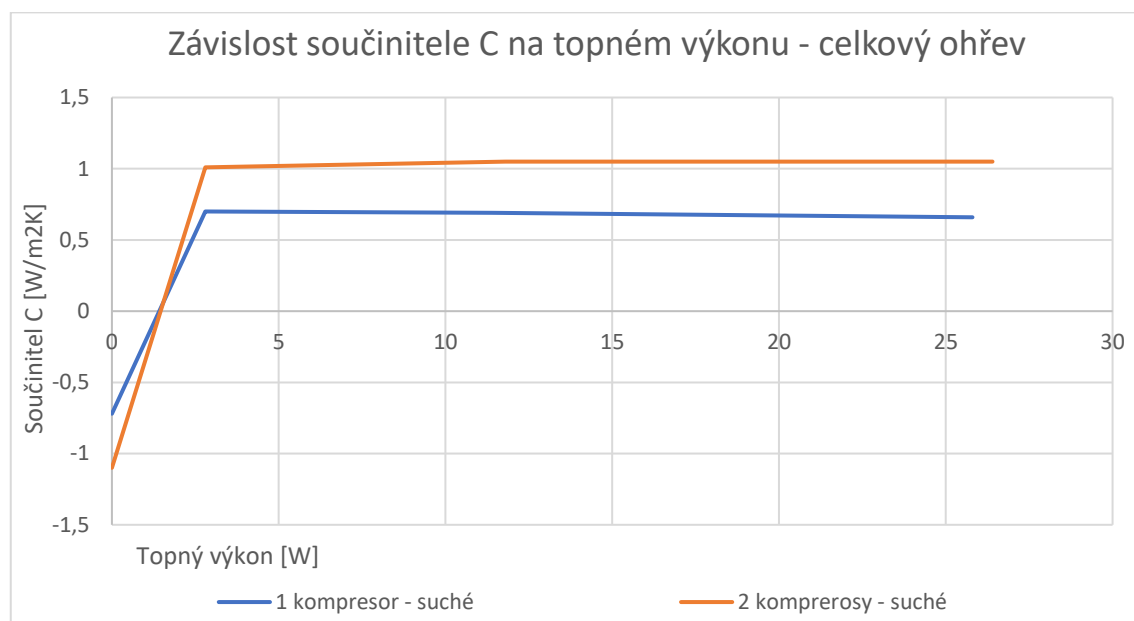
Graf 10 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při chlazení - suché



Graf 11 - Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu - vlhké

6.4.1.1 Závislost součinitele C - celkový ohřev

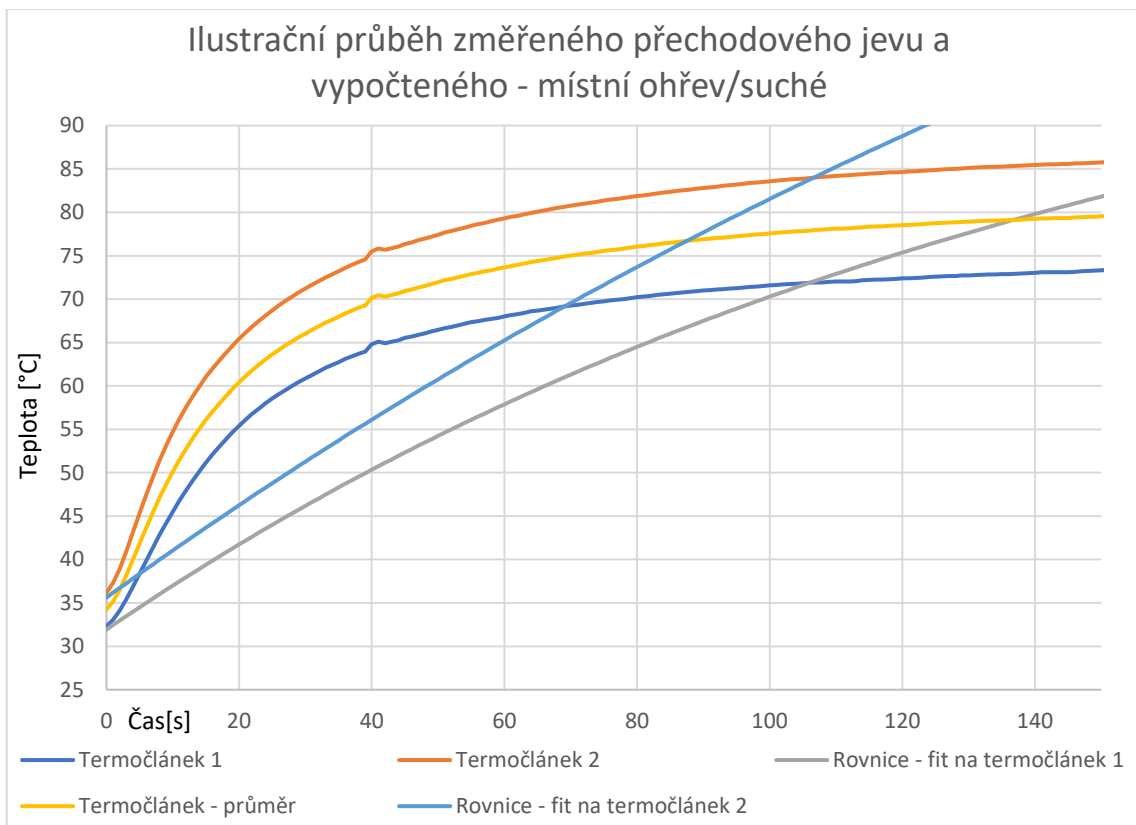
V rámci modelování optimálních křivek přechodových jevů byly určeny co nejoptimálnější hodnoty C pro celkový ohřev lopatky. Závislost optimálních C na topném výkonu můžeme vidět na Grafu 12 níže. Na základě této závislosti můžeme vidět, že hodnota C je pro všechny nenulové výkony při celkovém ohřevu prakticky konstantní:



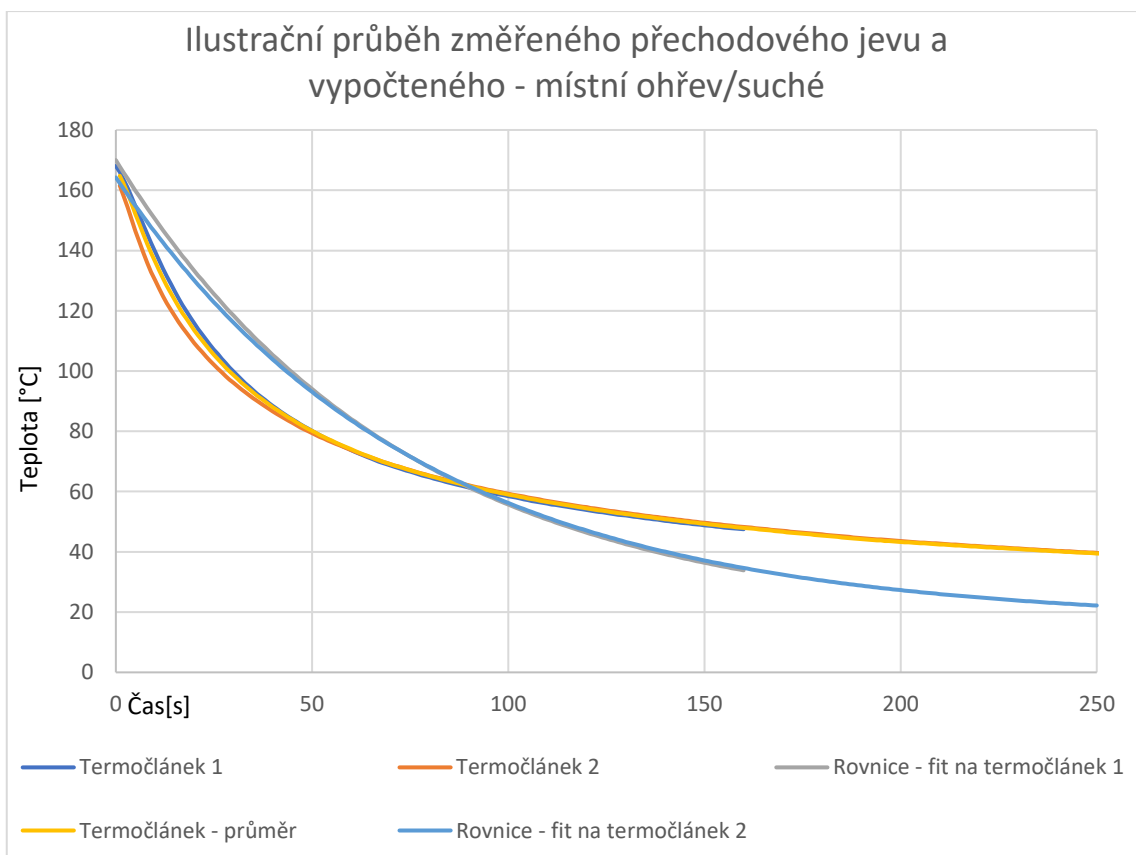
Graf 12 - Závislost součinitele C na topném výkonu – celkový ohřev

6.4.2 Průběhy přechodových jevů – místní ohřev lopatek

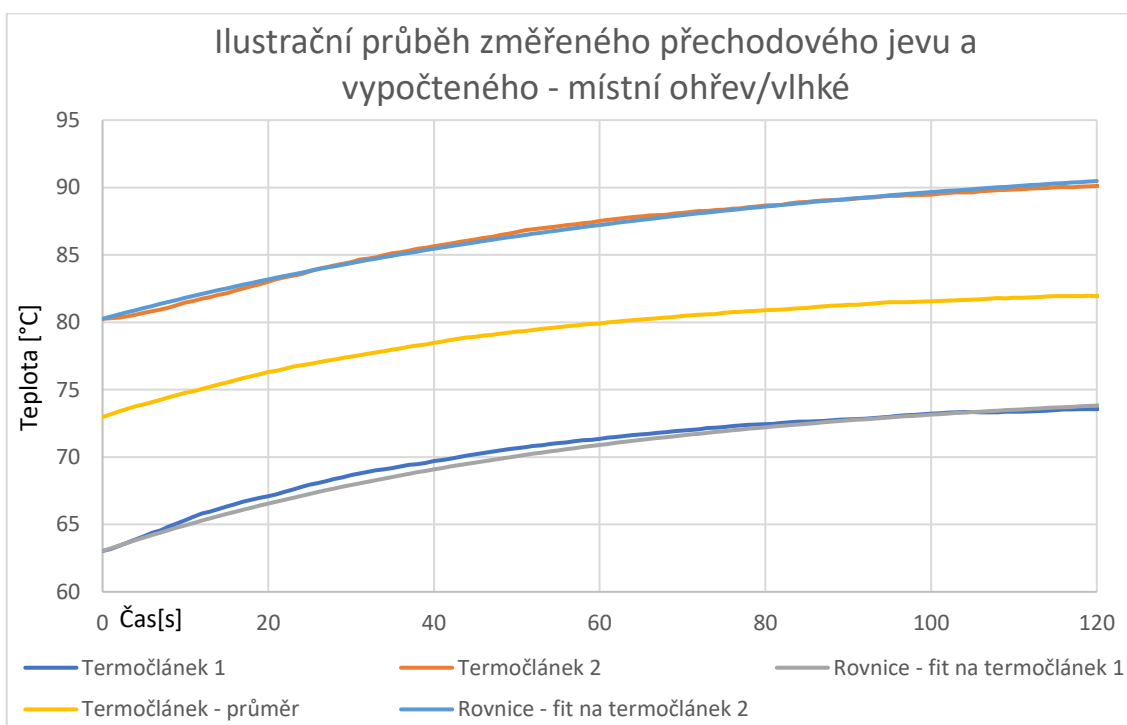
Tato kapitola se věnuje ilustračním průběhům křivek modelovaných pro měření, kde byl testován místní ohřev lopatky při 3 různých měřeních – bez přívodu vlhkosti a jedním kompresorem, bez přívodu vlhkosti a dvěma zapojenými kompresory a se dvěma kompresory při dodávce vlhkosti. V této kapitole jsou modelovány oproti ostatním měřením 2 křivky s maximální shodou s průběhem teplot na jednotlivých termočláncích.



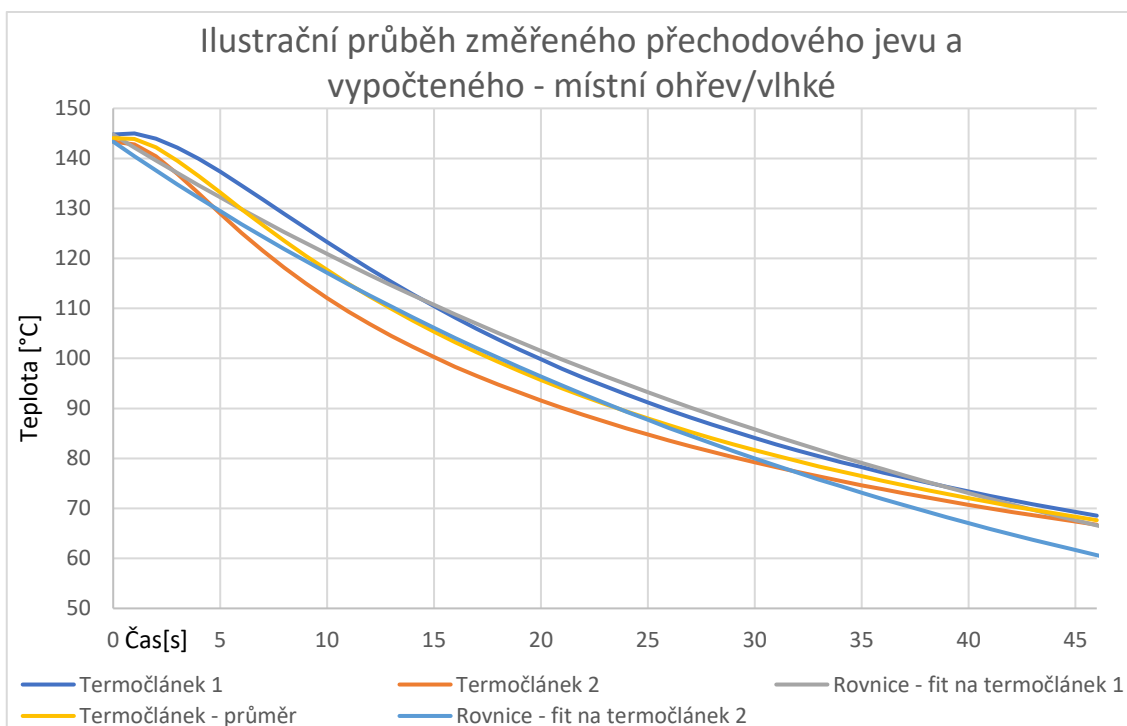
Graf 13 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu - suché



Graf 14 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při chlazení - suché



Graf 15 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu - vlhké

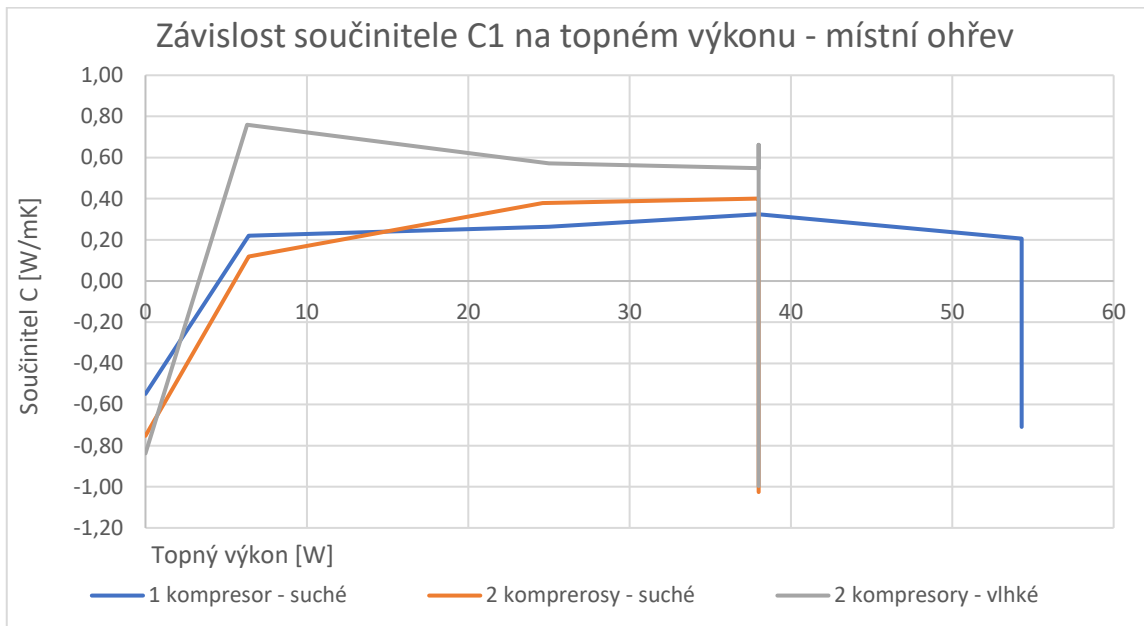


Graf 16 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při chlazení - vlhké

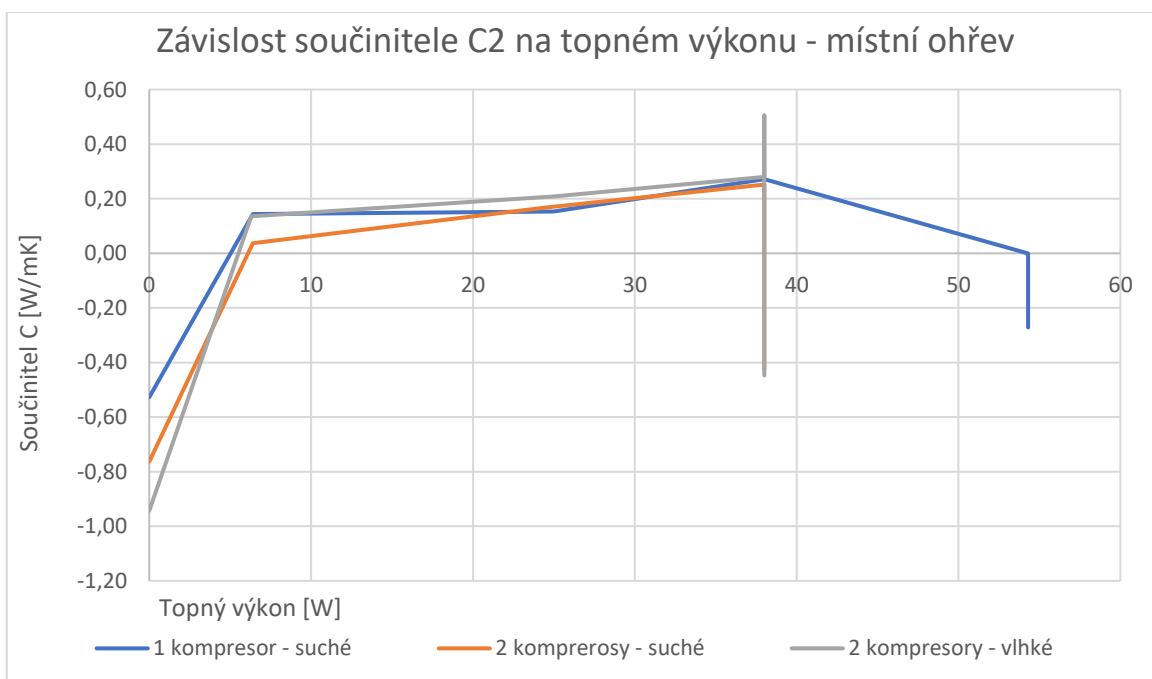
6.4.2.1 Závislost součinitele C – místní ohřev pro Leidenfrotův jev

Stejně jako v kapitole 6.4.1.1 je v této kapitole vynesena závislost neoptimálnějších hodnot C na topném výkonu pro místní ohřev. Zde můžeme oproti celkovému ohřevu

vidět, že C nabývá s rostoucím topným výkonem relativně konstantních hodnot, nicméně s poznatelnou změnou. Dále si lze všimnout, že jedné hodnotě výkonu odpovídá více hodnot C , nejedná se však o chybu. Při měření docházelo za účelem posouzení vlivu zastavení toku na součinitele C k vypnutí kompresoru a pro měření s dodávkou vlhkosti navíc k zastavení dodávky vlhkosti za stejným účelem. Z naměřených křivek lze vidět, že odpojení dodávky vlhkosti vede k růstu součinitele C a odpojení kompresoru k jeho poklesu do záporných hodnot.



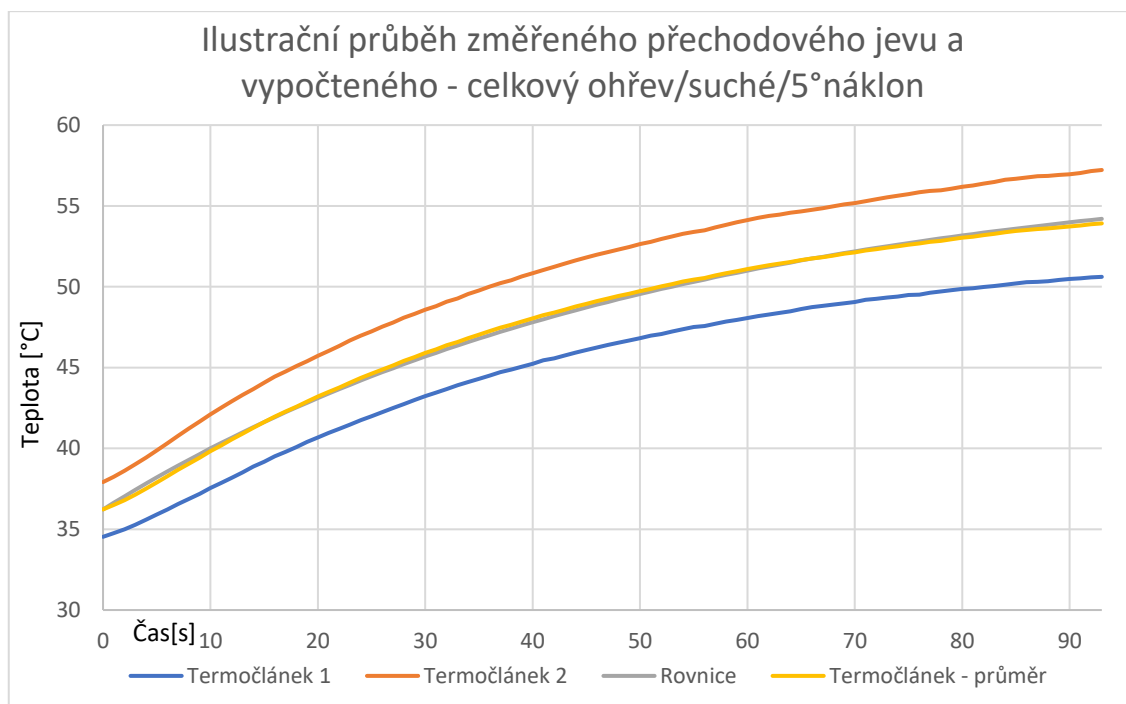
Graf 17 - Závislost součinitele C1 na topném výkonu – místní ohřev



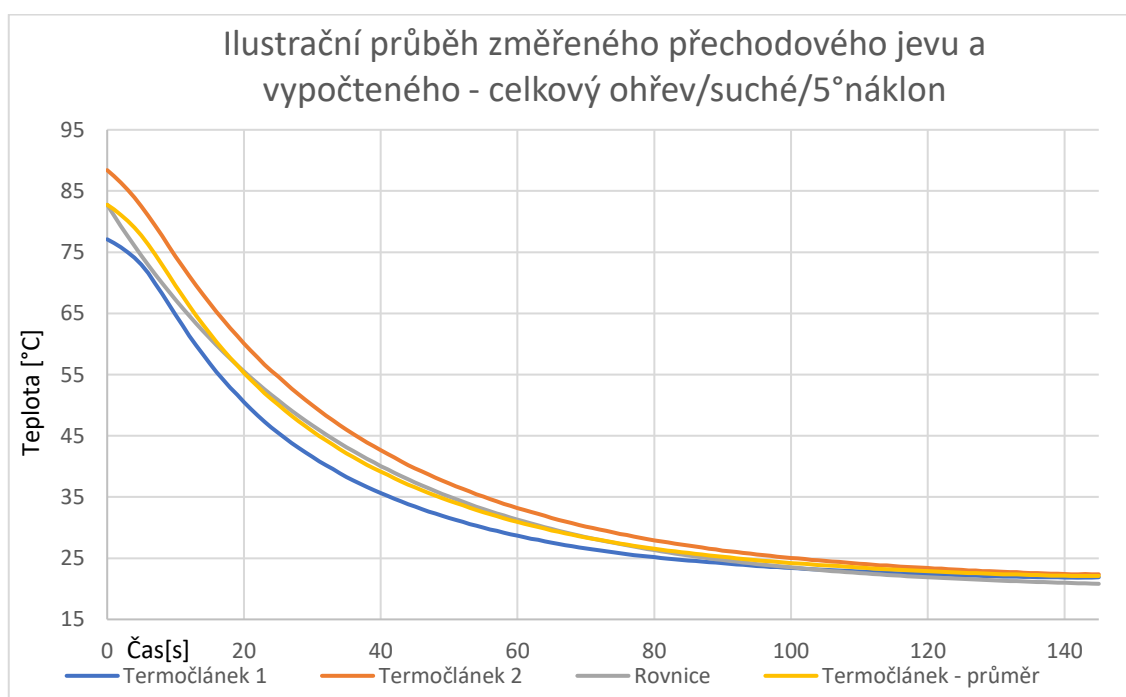
Graf 18 - Závislost součinitele C2 na topném výkonu – místní ohřev

6.4.3 Průběhy přechodových jevů – ohřev s náklonem lopatky

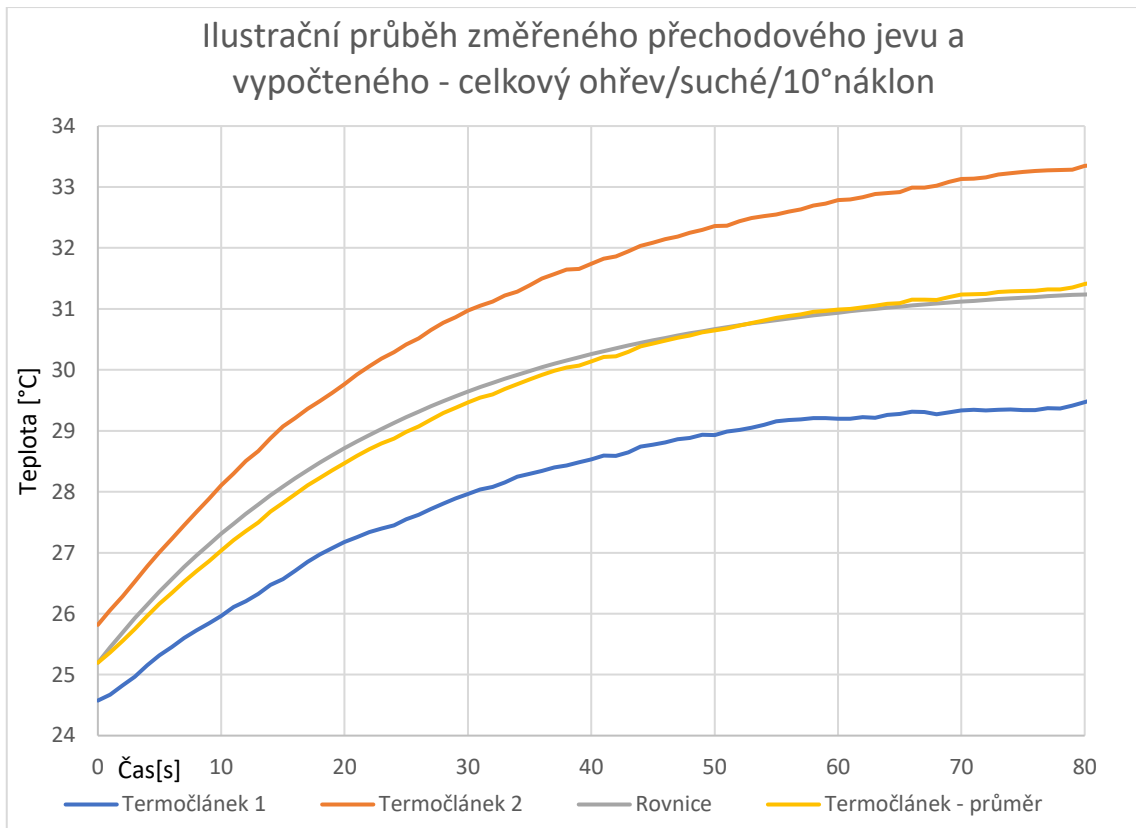
Tato kapitola se věnuje průběhům křivek modelovaných pro měření, kde byl testován celkový ohřev lopatky pro různé úhly náběhu. Celkem bylo provedeno 10 měření s dávkováním vlhkosti i bez, použitím 1 nebo 2 kompresorů a různé úhly náběhu 0°; 5°; 10°.



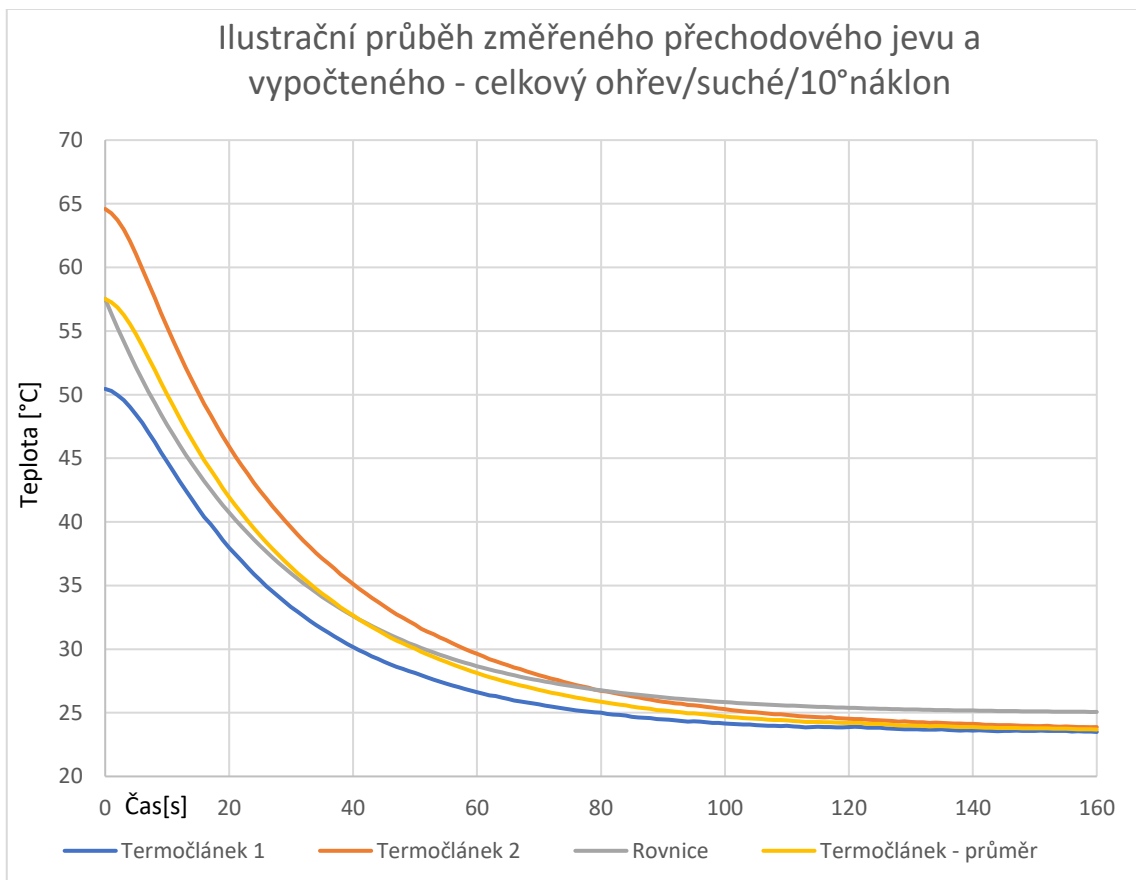
Graf 19 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu v náklonu



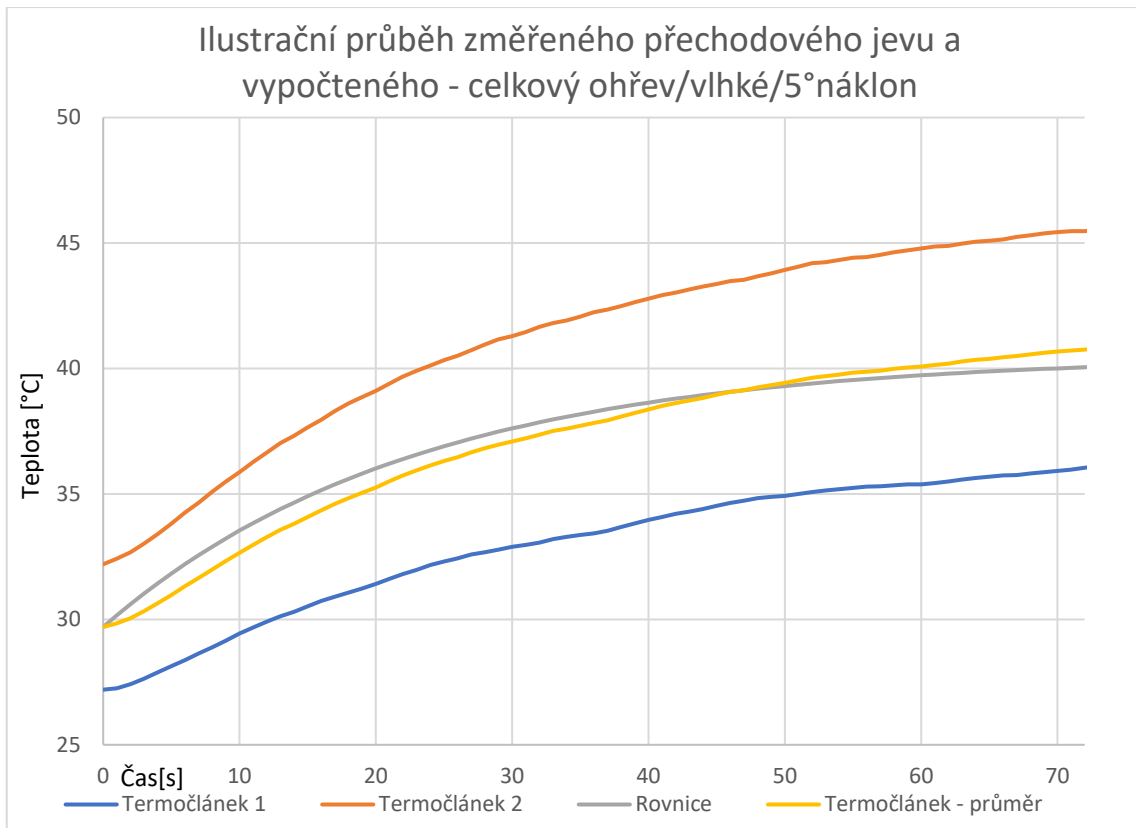
Graf 20 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při chlazení v náklonu



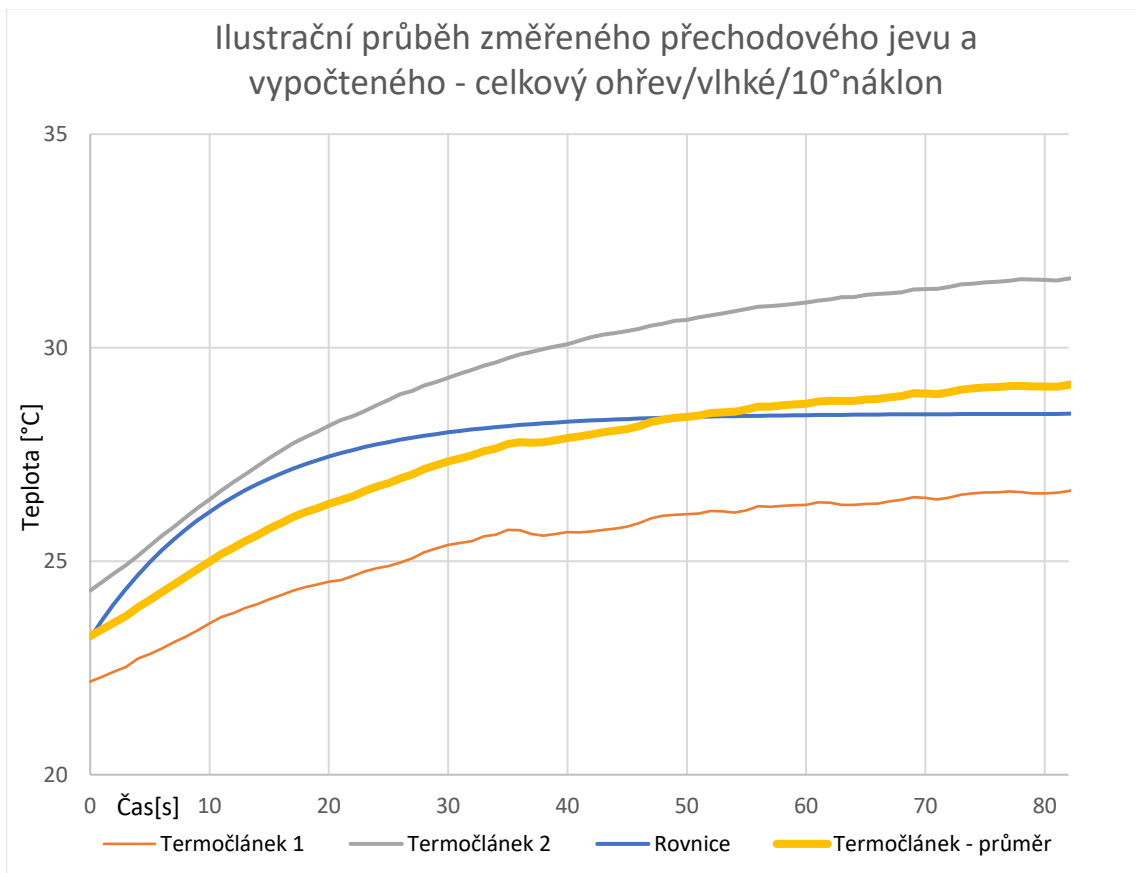
Graf 21 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu v náklonu



Graf 22 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při chlazení v náklonu



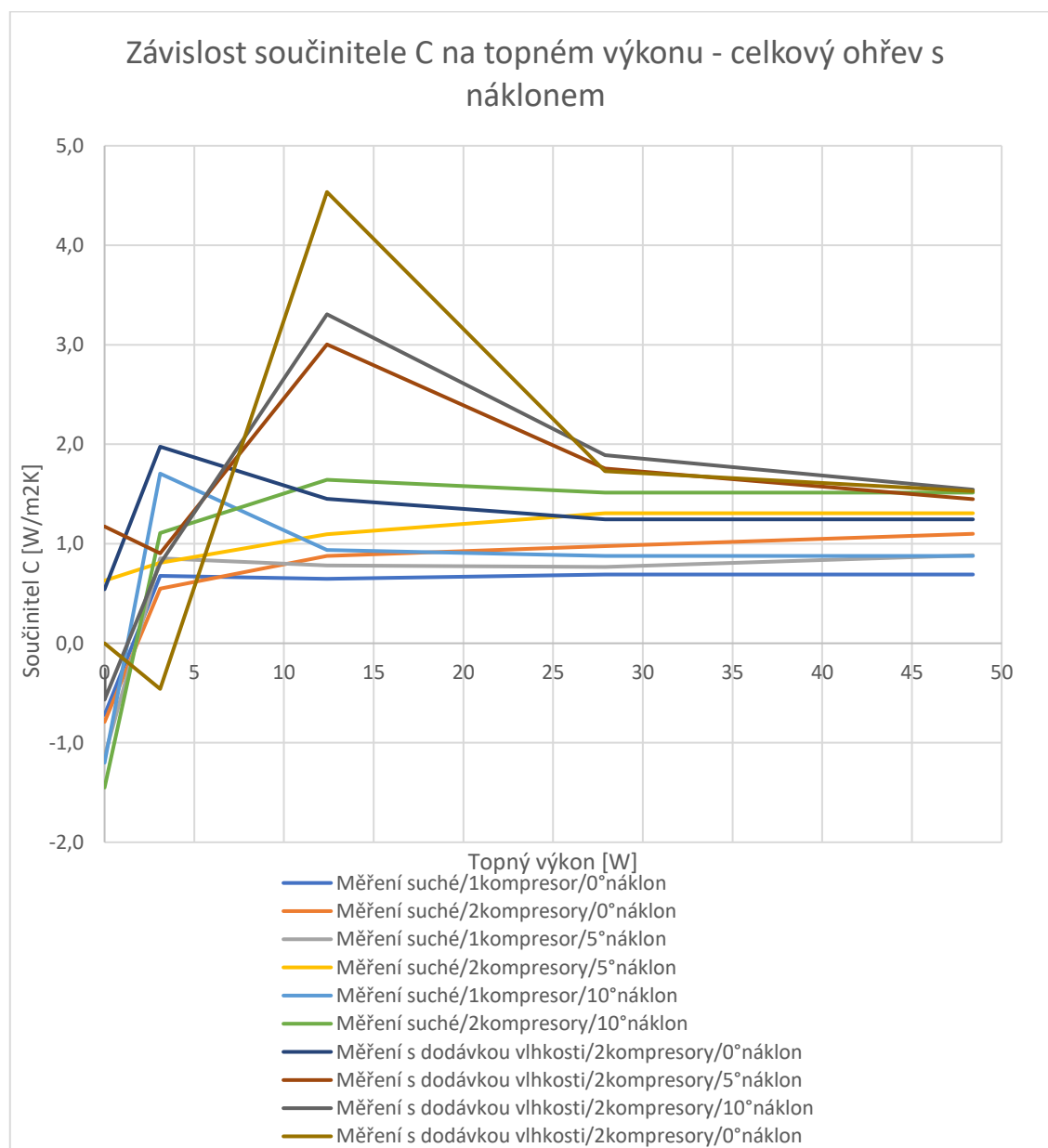
Graf 23 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu v náklonu



Graf 24 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu v náklonu

6.4.3.1 Závislost součinitele C na topném výkonu – celkový ohřev s náklonem

Stejně jako v kapitole 6.4.1.1 a 6.4.1.2 je v této kapitole vynesena závislost neoptimalnějších hodnot C na topném výkonu z měření celkového ohřevu za různých náklonů. Z naměřených hodnot lze vidět, že suchá měření vykazují stálejší hodnoty tohoto součinitele. Naproti tomu měření s dodávkou vlhkosti dosahují méně stálých hodnot.



Graf 25 - Závislost součinitele C na topném výkonu – celkový ohřev s náklonem

6.4.4 Vztah součinitele C a \tilde{K} pro jednotlivé typy ohřevů

Vztah mezi těmito součiniteli by měl spočívat ve vzájemné shodnosti s tím rozdílem, že součinitel \tilde{K} je hodnotou plynoucí z řešení přestupu tepla při měření a C je veličinou

plynucí z diferenciální rovnice popisující odpovídající přechodový děj. Z rozdílů mezi hodnotami jednotlivých součinitelů, které by si měly odpovídat, dovozujeme, že mezi \tilde{K} a C existuje ještě bezrozměrný násobící součinitel I. Tento součinitel určíme pomocí podílu \tilde{K} a C přechodového jevu. Tuto úvahu shrnují následující tabulky:

Tabulka 8 - Shrnutí násobící konstanty mezi součiniteli při celkovém ohřevu

| Určení násobícího součinitele při celkovém ohřevu | | | |
|---|-------|-------------|----------------------|
| Přechodový jev | C | \tilde{K} | Násobící konstanta I |
| 1 kompresor - suché | | | |
| 1. ohřev | 0,70 | 378,65 | 540,93 |
| 2. ohřev | 0,69 | 379,07 | 549,37 |
| 3. ohřev | 0,65 | 360,97 | 555,33 |
| Chladnutí | -0,72 | 368,75 | -512,15 |
| 2 kompresory - suché | | | |
| 1. ohřev | 1,01 | 538,77 | 533,44 |
| 2. ohřev | 1,05 | 558,07 | 531,50 |
| 3. ohřev | 1,05 | 572,48 | 545,22 |
| Chladnutí | -1,10 | 494,67 | -449,70 |
| 2 kompresory - vlhké | | | |
| 1. ohřev | 1,52 | 628,25 | 414,31 |
| 2. ohřev | 2,12 | 1 101,78 | 519,94 |
| 3. ohřev | 1,70 | 758,96 | 446,06 |
| Chladnutí | -0,78 | -1 187,37 | 1 514,14 |

Tabulka 9 - Shrnutí násobící konstanty mezi součiniteli při lokálním ohřevu pro Leidenfrostův jev

| Určení násobícího součinitele při celkovém ohřevu | | | | | |
|---|----------------|----------------|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Přechodový jev | C ₁ | C ₂ | \tilde{K} | Násobící konstanta I ₁ | Násobící konstanta I ₂ |
| 1 kompresor - suché | | | | | |
| 1. ohřev | 0,22 | 0,14 | 7,35 | 33,32 | 51,04 |
| 2. ohřev | 0,26 | 0,15 | 7,57 | 28,63 | 49,46 |
| 3. ohřev | 0,08 | 0,20 | 5,32 | 66,01 | 26,52 |
| 4. ohřev | 0,72 | 0,27 | 10,96 | 15,20 | 40,46 |
| Chladnutí | -0,32 | -0,27 | 8,06 | -24,85 | -29,69 |
| 2 kompresory - suché | | | | | |
| 1. ohřev | 0,12 | 0,10 | 8,83 | 74,17 | 88,28 |
| 2. ohřev | 0,38 | 0,17 | 10,84 | 28,63 | 64,40 |
| 3. ohřev | 0,40 | 0,25 | 10,82 | 26,99 | 42,93 |
| 4. ohřev | 1,03 | 0,42 | 13,23 | 12,90 | 31,14 |
| Chladnutí | -0,75 | -0,76 | 8,22 | -10,93 | -10,77 |
| 2 kompresory - vlhké | | | | | |
| 1. ohřev | 0,76 | 0,12 | 16,87 | 22,22 | 142,33 |
| 2. ohřev | 0,57 | 0,21 | 14,18 | 24,79 | 68,24 |
| 3. ohřev | 0,55 | 0,28 | 14,02 | 25,56 | 50,19 |
| 4. ohřev | 0,66 | 0,51 | 11,74 | 17,74 | 23,25 |
| 5. ohřev | 1,00 | 0,45 | 10,12 | 10,16 | 22,63 |
| Chladnutí | -0,84 | -0,94 | 14,59 | -17,42 | -15,48 |

Tabulka 10 - Shrnutí násobící konstanty mezi součiniteli při celkovém ohřevu s náklonem

| Měření suché/1kompresor/0°náklon | | | |
|--|------|-------------|----------|
| Přechodový jev | C | \tilde{K} | I |
| 1. Ohřev | 0,7 | 370,6 | 547,8 |
| 2. Ohřev | 0,6 | 384,7 | 593,1 |
| 3. Ohřev | 0,7 | 384,1 | 555,8 |
| 4. Ohřev | 0,7 | 386,7 | 559,6 |
| Chladnutí | -0,7 | 326,0 | -452,8 |
| Měření suché/1kompresor/5°náklon | | | |
| Přechodový jev | C | \tilde{K} | I |
| 1. Ohřev | 0,9 | 494,3 | 578,6 |
| 2. Ohřev | 0,8 | 440,7 | 563,2 |
| 3. Ohřev | 0,8 | 433,0 | 564,0 |
| 4. Ohřev | 0,9 | 419,6 | 474,3 |
| Chladnutí | -1,1 | 679,3 | -599,5 |
| Měření suché/1kompresor/10°náklon | | | |
| Přechodový jev | C | \tilde{K} | I |
| 1. Ohřev | 1,7 | 768,2 | 450,5 |
| 2. Ohřev | 0,9 | 504,8 | 538,6 |
| 3. Ohřev | 0,9 | 477,1 | 543,7 |
| 4. Ohřev | 0,9 | 455,9 | 519,4 |
| Chladnutí | -1,2 | 785,8 | -654,9 |
| Měření s dodávkou vlhkosti/2kompresory/0°náklon | | | |
| Přechodový jev | C | \tilde{K} | I |
| 1. Ohřev | 1,5 | 1 044,8 | 720,6 |
| 2. Ohřev | 1,2 | 797,5 | 640,1 |
| 3. Ohřev | 1,2 | 691,6 | 555,1 |
| Chladnutí | 0,5 | 727,9 | 1340,6 |
| Měření s dodávkou vlhkosti/2kompresory/10°náklon | | | |
| Přechodový jev | C | \tilde{K} | I |
| 1. Ohřev | 0,8 | 665,6 | 831,9 |
| 2. Ohřev | 3,3 | 1 648,8 | 498,7 |
| 3. Ohřev | 1,9 | 1 001,8 | 530,2 |
| 4. Ohřev | 1,5 | 846,9 | 548,9 |
| Chladnutí | -0,6 | 757,6 | -1 337,7 |
| Měření suché/2kompresory/0°náklon | | | |
| Přechodový jev | C | \tilde{K} | I |
| 1. Ohřev | 0,5 | 321,9 | 587,3 |
| 2. Ohřev | 0,9 | 505,0 | 576,3 |
| 3. Ohřev | 1,0 | 615,3 | 630,8 |
| 4. Ohřev | 1,1 | 616,3 | 560,3 |
| Chladnutí | -0,8 | 590,2 | -747,1 |
| Měření suché/2kompresory/5°náklon | | | |
| Přechodový jev | C | \tilde{K} | I |
| 1. Ohřev | 0,8 | 437,0 | 540,3 |
| 2. Ohřev | 1,1 | 645,2 | 589,5 |
| 3. Ohřev | 1,3 | 720,1 | 551,0 |
| 4. Ohřev | 1,3 | 690,6 | 528,4 |
| Měření suché/2kompresory/10°náklon | | | |
| Přechodový jev | C | \tilde{K} | I |
| 1. Ohřev | 1,1 | 623,9 | 562,7 |
| 2. Ohřev | 1,6 | 899,2 | 547,2 |
| 3. Ohřev | 1,5 | 838,6 | 553,6 |
| 4. Ohřev | 1,5 | 818,2 | 540,2 |
| Chladnutí | -1,5 | 693,0 | -477,9 |

| Měření s dodávkou vlhkosti/2kompresory/5°náklon | | | |
|--|------|-------------|----------|
| Přechodový jev | C | \tilde{K} | I |
| 1. Ohřev | 0,9 | 835,4 | -924,4 |
| 2. Ohřev | 3,0 | 1 382,0 | 460,2 |
| 3. Ohřev | 1,8 | 919,6 | 523,7 |
| 4. Ohřev | 1,4 | 767,2 | 529,8 |
| Chladnutí | 1,2 | 600,2 | 511,4 |
| Měření s dodávkou vlhkosti/2kompresory/10°náklon | | | |
| Přechodový jev | C | \tilde{K} | I |
| 1. Ohřev | -0,5 | 461,5 | -1 006,1 |
| 2. Ohřev | 4,5 | 2 083,4 | 459,4 |
| 3. Ohřev | 2,0 | 1 084,0 | 536,3 |
| 4. Ohřev | 1,5 | 788,9 | 515,9 |
| 1. Chladnutí | 0,8 | 790,9 | 1 040,6 |
| 2. Chladnutí | -1,5 | 851,4 | -545,1 |

6.5 Určení množství kapek dopadlých na povrch lopatky

V této kapitole určujeme množství kapek dopadlých na povrch lopatky pomocí změny odváděného výkonu mezi měřeními bez dodávky vlhkosti a s dodávkou vlhkosti v oblastech přechodových jevů. Jelikož není momentálně známo kolik vlhkosti na lopatce ulpívá a její určení by vyžadovalo samostatné studie nad rámec této práce, je vlhkost počítána skrze zjednodušení pomocí změny odváděného výkonu mezi suchým a vlhkým měřením. Na zjištění přesného množství ulpívající vlhkosti se bude pracovat v následujících pracích. Detailní výpočet pro všechny níže popsané předpoklady viz Příloha 6.

Na změnu odváděného výkonu jsou aplikovány tyto zjednodušující předpoklady:

- změna výkonu je vytvořena odparem dopadlých kapek;
- změna výkonu je způsobena ohřevem kapek na teplotu stěny lopatky;
- změna výkonu je způsobena ze $\frac{3}{4}$ ohřevem kapek a ze $\frac{1}{4}$ odparem kapek.

6.5.1 Předpoklad odparu vodních kapek

V této kapitole předpokládáme, že změna výkonu se děje odpařením dopadající vlhkosti. Základem tohoto předpokladu je bilanční rovnice:

$$\frac{P_{odvedene}^s - P_{odvedene}^v}{l} = m_{kap/odpa}$$

(43)

Kde $P_{odvedene}^S$ značí výkon odvedený z lopatky při suchém měření a $P_{odvedene}^V$ výkon odvedený při vlhkém měření, konstanta l značí měrné skupenské teplo vypařování a $m_{kap/odpa}$ značí odpařovanou hmotnost kapek. Takto vypočtená množství odpařených kapek shrnují následující tabulky:

Tabulka 11 - Hodnoty odpařené vlhkosti – celkový ohřev

| Odpařená vlhkost [g] | |
|----------------------|--------------|
| 1. ohřev | 0,015 |
| 2. ohřev | 0,096 |
| 3. ohřev | 0,126 |
| Chlazení | 0,059 |

Tabulka 12 - Hodnoty odpařené vlhkosti – místní ohřev

| Odpařená vlhkost [g] | |
|----------------------|--------------|
| 1. ohřev | 0,064 |
| 2. ohřev | 0,143 |
| 3. ohřev | 0,169 |
| Chlazení | 0,000 |

Tabulka 13 - Hodnoty odpařené vlhkosti - 5° náklon

| Odpařená vlhkost [g] | |
|----------------------|--------------|
| 1. ohřev | 0,019 |
| 2. ohřev | 0,038 |
| 3. ohřev | 0,064 |
| 4. ohřev | 0,029 |
| Chlazení | 0,063 |

Tabulka 14 - Hodnoty odpařené vlhkosti - 10° náklon

| Odpařená vlhkost [g] | |
|----------------------|--------------|
| 1. ohřev | 0,012 |
| 2. ohřev | 0,029 |
| 3. ohřev | 0,009 |
| 4. ohřev | 0,009 |
| Chlazení | 0,053 |

6.5.2 Předpoklad ohřevu vodních kapek na teplotu stěny lopatky

V této části předpokládáme, že výkonový rozdíl vzniká na základě ohřevu kapek na teplotu stěny lopatky, pro tento předpoklad složíme bilanční rovnici:

$$\frac{P_{odvedene}^S - P_{odvedene}^V}{c_{p/vod} * (T_{st/lop} - T_{pokoj})} = m_{kap/ohř}$$

(43)

Tato rovnice je v souladu s předpokladem pouhého ohřevu kapaliny. Je zde použita měrná tepelná kapacita vody $c_{p/vod}$ a $(T_{st/lop} - T_{pokoj})$, kde $T_{st/lop}$ značí teplotu stěny vlhké lopatky a konečnou teplotu ohřevu kapaliny a T_{pokoj} , což je teplota klidné vody

v zásobníku měřicí trati a teplota počáteční. Takto vypočtené množství odpařených kapek shrnuje následující následující tabulky:

Tabulka 15 - Hodnoty ohřáté vlhkosti – celkový ohřev

| Ohřátá vlhkost [g] | |
|--------------------|--------------|
| 1. ohřev | 1,083 |
| 2. ohřev | 4,188 |
| 3. ohřev | 2,867 |
| Chlazení | 1,885 |

Tabulka 16 - Hodnoty ohřáté vlhkosti – místní ohřev

| Ohřátá vlhkost [g] | |
|--------------------|--------------|
| 1. ohřev | 5,660 |
| 2. ohřev | 6,807 |
| 3. ohřev | 4,530 |
| Chlazení | 0,000 |

Tabulka 17 - Hodnoty ohřáté vlhkosti - 5° náklon

| Ohřátá vlhkost [g] | |
|--------------------|--------------|
| 1. ohřev | 1,375 |
| 2. ohřev | 1,612 |
| 3. ohřev | 1,617 |
| 4. ohřev | 0,826 |
| Chlazení | 1,103 |

Tabulka 18 - Hodnoty ohřáté vlhkosti - 10° náklon

| Ohřátá vlhkost [g] | |
|--------------------|--------------|
| 1. ohřev | 1,004 |
| 2. ohřev | 1,362 |
| 3. ohřev | 0,186 |
| 4. ohřev | 0,165 |
| Chlazení | 1,302 |

6.5.3 Předpoklad kombinace ohřevu a odpaření

Tato kapitola předpokládá, že během přechodových jevů probíhají oba předchozí děje a to v poměru, že $\frac{1}{4}$ rozdílu výkonu plyne z odpaření dopadlé vlhkosti a $\frac{3}{4}$ z jejího ohřevu. Tuto bilanci můžeme vypočítat z předchozích dvou podkapitol, jelikož suma do kapek odvedené energie zůstává stejná. Použijeme tak následující rovnici:

$$\frac{1}{4} * m_{kap/odpa} + \frac{3}{4} * m_{kap/ohř} = m_{kombi}$$

(44)

Kde $m_{kap/odpa}$ značí odpařenou vlhkost v přechodovém ději a $m_{kap/ohř}$ značí ohřátou vlhkost v přechodovém ději. Výsledky shrnují následující tabulky:

Tabulka 19 - Hodnoty vlhkosti pro kombinaci odpar/ohřev – celkový ohřev

| Kombinovaná vlhkost [g] | |
|-------------------------|--------------|
| 1. ohřev | 0,816 |
| 2. ohřev | 3,165 |
| 3. ohřev | 2,182 |
| Chlazení | 1,429 |

Tabulka 20 - Hodnoty vlhkosti pro kombinaci odpar/ohřev – místní ohřev

| Kombinovaná vlhkost [g] | |
|-------------------------|--------------|
| 1. ohřev | 4,261 |
| 2. ohřev | 5,141 |
| 3. ohřev | 3,440 |
| Chlazení | 0 |

Tabulka 21 - Hodnoty vlhkosti pro kombinaci odpar/ohřev – 5°náklon

| Kombinovaná vlhkost [g] | |
|-------------------------|--------------|
| 1. ohřev | 1,036 |
| 2. ohřev | 1,218 |
| 3. ohřev | 1,229 |
| 4. ohřev | 0,626 |
| Chlazení | 0,843 |

Tabulka 22 - Hodnoty vlhkosti pro kombinaci odpar/ohřev – 10°náklon

| Kombinovaná vlhkost [g] | |
|-------------------------|--------------|
| 1. ohřev | 0,756 |
| 2. ohřev | 1,029 |
| 3. ohřev | 0,141 |
| 4. ohřev | 0,126 |
| Chlazení | 0,990 |

6.5.4 Porovnání s množstvím vlhkosti přivedené do tunelu

Z vypočtených množství dopadající vlhkosti a znalosti dávkování vody do kanálu (5ml/min nebo 2ml/min), jsme určili zachycené množství vody v procentech pro jednotlivé typy ohřevu:

Tabulka 23- Shrnutí vlhkosti zachycené na lopatce při celkovém ohřevu

| Průměrná vlhkost dopadající za jednu vteřinu [g/s] | | | | Dodávaná vlhkost [g/s] | Vlhkost zachycená [%] | | |
|--|---------|---------|---------|------------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| Přech. jev | Vypař. | Ohřev. | Kombi. | | Vypař. | Ohřev | Kombi |
| 1. ohřev | 0,00035 | 0,02643 | 0,01991 | 0,0831 | 0,43 | 31,81 | 23,96 |
| 2. ohřev | 0,0010 | 0,04813 | 0,03638 | 0,0831 | 1,32 | 57,94 | 43,78 |
| 3. ohřev | 0,00083 | 0,01874 | 0,01426 | 0,0831 | 0,99 | 22,56 | 17,17 |
| Chlazení | 0,00061 | 0,01964 | 0,01299 | 0,0831 | 0,73 | 23,64 | 15,63 |

Tabulka 24 - Shrnutí vlhkosti zachycené na lopatce při místním ohřevu

| Průměrná vlhkost dopadající za jednu vteřinu [g/s] | | | | Dodávaná vlhkost [g/s] | Vlhkost zachycená [%] | | |
|--|---------|---------|---------|------------------------|-----------------------|---------------|--------------|
| Přech. jev | Vypař. | Ohřev. | Kombi. | | Vypař. | Ohřev | Kombi |
| 1. ohřev | 0,00080 | 0,06987 | 0,05260 | 0,0831 | 0,96 | 84,10 | 63,32 |
| 2. ohřev | 0,00178 | 0,08508 | 0,06426 | 0,0831 | 2,15 | 102,41 | 77,34 |
| 3. ohřev | 0,00174 | 0,04670 | 0,03546 | 0,0831 | 2,10 | 56,21 | 42,68 |
| Chlazení | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,0831 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Tabulka 25 - Shrnutí vlhkosti zachycené na lopatce při 5°náklonu

| Průměrná vlhkost dopadající za jednu vteřinu [g/s] | | | | Dodávaná vlhkost [g/s] | Vlhkost zachycená [%] | | |
|--|--------|--------|--------|------------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| Přech. jev | Vypař. | Ohřev. | Kombi. | | Vypař. | Ohřev | Kombi |
| 1. ohřev | 0,0002 | 0,0149 | 0,0113 | 0,0332 | 0,62 | 44,98 | 33,89 |
| 2. ohřev | 0,0004 | 0,0187 | 0,0142 | 0,0332 | 1,31 | 56,39 | 42,62 |
| 3. ohřev | 0,0009 | 0,0225 | 0,0171 | 0,0332 | 2,70 | 67,59 | 51,37 |
| 4. ohřev | 0,0003 | 0,0097 | 0,0074 | 0,0332 | 1,01 | 29,23 | 22,18 |
| Chlazení | 0,0007 | 0,0115 | 0,0088 | 0,0332 | 1,97 | 34,56 | 26,41 |

Tabulka 26 - Shrnutí vlhkosti zachycené na lopatce při 10°náklonu

| Průměrná vlhkost dopadající za jednu vteřinu [g/s] | | | | Dodávaná vlhkost [g/s] | Vlhkost zachycená [%] | | |
|--|--------|--------|--------|------------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| Přech. jev | Vypař. | Ohřev. | Kombi. | | Vypař. | Ohřev | Kombi |
| 1. ohřev | 0,0002 | 0,0143 | 0,0108 | 0,0332 | 0,53 | 43,17 | 32,51 |
| 2. ohřev | 0,0003 | 0,0160 | 0,0121 | 0,0332 | 1,01 | 48,23 | 36,43 |
| 3. ohřev | 0,0001 | 0,0020 | 0,0015 | 0,0332 | 0,30 | 5,94 | 4,53 |
| 4. ohřev | 0,0001 | 0,0015 | 0,0012 | 0,0332 | 0,24 | 4,65 | 3,55 |
| Chlazení | 0,0013 | 0,0318 | 0,0241 | 0,0332 | 3,87 | 95,55 | 72,63 |

6.6 Diskuze výsledků

6.6.1 Diskuze přechodových součinitelů

V rámci předchozích kapitol byly analyzovány veličiny v rámci měření lopatky celkově ohřivané, lokálně ohřivané a celkově ohřivané v náklonu. Z naměřených dat byly analyzovány hodnoty porovnávacího součinitele přestupu tepla \tilde{K} . Zároveň byly na základě naměřených dat modelovány křivky přechodových dějů při skokové změně topného výkonu. Následně byly na jejich základě matematicky modelovány odpovídající přechodové křivky, aby bylo umožněno získat v dalších pracích ustálené hodnoty bez nutnosti zdlouhavého čekání na ustálení. V rámci toho modelování křivek byly hledány odpovídající hodnoty součinitele C, který reprezentuje ekvivalent porovnávacího součinitele plynoucího z naměřených dat. Mezi těmito dvěma součiniteli byla dovozena existence konstanty I, která zahrnuje při modelování zanedbané děje.

Z hodnot těchto součinitelů pro jednotlivá měření lze dovést, že vliv na hodnotu \tilde{K} má přivedená vlhkost, náklon lopatky a rychlost proudění. V případech suchého měření s jedním kompresorem a nulovým náklonem dosahuje při celkovém ohřevu průměrná absolutní hodnota součinitele $371,86 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, při dvou kompresorech $541 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ a při přívodu vlhkosti a dvěma kompresory $919,09 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Naproti tomu lopatka s místním ohřevem dosahuje při stejných měřeních hodnot $28,7 \frac{W}{m \cdot K}$, $25,6 \frac{W}{m \cdot K}$, a $19,65 \frac{W}{m \cdot K}$, kdy je nižší řád hodnot dán použitím délkového rozměru při výpočtu namísto plochy při celkovém ohřevu. Při měření s náklonem byly zjištěny průměrné hodnoty součinitele $861,95 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ pro suché měření se 2 kompresory a 5° náklonem, respektive $900,89 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

při přívodu vlhkosti. Pro 10° náklon a 2 kompresory $774,56 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ respektive $1003,73 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ při přívodu vlhkosti.

Průměrné absolutní hodnoty násobícího součinitele I pro celkový ohřev bez náklonu jsou: 539,45 ; 514,96 ; 475,00 ; při místním ohřevu vyšly pro I₁: 33,60 ; 27,09 ; 19,65 a I₂ 39,43 ; 56,69 ; 35,95. U těchto hodnot je důležité zmínit, že mohou být zatíženy jistou mírou chyby, jelikož nebylo možné pomocí použitého matematického modelu vždy dosáhnout optimálního tvaru křivky přechodového jevu, což lze vidět např. na Grafu 22. Při měření s náklonem bylo pak dosaženo hodnot I pro výše popsaná \tilde{K} 552,3 ; 589,9 ; 536,3 ; 749,5.

Za užitečné si lze z této práce též vzít informaci, že růst náběhového úhlu, přívod vlhkosti a zvýšení rychlosti obtékajícího proudu pravděpodobně vede ke zvýšení \tilde{K} .

6.6.2 Diskuze množství dopadlých kapek

V rámci této kapitoly byla snaha určit množství na lopatce zachycené vlhkosti, jelikož se jedná o hodnoty potenciálně využitelné pro budoucí části projektu. V rámci těchto kapitol byly modelovány celkem tři předpoklady, na jejichž základě bylo vyhodnoceno množství dopadlé vlhkosti na základě změny výkonu při přechodovém ději mezi suchým a vlhkým měřením. Jakožto nejvěrněji působící výsledky lze považovat výsledky pro kombinaci ohřevu a odpaření, jelikož výsledky plynoucí z předpokladu vypaření ukazují, že na lopatku vlhkost prakticky nedopadá, což není v souladu s pozorováním při měření. Stejně tak předpoklad ohřátí dopadlých kapek na teplotu lopatky ukazuje druhý extrém, kdy by na lopatku dopadla téměř všechna vlhkost, což též není v souladu s pozorováním.

Předpoklad obojího pak podává výsledky v souladu s pozorováním. V tomto předpokladu bylo dosaženo průměrného množství odpařené vlhkosti 25,14% při celkovém ohřevu bez náklonu, 48,84% při místním ohřevu, 35,29% při 5° náklonu a 29,93% při 10° náklonu. Z těchto výpočtů si lze vzít, že varianta místního ohřevu vychází, co se týče odpařené vlhkosti lépe, jelikož dochází dle propočtů k vyššímu odpaření a ohřátí dopadající vlhkosti.

6.7 Poznatky a nepřesnosti vnesené do měření

V rámci celé této práce bylo přistoupeno k různým zjednodušením a aproximacím, z nichž plynou různé stupně chyby pro výsledky. Tyto chyby byly vnašeny do práce ve

všech částech, zejména pak ve stádiu návrhu experimentu, jeho realizaci, při samotném měření a zpracování dat, vyhodnocení a analýze výsledků. Jejich analýza tak může přinést vhodná doporučení pro navazující projekty.

Nedokonalosti plynoucí z návrhu spočívají v návrhu samotného systému usazení lopatek. Jelikož není v rámci systému válcových desek řešeno, kvůli důrazu na jednoduchost a potřebu natáčení lopatek, utěsnění, dochází k odvodu vzduchu mimo měřící kanál. Z toho plynoucí chyba tak může ovlivňovat vypočtené hodnoty hmotnostních průtoků a rychlostí. Dále byla při návrhu topných výkonů vyvozena chyba při výpočtu přestupu tepla na lopatce náhradou za desku a při využití empirické rovnice, která může být zatížena chybou, což nicméně umožnilo podstatně zjednodušit návrhovou fázi. Další chyba plynoucí z návrhu spočívá ve využitých systémech pro celkový ohřev, kde vytvořený topný systém nevytváří po celé lopatce homogenní teplotní pole.

Nedokonalosti plynoucí z realizace experimentu plynou z již existujících konstrukcí v rámci experimentální tratě, kde při průtoku vzduchu kanálem nedochází ke homogennímu strhávání vlhkosti ze vtoku na dýzových blocích. Další chyba vzniká z realizace topného systému, kdy bylo ustoupeno z vyplňování spáry teplovodivým tmelem kvůli náhradě topných patron za odporový drát a ne zcela optimálním vlastnostem tmelu. Ze stejného důvodu tak bylo ustoupeno z vyplňování spáry pro termočlánky.

Nedokonalosti plynoucí ze zpracování dat vznikají jak z použitých výpočetních modelů, kdy použité vztahy nezachycují dokonale všechny děje vstupující do výpočtu a jsou zdrojem chyby, kdy vyšší přesnost výpočetních vztahů by vyžadovala řádově delší čas a využití komplikovaného výpočetního aparátu.

Modelová rovnice využitá pro modelování přechodových jevů tak vždy nepopisuje dokonale všechny přechodové jevy. Další chyby plynou také z průměrování naměřených hodnot z důvodu zmenšení množství dat nutných zpracovat. A dalších využitých průměrování v rámci výpočtů, jelikož proudové a teplotní pole nejsou homogenní.

6.8 Přesnost použitých čidel

V rámci provedeného experimentu byly využity různé druhy čidel pro odečet tlaku, teploty a nastavení dávkování vlhkosti do měřícího segmentu. Použitá čidla a jejich chyba jsou:

- termočlánky – T se zvýšenou přesností, ta dosahuje 0,5°C, respektive 0,4%;
- tlakový snímač řady PXM_309 s celkovou chybou 1%, jejichž hodnoty srovnány oproti hodnotě naměřené staničním barometrem;
- průtokový ultrazvukový snímač ES-FLOW s přesností 0,8%.

V rámci použitých měřidel nebyla provedena kalibrace, kromě srovnání hodnot z tlakových snímačů, jelikož kalibrace čidel přesahuje rozsah této práce.

7 Závěr

Tato práce se zabývala studií vyhřívaných rozváděcích lopatek pro omezení účinků erozního působení. Jejím cílem bylo v rešeršní části seznámit čtenáře s momentálním stavem poznání o erozi v nízkotlakých částech parních turbín. Druhý cíl teoretické části spočíval v rešerši možných opatření jejichž aplikace vede ke snížení vlhkosti v průtočné části parní turbíny.

V rešeršní části jsme sepsali pro lepší pochopení kontextu pojednání o parních elektrárnách a úloze parních turbín včetně jejich konstrukce. Následně byl vysvětlen mechanismus vzniku vodního filmu, sekundárních kapek a důsledky jejich erozního působení. V další části rešerše byly vysvětleny jednotlivé možnosti snižování vlhkosti v průtočných částech a erozního působení.

V rámci praktické části byly navrženy dva druhy lopatek s různými způsoby ohřevu. Jeden cílí na celkové ohřátí lopatky na nižší teplotu a druhý cílí na vyhřátí malé plochy na vyšší teplotu, nejlépe do oblasti výskytu Leidenfrostova jevu, a to včetně návrhu způsobu implementace těchto lopatek do již existujícího průtočného kanálu pomocí kruhových destiček. Poslední část se věnovala analýze a vyhodnocení dat naměřených při provedení navrženého experimentu. Toto vyhodnocení spočívalo v určení porovnávacího součinitele přestupu tepla, vymodelování matematické závislosti, která popisuje přechodové jevy při změně topného výkonu a určení množství vlhkosti dopadlé na lopatku. Otázky týkající se distribuce kapek v tunelu před a za lopatkou jsou nad rámec práce. Bylo tedy provedeno pouze zjednodušené vyhodnocení na základě předpokladů. Určení přesné distribuce je tak ponecháno pro pokračování projektu.

Následující práce mohou již použít informaci, že růst náběhového úhlu, dodávka vlhkosti a vyšší průtočná rychlost mohou vést k vyšším přestupovým součinitelům. Stejně tak, že koncentrace topného výkonu do menší plochy může vést k vyššímu množství odpařené vlhkosti.

Literatura

- [1] *ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČESKÉ REPUBLIKY ZA ROK 2022*. Praha: Energetický regulační úřad, 2022. Dostupné také z: <https://eru.gov.cz/rocn-zprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2022>
- [2] IBLER, Zdeněk. *Elektrárny I*. Plzeň: Ediční středisko VŠSE, 1984.
- [3] *UHELNÉ ELEKTRÁRNY SKUPINY ČEZ*. Online. Praha: ČEZ. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/data/web/vzdelavaci-program-cez/tiskoviny/uhelne-elektrany-skupiny-cez.pdf>. [cit. 2024-03-11].
- [4] HRDLIČKA, František; DLOUHÝ, Tomáš a KOLOVRATNÍK, Michal. *Průmyslová energetika*. Vyd. 2. přeprac. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02883-6.
- [5] KADRNOŽKA, Jaroslav a SKÁLA, Zdeněk. *Paroplynové elektrárny a teplárny*. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1981.
- [6] KRBEK, Jaroslav. *Tepelné turbíny a turbokompresory*. Brno: Ediční středisko Vysokého učení technického, 1983.
- [7] Ing. GÉBA, Josef. *Systémy ORC a jejich uplatnění v praxi*. Online. ENERGIE KOLEM NÁS. C2024. Dostupné z: <https://ekn.cz/>. [cit. 2024-03-11].
- [8] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné elektrárny a teplárny*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1984.
- [9] NOŽIČKA, Jiří a České vysoké učení technické v Praze. *Fakulta strojní. Základy termomechaniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [10] *Tepelná bilance parní turbíny a návrh VTO: Steam Turbine Thermal Balance and Proposal of High Pressure Feedwater Heater*. Ostrava, 2019. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky. Vedoucí práce Ing. Radim Janalík, CSc.
- [11] SKOPAL, Vlastimil; ADÁMEK, Jindřich a KRATOCHVÍL, Jaroslav. *Stroje a zařízení pro studijní obory Provozní schopnost výrobních zařízení a automatizační technika*. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1986.

- [12] AMBROŽ, Jaroslav. *Parní turbíny: Konstrukce, regulace a provoz parních turbin: Konstrukce, regulace a provoz parních turbin*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956.
- [13] FOURNIER, Moe a GRANT, Bryan. *STEAM TURBINE PRIMER: Diaphragm repair strategies*. Online. COMBINED CYCLE JOURNAL. Dostupné z: <https://www.ccj-online.com/steam-turbine-primer-diaphragm-repair-strategies/>. [cit. 2024-02-25].
- [14] *Siemens expands open cycle power plant in Kuwait with steam turbine*. Online. In: SIEMENS. c1996-2024. Dostupné z: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-expands-open-cycle-power-plant-kuwait-steam-turbine>. [cit. 2024-02-25].
- [15] ŠČEGLJAJEV, Andrej Vladimirovič a B. M. TROJANOVSKÝ. *Parní turbíny: teorie tepelného děje a konstrukce turbín: teorie tepelného děje a konstrukce turbín*. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1983.
- [16] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Parní turbíny a kondenzace*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, 1986.
- [17] PETR, Kovařík. *Termomechanika*. Online. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Domovské stránky uživatelů. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~kovarikp/termomechanika.html>. [cit. 2024-03-10].
- [18] RUML, Zdeněk. *Eroze lopatkových materiálů parních turbín*. Plzeň, 1983. Disertační práce. Vysoká škola strojní a elektrotechnická v Plzni, Fakulta strojní. Vedoucí práce Prof. Ing. Luděk BĚLÍK, DrSc.
- [19] ŠŤASTNÝ, Miroslav a Karel PEKÁREK. Losses connected with steam condensation in turbine cascades. AIP Conference Proceedings [online]. 2018, 17(2047) [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: doi:10.1063/1.5081655
- [20] CHAPLIN, R.A. *Thermal Power Plants*. 3. UK: UNESCO-EOLSS, 366 s. ISBN 978-1-84826-928-6. Dostupné také z: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c08/e3-10-03-05.pdf>
- [21] MCGOVERN, Joseph, Andrzej MAMCZURA, Alexander MCMURRAY a Dillon WHITEHOUSE. *INVESTIGATING THE EFFECT OF RIBLETS ON TRANSONIC FLUID FLOW THROUGH A CHANNEL USING NUMERICAL AND EMPIRICAL*

METHODS. Praha, 2022, 184 s. Course thesis. České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav mechaniky a letadlové techniky Vedoucí práce Ondřej Bartoš.

[22] SYNÁČ, Jaroslav, Bartoloměj RUDAS a Martin LUXA. Erosion of steam turbine last stages. *AIP Conference Proceedings*. 2021, 2323(1), 060008. ISSN 0094-243X. Dostupné z: doi:10.1063/5.0042949

[23] MARTÍNEZ, Aldo Antonio Rueda; MARTÍNEZ, Fernando Rueda; VELÁZQUEZ, Miguel Toledo; SILVA, Florencio Sánchez; MARISCAL, Ignacio Carvajal et al. The Density and Momentum Distributions of 2-Dimensional Transonic Flow in an LP-Steam Turbine. Online. *Energy and Power Engineering*. 2012, roč. 04, č. 05, s. 365-371. ISSN 1949-243X. Dostupné z: <https://doi.org/10.4236/epe.2012.45048>. [cit. 2024-02-25].

[24] MARZBALI, Mason; YEGANEHDOUST, Firoozeh; IBRAHIM, Mohamed; TARASI, Fariba a JADIDI, Mehdi. Liquid–Solid Impact Mechanism, Liquid Impingement Erosion, and Erosion-Resistant Surface Engineering: A Review. Online. *Coatings*. 2023, roč. 13, č. 3. ISSN 2079-6412. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/coatings13030577>. [cit. 2024-02-25].

[25] GRIBIN, Vladimir a kol. Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT). USA: ASME, 2014. V01BT27A050. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1115/GT2014-27118>

[26] XU, Liang, Peigang YAN, Hongyan HUANG a Wanjin HAN. Effects of hot steam injection from the slot at the trailing edge on turbine nozzle vane flow field. *Journal of Thermal Science*. 2008, 17(4), 298-304. ISSN 1993-033X. Dostupné z: doi:10.1007/s11630-008-0298-0

[27] LIAG, Li a Wu XIAOMING. Effects of location, shape and width of a suction slot on the water removal performance of a hollow stator blade. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* [online]. September 15, 2017, 58(232), 466-477 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: doi:10.1177/0957650917731398

[28] HOZNEDL, Michal a Jindřich BÉM. Steam turbine flow path drainage system under different operating conditions. *MATEC web of conferences*. EDP Sciences, 2022, 367(Journal Article), 10. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/matecconf/202236700010

- [29] AKHTAR, MS, J BLACK a MJC SWAINSTON. Prevention of steam turbine blade erosion using stator blade heating. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 1977, **191**(1), 355-361. ISSN 0020-3483.
- [30] KONEČNÝ, Pavel. Leidenfrostův jev. Brno: Masarykova univerzita, 2016. s. 123-127. ISBN 978-80-210-8465-0
- [31] MAURICE STEWART, Ken Arnold. *Gas-Liquid and Liquid-Liquid Separators*. 1. San Diego: Elsevier, 2008. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8979-3.X0001-3>.
- [32] *Mesh Mist Eliminators*. Online. AMACS: PROCESS TOWER INTERNALS. c2024. Dostupné z: <https://amacs.com/mist-eliminators/knitted-wire/>. [cit. 2024-03-25].
- [33] KENNAMETAL INC. *The Stellite Family of Alloys*. Online. KENNAMETAL INC. KENNAMETAL STELLITE. c2024. Dostupné z: <https://www.stellite.com/us/en/alloys/stellite.html>. [cit. 2024-05-05].
- [34] *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. Online. 2004, č. 41. Japan: Mitsubishi Heavy Industries, 2004. Dostupné z: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e413/e413162.pdf>. [cit. 2024-03-25].
- [35] *NACA 4 digit airfoil generator*. Online. Airfoil Tools. C2024. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>. [cit. 2024-04-19].
- [36] WANG, X.; BIBEAU, E. a NATERER, G.F. Experimental correlation of forced convection heat transfer from a NACA airfoil. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2007, roč. 31, č. 8, s. 1073-1082. ISSN 0894-1777. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.11.008>.
- [37] ŠESTÁK, Jiří; BUKOVSKÝ, Jaromír; HOUŠKA, Milan a FAKULTA, České vysoké učení technické v Praze. Strojní. *Tepelné pochody: transportní a termodynamická data: transportní a termodynamická data*. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1986.
- [38] ŠESTÁK, Jiří a RIEGER, František. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Praha: ČVUT, 1993.
- [39] BERNARDIN, J. D. a MUDAWAR, I. The Leidenfrost Point: Experimental Study and Assessment of Existing Models. Online. *Journal of Heat Transfer*. 1999, roč. 121, č. 4, s. 894-903. ISSN 0022-1481. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.2826080>. [cit. 2023-10-03].
- [40] WALKER, Jearl. Boiling and the Leidenfrost effect. *Fundamentals of physics*, 2010, E10-1.

[41] TRAN, Tuan; STAAT, Hendrik J. J.; PROSPERETTI, Andrea; SUN, Chao a LOHSE, Detlef. Drop impact on superheated surfaces. *Physical review letters*. 2012, roč. 108, č. Journal Article, s. 036101-036101. ISSN 0031-9007. Dostupné z: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.036101>.

[42] GOTTFRIED, B.S.; LEE, C.J. a BELL, K.J. The leidenfrost phenomenon: film boiling of liquid droplets on a flat plate. Online. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1966, roč. 9, č. 11, s. 1167-1188. ISSN 00179310. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(66\)90112-8](https://doi.org/10.1016/0017-9310(66)90112-8). [cit. 2023-10-03].

Seznam obrázků

Obrázek 1 - T-s diagram stavových změn v R-C oběhu [9]

Obrázek 2 - Okruh R-C oběhu s chladícím okruhem [10]

Obrázek 3 - Ukázka usazení lopatek v mezistěnách [13] (UPRAVENO)

Obrázek 4 - Ukázka usazení lopatek do nosiče lopatek [14] (UPRAVENO)

Obrázek 5 - Diagram T-s vody a vodní páry [17]

Obrázek 6 - Ukázka erozního poškození lopatek [23]

Obrázek 7 - Typický průběh křivky erozního poškození [24]

Obrázek 8 - Vertikální gravitační separátor vlhkosti [31]

Obrázek 9 – Síťový separátor vlhkosti [32]

Obrázek 10 - Baumannův stupeň [15] (UPRAVENO)

Obrázek 11 - Posuv expanzní čáry při přehřívání páry [9]

Obrázek 12 - Lopatka se stelitovou vrstvou [34]

Obrázek 13 - Měřicí trať ke studiu vodních disperzí

Obrázek 14 - Měřicí kanál před úpravami

Obrázek 15 - Základní tvar modelu lopatky

Obrázek 16 - Základní tvar modelu profilu se zanesenými geometrickými charakteristikami

Obrázek 17 - Vizualizace celkového ohřevu - celkový pohled

Obrázek 18 - Vizualizace celkového ohřevu - poloviční řez

Obrázek 19 - Náhled části výrobního výkresu modelu experimentální lopatky - celkový ohřev

Obrázek 20 - Vizualizace lokálního ohřevu - celkový pohled

Obrázek 21 - Vizualizace lokálního ohřevu - poloviční řez

Obrázek 22- Náhled výrobního výkresu experimentální lopatky - lokální ohřev

Obrázek 23 - Kruhová deska - pohled A

Obrázek 24 - Kruhová deska - pohled B

Obrázek 25 - Svírací víčko - pohled A

Obrázek 26 - Svírací víčko - pohled B

Obrázek 27 – Vizualizace upraveného průtočného kanálu - čelní pohled

Obrázek 28 – Vizualizace upraveného průtočného kanálu - boční pohled

Obrázek 29 – Vizualizace zapojení měření trati a regulace

Obrázek 30 - Realizace kruhové desky držící lopatku

Obrázek 31 - Realizace Lopatky pro místní ohřev – pohled A

Obrázek 32 - Realizace Lopatky pro místní ohřev – pohled B

Obrázek 33 - Realizace lopatky pro celkový ohřev – pohled A

Obrázek 34 - Realizace lopatky pro celkový ohřev – pohled B

Obrázek 35 – Lícování lopatky v deskách

Obrázek 36 - Upravená podoba měřicího tunelu

Obrázek 37 - Výsledná podoba systému pro celkový ohřev

Obrázek 38 - Výsledná podoba lopatky pro celkový ohřev s vloženým systémem

Obrázek 39 - Výsledná podoba lopatky pro místní ohřev

Seznam grafů

- Graf 1 - Závislost životnosti lopatek na vytvořeném měrném tlaku (data převzata z [12])
- Graf 2 – Ilustrační průběh rychlosti v průtočném kanále – 1 kompresor
- Graf 3 – Ilustrační průběh rychlostí v průtočném kanále – 2 kompresory
- Graf 4 – Ilustrační průběh porovnávacího součinitele přestupu
- Graf 5 – Společný průběh hodnot porovnávacího součinitele přestupu – celkový ohřev
- Graf 6 - Společný průběh hodnot porovnávacího součinitel přestupu – místní ohřev
- Graf 7 - Společná závislost porovnávacího součinitele přestupu na Re – místní ohřev
- Graf 8 – Společné průběhy vybraných porovnávacích součinitelů přestupu v závislosti na náklonu
- Graf 9 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu - suché
- Graf 10 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při chlazení - suché
- Graf 11 - Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu - vlhké
- Graf 12 - Závislost součinitele C na topném výkonu – celkový ohřev
- Graf 13 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu - suché
- Graf 14 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při chlazení - suché
- Graf 15 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu - vlhké
- Graf 16 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při chlazení - vlhké
- Graf 17 - Závislost součinitele C_1 na topném výkonu – místní ohřev
- Graf 18 - Závislost součinitele C_2 na topném výkonu – místní ohřev
- Graf 19 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu v náklonu
- Graf 20 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při chlazení v náklonu
- Graf 21 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu v náklonu
- Graf 22 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při chlazení v náklonu
- Graf 23 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu v náklonu
- Graf 24 – Ilustrační průběh reálného a modelovaného děje při ohřevu v náklonu
- Graf 25 - Závislost součinitele C na topném výkonu – celkový ohřev s náklonem

Seznam tabulek

- Tabulka 1 - Životnost lopatek dle vyvinutého měrného tlaku [12]
- Tabulka 2 - Rozbor standardizovaného profilu NACA
- Tabulka 3 – Základní geometrické charakteristiky modelu lopatky
- Tabulka 4 - Vypočtené výkony pro ohřev
- Tabulka 5 - Dosažené hodnoty porovnávacího součinitele – celkový ohřev
- Tabulka 6 - Dosažené hodnoty porovnávacího součinitele – místní ohřev
- Tabulka 7 - Dosažené hodnoty porovnávacího součinitele - měření s náklonem lopatky
- Tabulka 8 - Shrnutí násobící konstanty mezi součiniteli při celkovém ohřevu
- Tabulka 9 - Shrnutí násobící konstanty mezi součiniteli při lokálním ohřevu pro Leidenfrostův jev
- Tabulka 10 - Shrnutí násobící konstanty mezi součiniteli při celkovém ohřevu s náklonem
- Tabulka 11 - Hodnoty odpařené vlhkosti – celkový ohřev
- Tabulka 12 - Hodnoty odpařené vlhkosti – místní ohřev
- Tabulka 13 - Hodnoty odpařené vlhkosti - 5° náklon
- Tabulka 14 - Hodnoty odpařené vlhkosti - 10° náklon
- Tabulka 15 - Hodnoty ohřáté vlhkosti – celkový ohřev
- Tabulka 16 - Hodnoty ohřáté vlhkosti – místní ohřev
- Tabulka 17 - Hodnoty ohřáté vlhkosti - 5° náklon
- Tabulka 18 - Hodnoty ohřáté vlhkosti - 10° náklon
- Tabulka 19 - Hodnoty vlhkosti pro kombinaci odpar/ohřev – celkový ohřev
- Tabulka 20 - Hodnoty vlhkosti pro kombinaci odpar/ohřev – místní ohřev
- Tabulka 21 - Hodnoty vlhkosti pro kombinaci odpar/ohřev – 5° náklon
- Tabulka 22 - Hodnoty vlhkosti pro kombinaci odpar/ohřev – 10° náklon
- Tabulka 23 - Shrnutí vlhkosti zachycené na lopatce při celkovém ohřevu
- Tabulka 24 - Shrnutí vlhkosti zachycené na lopatce při místním ohřevu
- Tabulka 25 - Shrnutí vlhkosti zachycené na lopatce při 5° náklonu
- Tabulka 26 - Shrnutí vlhkosti zachycené na lopatce při 10° náklonu

Seznam příloh

Příloha 1 – Model kruhové desky

Příloha 2 – Výrobní výkres kruhové desky

Příloha 3 – Výpočetní excely k měření celkové ohřevu

Příloha 4 – Výpočetní excely k měření místního ohřevu

Příloha 5 – Výpočetní excely k měření při náklonu

Příloha 6 – Výpočetní excely k vyhodnocení množství dopadlých kapek

Příloha 7 – Výrobní výkres lopatky NACA0010 pro celkový ohřev

Příloha 8 – Výrobní výkres lopatky NACA0010 pro místní ohřev

Příloha 9 – Model lopatky pro celkový ohřev

Příloha 10 – Model lopatky pro místní ohřev

Příloha 11 - Model upraveného kanálu