



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## VÝPOČET VLASTNOSTÍ SPALIN

CALCULATION OF FLUE GAS PROPERTIES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristýna Štenclová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2019



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	<b>Kristýna Štenclová</b>
Studijní program:	Strojirenství
Studijní obor:	Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Výpočet vlastností spalin

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci práce bude zpracován výpočtový postup pro stanovení vlastností (hustota, entalpie, výhřevnost, kinematická viskozita, tepelná kapacita, ...) spalin různého složení. Výpočtový nástroj bude vytvořen v prostředí MS Excel s využitím dostupných charakteristických polynomů. Získány budou závislosti sledovaných veličin na teplotě a tlaku. Výsledky budou prezentovány formou grafů a využity pro ukázkové posouzení vlivu jednotlivých parametrů na přestup tepla ve výměníku tepla.

### Cíle bakalářské práce:

- 1) Zpracovat výpočtový postup vlastností spalin v MS Excel.
- 2) Graficky prezentovat získané závislosti.
- 3) Prezentovat vliv přesných parametrů spalin na přenášený tepelný výkon konkrétního výměníku.

### Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

KANDLIKAR, S., Masahiro, S. a DHIR, V., Handbook of phase change: boiling and condensation. Philadelphia, PA: Taylor, xvii, 738 p., 1999. ISBN 15-603-2634-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi spalín v závislosti na teplotě. První část je teoretická, uvádí základní pojmy spojené se spalováním. Druhá část obsahuje rešerši. Je zaměřena na prvkový rozbor paliva a základní vlastnosti spalín, tj. měrná tepelná kapacita, hustota, entalpie, tepelná vodivost, kinematická viskozita a Prandtlovo číslo. V poslední části práce je uveden konkrétní případ výměníku a jeho výpočet na základě čtyř různých vstupních údajů těchto vlastností.

### **Klíčová slova**

Spalování, prvkový rozbor paliva, měrná tepelná kapacita, entalpie, tepelná vodivost, kinematická viskozita, Prandtlovo číslo

## **ABSTRACT**

This Bachelor's thesis deals with properties of combustion products depending on temperature. The first part is theoretical and includes summary of basic terms of combustion. The second part includes a recherche. It is focused on elementary analysis of fuel and basic properties of combustion products, i.e. heat capacity, density, enthalpy, heat conductivity, kinematic viscosity and number of Prandtl. In the last part of thesis, there is an example of a specific exchanger and his solving based on four various inputs of these properties.

### **Key words**

Combustion, elementary analysis of fuel, heat capacity, enthalpy, heat conductivity, kinematic viscosity, number of Prandtl

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠTENCLOVÁ, Kristýna. *Výpočet vlastností spalin* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117312>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Výpočet vlastností spalin** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 20. 5. 2019

-----  
Kristýna Štenclová

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

## OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Palivo.....	12
1.1 Rozdělení paliv .....	12
1.1.1 Tuhá paliva.....	12
1.1.2 Kapalná paliva.....	13
1.1.3 Plynná paliva.....	13
2 Spalování .....	14
2.1 Dokonalé spalování.....	14
2.2 Nedokonalé spalování.....	14
2.3 Příprava paliva před spalováním.....	15
2.3.1 Příprava tuhého paliva.....	15
2.3.2 Příprava kapalného paliva .....	15
2.3.3 Příprava plynného paliva.....	15
3 Spaliny.....	16
3.1 Objemové složení paliva z prvkového rozboru .....	16
3.2 Objemové složení paliva z hrubého rozboru paliva.....	18
3.2.1 Tuhá paliva.....	18
3.2.2 Kapalná paliva.....	18
3.3 Vlastnosti spalin.....	19
3.3.1 Výhřevnost .....	19
3.3.2 Hustota .....	20
3.3.3 Měrná tepelná kapacita.....	21
3.3.4 Entalpie.....	23
3.3.5 Tepelná vodivost, kinematická viskozita, Prandtlovo číslo.....	27
4 Výpočet přehříváku páry .....	31
4.1 Zadání .....	31
4.2 Výpočet součinitele přestupu tepla .....	33
4.3 Výpočet výstupních hodnot .....	37
4.4 Shrnutí.....	40
4.5 Výpočet tlakové ztráty .....	41
ZÁVĚR.....	43
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	44
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	45
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	47
SEZNAM TABULEK .....	48
SEZNAM PŘÍLOH .....	49



## ÚVOD

Pro spalovací proces je důležité znát vlastnosti spalin, protože spaliny jsou nositeli tepla. Jejich vlastnosti, zejména tepelná kapacita, kinematická viskozita, tepelná vodivost a Prandtlovo číslo, ovlivňují průběh spalování a konečnou teplotu. Proto je zapotřebí se jimi zabývat. Otázkou je, v jakém rozsahu. Pro výpočet výměníku se ve většině případů používají hodnoty vlastností spalin určené pro jejich střední teplotu. Reálně se teplota i vlastnosti médií mění průběžně a od střední hodnoty se mohou značně odchylovat. Ale nemění se pouze vlastnosti a teplota, ale na základě těchto parametrů i přestup tepla, prostup tepla i teplo samotné. Proto je důležité vzít v úvahu, nakolik může být výsledek ovlivněn použitím pouze jedné hodnoty vlastností během celého výpočtu.

První část práce je teoretická. Jejím účelem je obeznámení se základními pojmy týkajícími se spalování. Druhá část sestává ze zpracované rešerše zaměřené na prvkový rozbor paliva a vlastnosti spalin, konkrétně na hustotu, entalpii, měrnou tepelnou kapacitu, tepelnou vodivost, kinematickou viskozitu a Prandtlovo číslo. Na základě literatury byly zpracovány grafy závislostí většiny zmíněných vlastností na teplotě a zjištěny polynomy těchto vlastností na základě konkrétní teploty. Poslední částí této bakalářské práce je výpočet výměníku, konkrétně přehříváku páry. Ze zadaných parametrů byly dopočítány teploty a rychlosti proudění médií na konci výměníku. Vlastnosti spalin byly počítány ze zjištěných závislostí z druhé části práce a vlastnosti páry byly dohledány pomocí programu X-Steam. Byly provedeny čtyři varianty výpočtu. Nejdříve byl zpracován postup pro případ, že jsou známy střední hodnoty vlastností médií. Ve druhém případě byly známy vstupní parametry médií, ve třetím jejich výstupní parametry. Nakonec byl zpracován detailní výpočet, kde byly vlastnosti dopočítány pro každý decimetr délky výměníku.

Na závěr práce jsou jednotlivé metody porovnány. Veškeré výpočty a závislosti z druhé a třetí části této práce byly zpracovány v programu MS Excel.

## 1 Palivo

### 1.1 Rozdělení paliv

Základní rozdělení paliv:

- tuhá paliva,
- kapalná paliva,
- plynná paliva.

Paliva lze také rozlišovat na základě jejich původu na [1]:

- fosilní – neobnovitelné (těžené palivo), např. uhlí, ropa, zemní plyn,
- obnovitelné – biomasa,
- odpadní – vzniklá jako vedlejší produkt lidské činnosti.

#### 1.1.1 Tuhá paliva

Tuhá paliva obsahují uhlík, vodík, kyslík a malé množství síry, dusíku a vody. Nevýhodou těchto paliv je vznik velkého množství popela, sazí a prachových částic během spalování. Patří sem zejména černé a hnědé uhlí, nadále např. dřevo, biomasa, koks, odpady atd. [1] [10]

Složení tuhého paliva lze určit hrubým rozbořem nebo elementárním obsahem hořlaviny. Určení složení paliva pomocí elementárního obsahu hořlaviny se stanoví z poměrného obsahu prvků hořlaviny. [1]

Hrubý rozbor spočívá v určení množství tří základních složek paliva [1] [4]:

- hořlaviny ( $h$ ) – organické látky tvořené prvky C, H, S, N, O; hořlavina se dále dělí na prchavou hořlavinu a tuhý zbytek (koks); prchavá hořlavina se z paliva začíná uvolňovat při nižších teplotách; tuhý zbytek je tvořen čistým uhlíkem,
- popeloviny ( $A$ ) – minerální příměsi,
- vody ( $W$ ).

Platí [4]:

$$h + A + W = 100 [\%] \quad 1.1$$

$h$	[%]	poměrný obsah hořlaviny v palivu,
$A$	[%]	poměrný obsah popeloviny v palivu,
$W$	[%]	poměrný obsah vody v palivu.

Palivo může být zadáváno v různě definovaných stavech [4]:

- hořlavina (stav bez vody a popela) s označením  $daf$ ,
- hořlavina a popelovina (bezvodý stav) s označením  $d$ ,
- hořlavina, popelovina a voda (původní stav) s označením  $r$ .



Z hlediska spalování je nejdůležitější stav paliva před přípravou pro spalování (původní stav). Ostatní stavy jsou vhodné např. pro laboratorní rozbor vzorku paliva. [4]

Základní vlastnosti:

spalné teplo, výhřevnost, zrnění paliva, melitelnost, tvrdost, sypaná hmotnost, měrná hmotnost, abrazivita popele, spékavost uhlí, horní a dolní mez výbušnosti, obsah síry v palivu apod. [1]

### 1.1.2 Kapalná paliva

V kapalném palivu převládá hořlavina. Obsah vody a popelovin je zanedbatelný (do 1 %). Složení zůstává prakticky neměnné, proto se ve většině případů uvádí pro původní stav. [1] [4]

Hlavní surovinou pro výrobu kapalných paliv je ropa. Ropa je směsí chemických sloučenin tvořených uhlíkem (84-87 %), vodíkem (11-14 %), sírou (do 4 %), dusíkem (do 1 %), kyslíkem (do 1 %) a řadou stopových prvků. Dále se ke spalování využívají různé kapalné odpady. [1] [3]

Tato paliva se dělí na [1]:

- lehké topné oleje (LTO),
- extralehké topné oleje (ELTO),
- těžké topné oleje (TTO, mazut).

Základní vlastnosti kapalných paliv:

spalné teplo, výhřevnost, měrná hmotnost, teplota tuhnutí, tečení, vzplanutí, hoření, samovznícení, kinematická viskozita, povrchové napětí apod. [1]

### 1.1.3 Plynná paliva

Plynná paliva jsou směsí spalitelných plynných složek ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ) a nehořlavých plynů jako např.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{SO}_2$ , vodní pára atd. Složení plynných paliv se nedělí na hořlavinu, popelovinu a vodu jako v případě tuhých a kapalných paliv, ale uvádí se výčtem všech obsažených plynů.

Nejvyužívanějším palivem je zemní plyn, jenž obsahuje zejména metan ( $\text{CH}_4$ ). Mezi další častá plynná paliva patří např. koksárenský plyn, vodní plyn, vysokopecní plyn, bioplyn atd. [1] [4] [10]

Plynná paliva se dělí na [1]:

- nízko výhřevné:  $Q_i^r = \text{do } 8,35 \frac{\text{MJ}}{\text{m}_n^3}$ ,
- středně výhřevné:  $Q_i^r = 8,35 \div 12,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}_n^3}$ ,
- velmi výhřevné:  $Q_i^r = 12,5 \div 21,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}_n^3}$ ,
- velmi vysoce výhřevné:  $Q_i^r = \text{nad } 21,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}_n^3}$ .

Základní vlastnosti:

spalné teplo, výhřevnost, měrná hmotnost, střední měrná tepelná kapacita, horní a dolní mez výbušnosti, obsah nečistot v plynu, relativní vlhkost plynu, hutnota plynu, tlak plynu, charakteristické teploty (zápalná teplota, teplota hoření), rychlost šíření plamene, záměnnost plynu. [1]

## 2 Spalování

Spalování je fyzikálně chemický děj s uvolňováním tepla. Jedná se o oxidaci paliva až na konečné produkty reakce.

Rozlišují se reakce exotermické, během nichž se teplo uvolňuje, a endotermické, které teplo spotřebovávají.

Pracovní látky:

- palivo – hořlavá látka s dostatečnou výhřevností,
- oxidant – látka obsahující kyslík (nejčastěji vzduch); palivo a oxidant tvoří vstupní látky spalovacího procesu,
- produkty – vznikají jako výsledek chemické reakce mezi palivem a oxidantem; jedná se o plynné spaliny (obsahují popílek, tuhý úlet) a tuhý nebo kapalný zbytek (škvára, struska) po spalování. [1]

### 2.1 Dokonalé spalování

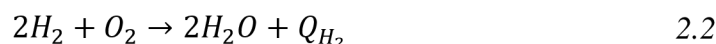
Při dokonalém spalování dochází k oxidaci uhlíku, vodíku, dusíku a síry na jejich oxidy ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ). [1]

Základní rovnice dokonalého spalování [1]:

- Spalování uhlíku na oxid uhličitý



- Spalování vodíku na vodní páru



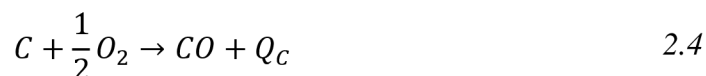
- Spalování síry na oxid siřičitý



### 2.2 Nedokonalé spalování

Při nedokonalém spalování nedochází k oxidaci paliva až na konečné produkty, ale v důsledku nedostatku kyslíku vznikají produkty (např.  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ,  $\text{H}_2$ ) obsahující hořlavé složky.

Základní stechiometrický vztah pro nedokonalé spalování:



Při nedokonalém spalování uhlíku dodává reakce pouze 1/3 možné energie a spotřebuje se polovina objemu  $\text{O}_2$ . [1]

## **2.3 Příprava paliva před spalováním**

### **2.3.1 Příprava tuhého paliva**

U přípravy tuhého paliva jde především o úpravu velikosti částic s ohledem na způsob jeho spalování. Případně se palivo suší. Příprava tuhého paliva probíhá v místě těžby, v místě spotřeby (na skládce) a v kotelně. V místě těžby dochází k drcení velkých kusů uhlí, oddělování hlušiny a třídění podle velikosti zrn na jednotlivé frakce soustavou sít. Nejjednodušší příprava tuhých paliv v místě spotřeby je u roštových ohnišť, kdy dochází maximálně k předsoušení velmi mokrého uhlí nebo naopak k vlhčení spékavého uhlí. Složitější je příprava paliv pro ohniště prášková, kdy se palivo mele, suší, třídí na určitou jemnost, odlučuje od nosného média, uskladňuje v zásobnících atd. Sušicím médiem může být horký vzduch přiváděný z ohříváku vzduchu nebo spaliny odebírané obvykle ze spalovací komory. Na volbu vhodného sušícího média má vliv druh paliva, obsah vlhkosti a typ mlecího okruhu. Zároveň nesmí být překročeny ani podkročeny určité mezní teploty media před a za mlýnem. Zařízení sloužící k přípravě uhelného prášku se nazývá mlecí okruh a je umístěno přímo v kotelně. [4] [9]

### **2.3.2 Příprava kapalného paliva**

Většina kapalných paliv má za normálních podmínek vysokou viskozitu, která neumožňuje dobré rozprašení hořáku. Topné oleje je nutno ohřívát, aby se viskozita snížila na požadovanou hodnotu. Příprava kapalného paliva probíhá v palivovém hospodářství kotle skládajícím se zejména z přečerpávacího zařízení, ohřívání (kvůli dosažení patřičné viskozity), uskladňování a transportu. Palivové hospodářství kotlů na topné oleje se skládá z vnějšího a vnitřního hospodářství. Vnitřní hospodářství sestává ze stáčecí stanice s čerpadly a parním ohřevem. Vnitřní hospodářství je umístěno v kotelně, kde začíná nádrží, v dalším přívodním potrubí je umístěn parní ohřívák, filtry, čerpadlo, regulační ventil, hořáky a měřiče. [4]

### **2.3.3 Příprava plynného paliva**

Plynná paliva jsou paliva vyžadující nejjednodušší přípravu. Je-li zapotřebí palivo vůbec připravit, pak dochází pouze k redukci tlaku, odstranění pevných nečistot a vlhkosti, případně se ohřejí plyny s nízkou výhřevností. Vzhledem k tomu, že měrné hmotnosti plynného paliva a vzduchu jsou přibližně stejné, není při vytváření hořlavé směsi problém s míšením paliva se spalovacím vzduchem. [9]

### 3 Spaliny

Spaliny jsou plynné produkty tvořící se v průběhu spalovacího procesu. Složení spalín je závislé na druhu paliva a na spalovacích podmínkách. Hlavní složkou spalín je dusík ( $N_2$ ), dále pak oxid uhličitý ( $CO_2$ ), vodní pára, kyslík ( $O_2$ ), oxid uhelnatý ( $CO$ ), oxidy dusíku ( $NO_x$ ), oxid siřičitý ( $SO_2$ ), sulfan ( $H_2S$ ), uhlovodíky ( $C_xH_y$ ), kyanovodík ( $HCN$ ), amoniak ( $NH_3$ ), halogenovodíky, pevné částice (prach, saze). [10]

#### 3.1 Objemové složení paliva z prvkového rozboru

Pro optimální a ekonomický provoz spalovacího zařízení je důležité znát složení paliva. Větší podíl nespalitelných složek v palivu snižuje výhřevnost i spalné teplo a zvyšuje spotřebu energie na odpaření vody ze spalín. Síra v palivu oxiduje na  $SO_2$  a  $SO_3$ , které při teplotě pod rosným bodem vytvářejí kyseliny siřičitou a sírovou, které mohou zapříčinit korozi. [10]

Díky známému objemovému složení je možné blíže určit různé vlastnosti paliva. Objemové složení se uvádí v  $m^3/kg$ . Tato bakalářská práce se bude věnovat zejména tuhým a kapalným palivům.

U vztahů pro určení množství, které budou následovat, se vychází ze známého objemového složení suchého vzduchu, které je uvedeno v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1 Objemové složení suchého vzduchu [4]

Složka	Objemový podíl [-]
Kyslík	0,2100
Dusík	0,7805
Argon (včetně vzácných plynů)	0,0092
Oxid uhličitý	0,0003

Minimální množství kyslíku ke spálení 1 kg paliva se určí ze vztahu [2]:

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O_2^r}{32} \right) \quad 3.1$$

$H_2^r, O_2^r, C^r, S^r$  [%] obsah jednotlivých složek v surovém stavu

Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg paliva [2]:

$$O_{VZ \min}^S = \frac{100}{21} \cdot O_{O_2 \min} \quad 3.2$$

Množství  $CO_2$  ve spalínách [2]:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{VZ \min}^S \quad 3.3$$

Množství SO<sub>2</sub> ve spalínách [2]:

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S^r}{32,06} \quad 3.4$$

Množství dusíku [2]:

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{VZmin}^S \quad 3.5$$

Množství argonu [2]:

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VZmin}^S \quad 3.6$$

Dokonalým spálením paliva při minimálním množství vzduchu, tj. bez přebytku vzduchu ( $\alpha=1$ ), vznikne minimální množství suchých spalín [2]:

$$O_{sp\ min}^S = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad 3.7$$

Minimální množství vlhkého vzduchu [2]:

$$O_{VZ\ min}^V = f \cdot O_{VZ\ min}^S \quad 3.8$$

$f$  [-] součinitel vlhkosti vzduchu.

Obvykle se volí  $f = 1,016$  odpovídající teplotě vzduchu 20 °C a relativní vlhkosti  $\varphi=70$  %. [1]

Množství vodní páry v tomto objemu [4]:

$$O_{H_2O}^v = O_{VZ\ min}^V - O_{VZ\ min}^S \quad 3.9$$

Minimální množství vodní páry [2]:

$$O_{H_2O\ min} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W^r}{18,016} + (f - 1) \cdot O_{VZ\ min}^S \quad 3.10$$

Minimální množství vlhkých spalín [2]:

$$O_{sp\ min} = O_{sp\ min}^S + O_{H_2O\ min} \quad 3.11$$

Množství spalín při spalování s přebytkem vzduchu  $\alpha > 1$  [4]:

$$O_{sp} = O_{sp\ min} + (\alpha - 1) \cdot O_{vz\ min} \quad 3.12$$

Výše uvedené vztahy platí pro normální podmínky. Pro zjištění skutečného objemu je nutné tyto objemy přepočítat podle stavové rovnice. [4]

Skutečné množství spalín při teplotě  $t_s$  [°C] a tlaku  $p_s$  [Mpa] [4]:

$$O_{sp}^{t_s, p_s} = O_{sp} \cdot \frac{273,15 + t_s}{273,15} \cdot \frac{0,101325}{p_s} \quad 3.13$$

$p_s$  [MPa] skutečný tlak,  
 $t_s$  [°C] skutečná teplota.

### 3.2 Objemové složení paliva z hrubého rozboru paliva

Přibližné minimální objemy vzduchu a spalín lze vypočítat i ze známé výhřevnosti paliva pomocí Rosin-Freslingových empirických vztahů. Ty platí pro normální fyzikální stav. Oproti určení objemového složení paliva pomocí prvkového rozboru se jedná o méně přesnou výpočtovou metodu. [2]

#### 3.2.1 Tuhá paliva

Vychází se z poznatků, že teplo vyvinuté spálením libovolné látky je úměrné množství spalovacího kyslíku.

Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg surového paliva o výhřevnosti  $Q_i^r$  [kJ/kg] lze spočítat jako [2]:

$$O_{VZ\ min}^s = 0,5 + 1,012 \cdot \frac{Q_i^r}{4187} \quad 3.14$$

Minimální množství vlhkých spalín při použití suchého vzduchu [2]:

$$O_{sp\ min}^{sv} = 1,375 + 0,95 \cdot \frac{Q_i^r}{4187} \quad 3.15$$

#### 3.2.2 Kapalná paliva

Minimální množství suchého vzduchu [2]:

$$O_{VZ\ min}^s = 1,7 + 0,88 \cdot \frac{Q_i^r}{4187} \quad 3.16$$

Minimální množství vlhkých spalín při použití suchého vzduchu [2]:

$$O_{SP\ min}^{sv} = 1,11 \cdot \frac{Q_i^r}{4187} \quad 3.17$$

### 3.3 Vlastnosti spalin

#### 3.3.1 Výhřevnost

Výhřevnost je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zůstane v plynné fázi. Značí se  $Q_i^r$ , jednotkou je kJ/kg.

Výhřevnost lze vypočítat z naměřeného spalného tepla, které se určuje laboratorně. Spalné teplo  $Q_s$  [kJ/kg] je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zkondenzuje.

Je-li známé spalné teplo, výhřevnost se vypočítá jako [1]:

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2^r) \quad 3.18$$

$W^r$	[-]	obsah vody v palivu,
$r$	[kJ/kg]	výparné teplo vody, $r = 2454 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ ,
$H_2^r$	[-]	obsah vodíku v surovém palivu.

Výhřevnost je možné určit i z prvkového rozboru paliva [1]:

$$Q_i^r = 33910 \cdot C^r + 120580 \cdot \left( H_2^r - \frac{O_2^r}{8} \right) + 10470 \cdot S^r - 2453 \cdot W^r \quad 3.19$$

$C^r, H_2^r, O_2^r, S^r$	[-]	obsah prvku v surovém palivu,
$W^r$	[-]	obsah vody v surovém palivu.

Výhřevnost směsi [1]:

$$Q_i^r = Q_{i_1}^r \cdot m_1 + Q_{i_2}^r \cdot m_2 + \dots + Q_{i_n}^r \cdot m_n \quad 3.20$$

$m_n$	[kg/kg]	hmotnostní podíl n-tého paliva $\sum m_n = 1$ ,
$Q_{i_n}^r$	[kJ/kg]	výhřevnost dílčího paliva.

### 3.3.2 Hustota

Hustotu spalin [kg/m<sup>3</sup>] lze určit s využitím výsledků stechiometrického výpočtu podle objemového zastoupení jednotlivých plynů tvořících směs.

Hustota vzduchu [4]:

$$\rho_{VZ} = \frac{O_{VZ\ min}^s \cdot \rho_{VZ}^s + (f - 1) \cdot O_{VZ\ min}^s \cdot \rho_{H_2O}}{O_{VZ\ min}^v} \quad 3.21$$

f	[-]	součinitel vlhkosti,
$O_{VZ\ min}^s$	[m <sup>3</sup> /kg]	minimální množství suchého vzduchu,
$O_{VZ\ min}^v$	[m <sup>3</sup> /kg]	minimální množství vlhkého vzduchu,
$\rho_{H_2O}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota vody,
$\rho_{VZ}^s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota suchého vzduchu.

Hustota spalin ( $\alpha=1$ ) [4]:

$$\rho_{SP\ min} = \frac{\sum_i O_i \rho_i}{O_{SP\ min}} \quad 3.22$$

$O_i$	[m <sup>3</sup> /kg]	objemy jednotlivých složek spalin (CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , Ar, N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O),
$\rho_i$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustoty těchto složek,
$O_{SP\ min}$	[m <sup>3</sup> /kg]	minimální množství vlhkých spalin.

Hustota spalin s přebytkem vzduchu  $\alpha$  [-] [4]:

$$\rho_{SP} = \frac{O_{SP\ min} \cdot \rho_{SP\ min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VZ\ min}^v \cdot \rho_{VZ}}{O_{SP\ min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VZ\ min}^v} \quad 3.23$$

Pro jiné než normální podmínky je nutné hustotu přepočítat podle stavové rovnice [4]:

$$\rho = \rho_N \cdot \frac{273,15}{t_s + 273,15} \cdot \frac{p_s}{0,101325} \quad 3.24$$

$\rho_N$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota za normálních podmínek,
$p_s$	[MPa]	skutečný tlak,
$t_s$	[°C]	skutečná teplota.



### 3.3.3 Měrná tepelná kapacita

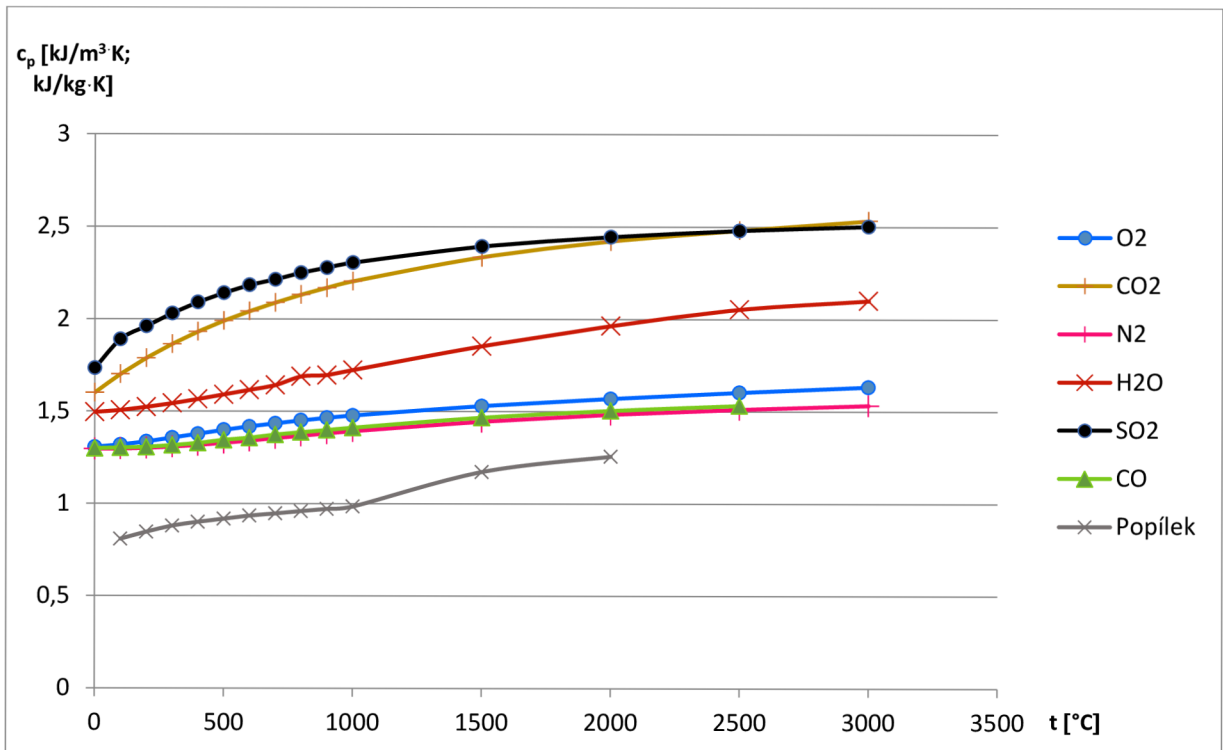
Následující vlastnosti spalin, tj. měrná tepelná kapacita, měrná entalpie, kinematická viskozita, tepelná vodivost a Prandtlovo číslo, byly přeneseny a zpracovány v programu Microsoft Office Excel.

Tabulka 3.2 ukazuje závislost měrné tepelné kapacity jednotlivých složek spalin na teplotě za normálních podmínek, tj. teplota 0 °C, tlak 0,101 MPa.

Tabulka 3.2 Měrná tepelná kapacita složek spalin [2]

t [°C]	O <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ·K]	CO <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ·K]	N <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ·K]	H <sub>2</sub> O [kJ/m <sup>3</sup> ·K]	SO <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ·K]	CO [kJ/m <sup>3</sup> ·K]	Popílek [kJ/kg·K]
0	1,306	1,6	1,295	1,494	1,733	1,298	-
100	1,318	1,7	1,296	1,505	1,89	1,302	0,808
200	1,335	1,787	1,3	1,522	1,96	1,306	0,846
300	1,356	1,863	1,307	1,542	2,03	1,315	0,879
400	1,377	1,93	1,316	1,565	2,09	1,327	0,9
500	1,398	1,989	1,328	1,59	2,14	1,344	0,917
600	1,417	2,041	1,34	1,615	2,183	1,356	0,934
700	1,434	2,088	1,354	1,641	2,214	1,373	0,946
800	1,45	2,131	1,367	1,688	2,25	1,386	0,959
900	1,464	2,169	1,38	1,696	2,278	1,398	0,971
1000	1,477	2,204	1,392	1,723	2,305	1,411	0,984
1500	1,529	2,335	1,444	1,853	2,393	1,466	1,172
2000	1,569	2,422	1,483	1,963	2,445	1,504	1,256
2500	1,603	2,481	1,511	2,053	2,48	1,532	-
3000	1,633	2,533	1,533	2,1	2,503	-	-

Tato tabulka byla vynesena do grafu znázorněného v obrázku 3.1 v programu MS Excel.



Obrázek 3.1 Závislost měrné tepelné kapacity složek spalin na teplotě

Z vytvořeného grafu lze vyvodit, že nejvyšší měrné tepelné kapacity dosahuje  $\text{SO}_2$ . Do teploty cca  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  nejvýrazněji roste  $c_p$  pro  $\text{SO}_2$  a  $\text{CO}_2$ . U vyšších teplot již dochází k mírnějšímu nárůstu. Pro ostatní spaliny je průběh  $c_p$  téměř lineární.  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$  a  $\text{O}_2$  dosahují navzájem podobných hodnot. U popílku je patrný skok kolem teploty  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , což může být způsobeno např. mírným natavením popílku a změnou některých jeho vlastností. Jeho hodnoty  $c_p$  pro hodnoty nad  $2000\text{ }^\circ\text{C}$  literatura neuvádí.

Z obrázku 3.1 byly pomocí funkce Spojnice trendu v MS Excel zjištěny polynomy měrné tepelné kapacity jednotlivých složek spalin.

### Polynomy

$\text{O}_2$

$$c_p^{\text{O}_2}(t) = 1,3054 + 0,0001 \cdot t + 4 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 5 \cdot 10^{-10} \cdot t^3 + 3 \cdot 10^{-13} \cdot t^4 - 8 \cdot 10^{-17} \cdot t^5 + 9 \cdot 10^{-21} \cdot t^6 \quad 3.25$$

$\text{CO}_2$

$$c_p^{\text{CO}_2}(t) = 1,6007 + 0,0011 \cdot t - 7 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 3 \cdot 10^{-10} \cdot t^3 - 8 \cdot 10^{-14} \cdot t^4 + 9 \cdot 10^{-18} \cdot t^5 \quad 3.26$$

$\text{N}_2$

$$c_p^{\text{N}_2}(t) = 1,2952 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot t + 3 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 2 \cdot 10^{-10} \cdot t^3 + 5 \cdot 10^{-14} \cdot t^4 - 6 \cdot 10^{-18} \cdot t^5 \quad 3.27$$

H<sub>2</sub>O

$$c_p^{H_2O}(t) = 1,4938 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot t + 3 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 2 \cdot 10^{-10} \cdot t^3 + 8 \cdot 10^{-14} \cdot t^4 - 1 \cdot 10^{-17} \cdot t^5 \quad 3.28$$

SO<sub>2</sub>

$$c_p^{SO_2}(t) = 1,7433 + 0,0014 \cdot t - 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 2 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 1 \cdot 10^{-12} \cdot t^4 + 3 \cdot 10^{-16} \cdot t^5 - 3 \cdot 10^{-20} \cdot t^6 \quad 3.29$$

CO

$$c_p^{CO}(t) = 1,299 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot t + 4 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 4 \cdot 10^{-10} \cdot t^3 + 2 \cdot 10^{-13} \cdot t^4 - 6 \cdot 10^{-17} \cdot t^5 + 7 \cdot 10^{-21} \cdot t^6 \quad 3.30$$

Popílek

$$c_p^{pop}(t) = 0,8133 + 0,0002 \cdot t + 6 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 1 \cdot 10^{-11} \cdot t^3 \quad 3.31$$

### 3.3.4 Entalpie

Entalpie  $H$  [kJ/kg], resp. [kJ/Nm<sup>3</sup>], slouží k vyjádření tepla, které je spalinám odebíráno. Výslednou entalpii je možné vyjádřit jako součet entalpií dílčích složek včetně popílku.

Entalpii spalin o teplotě  $t$  [°C] vznikající po spálení 1 kg tuhého či kapalného paliva nebo 1 Nm<sup>3</sup> plynného paliva s přebytkem vzduchu  $\alpha$  lze vypočítat pomocí vztahu [4]:

$$H_{Sp}^{t,\alpha} = H_{Sp}^t \min + (\alpha - 1) \cdot H_{Vz}^t \min \quad 3.32$$

$H_{Sp}^t \min$	[kJ/kg; kJ/m <sup>3</sup> ]	entalpie stechiometrických spalin ( $\alpha=1$ ),
$H_{Vz}^t \min$	[kJ/kg; kJ/m <sup>3</sup> ]	entalpie minimálního množství vzduchu při teplotě $t$ .

Entalpie stechiometrických spalin ( $\alpha=1$ ) se vypočítá jako [4]:

$$H_{Sp}^t \min = O_{CO_2} \cdot h_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot h_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot h_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot h_{Ar}^t + O_{H_2O} \cdot h_{H_2O}^t + a_{\dot{u}} \cdot A^r \cdot h_{pop}^t \quad 3.33$$

$h_i^t$	[kJ/m <sup>3</sup> ]	měrné entalpie složek spalin při teplotě $t$ [°C],
$a_{\dot{u}}$	[-]	poměrný úlet popílku z ohniště,
$A^r$	[kg/kg <sub>pal</sub> ]	obsah popelovin v surovém palivu.

Entalpie minimálního množství vzduchu při teplotě  $t$  je dána vztahem [4]:

$$H_{VZ\ min}^t = O_{VZ\ min}^s \cdot h_{VZ}^{s\ t} + O_{H_2O}^v \cdot h_{H_2O}^t \quad 3.34$$

$O_{VZ\ min}^s$	$[m^3/kg]$	minimální množství suchého vzduchu,
$O_{H_2O}^v$	$[m^3/kg]$	množství vodní páry,
$h_{VZ}^{s\ t}$	$[kJ/kg_{pal}]$	měrná entalpie suchého vzduchu,
$h_{H_2O}^t$	$[kJ/m^3]$	měrná entalpie vodní páry.

Pokud je známa výhřevnost, tepelný obsah spalin se dá také spočítat ze vztahu [1]:

$$H_{SP} = O_{SP} \cdot h_{SP} = Q_i^r + O_{VZ} \cdot h_{VZ} + h_{pal} \quad 3.35$$

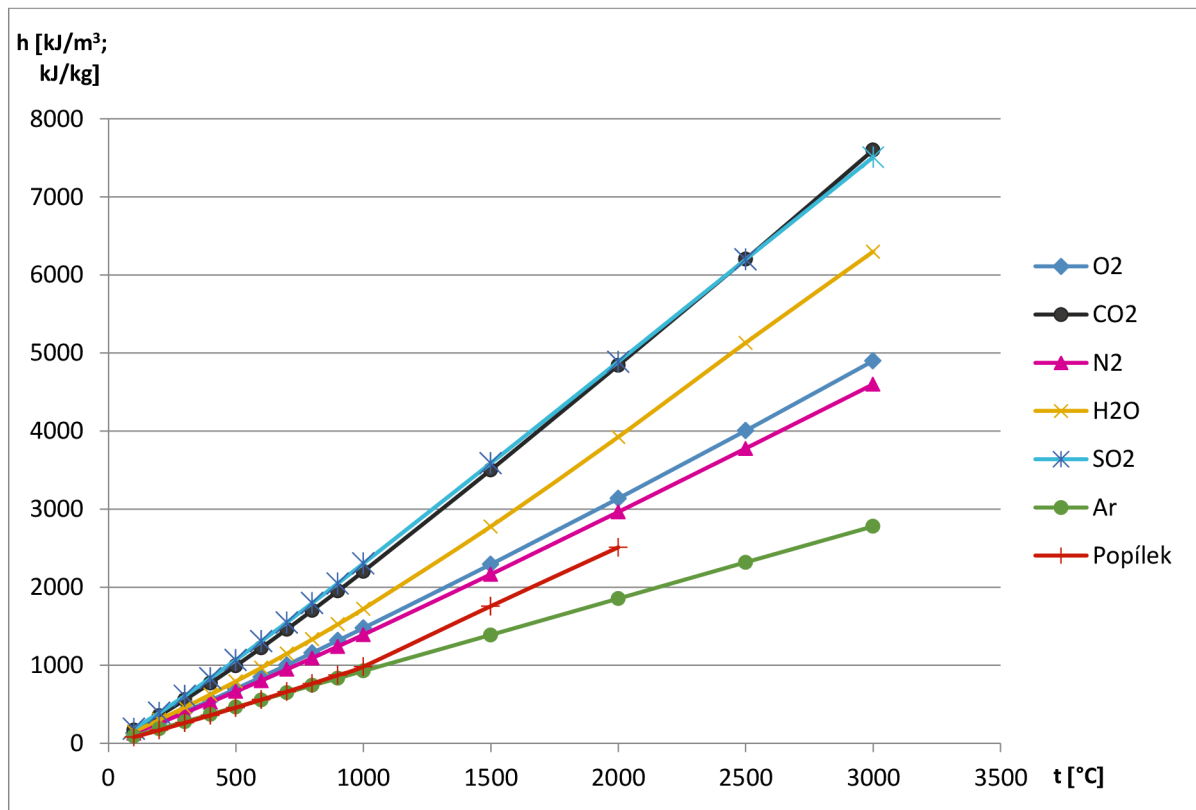
$h_{SP}$	$[kJ/m^3]$	měrná entalpie spalin,
$O_{SP}$	$[m^3/kg; m^3/m_{pal}^3]$	měrný objem spalin,
$Q_i^r$	$[kJ/kg; kJ/m^3]$	výhřevnost paliva,
$O_{VZ}$	$[m^3/kg_{pal}; m^3/m_{pal}^3]$	měrný objem vzduchu,
$h_{VZ}$	$[kJ/kg_{pal}]$	měrná entalpie vzduchu,
$h_{pal}$	$[kJ/kg_{pal}]$	měrná entalpie paliva.

V tabulce 3.3 jsou uvedeny hodnoty měrné entalpie v závislosti na teplotě. Hodnoty v tabulce jsou vztaženy na  $1\ m^3$  při teplotě  $0\ ^\circ C$  a tlaku  $0,101\ MPa$ .

Tabulka 3.3 Entalpie složek spalin v závislosti na teplotě [2]

$t$ [ $^\circ C$ ]	$O_2$ [ $kJ/m^3$ ]	$CO_2$ [ $kJ/m^3$ ]	$N_2$ [ $kJ/m^3$ ]	$H_2O$ [ $kJ/m^3$ ]	$SO_2$ [ $kJ/m^3$ ]	$Ar$ [ $kJ/m^3$ ]	Popilek [ $kJ/kg$ ]
100	132	170	130	150	189	93	80,8
200	267	357	260	304	392	186	169
300	407	559	392	463	610	278	264
400	551	772	527	626	836	372	360
500	699	994	666	795	1070	465	458
600	850	1225	804	969	1310	557	560
700	1004	1462	948	1149	1550	650	662
800	1160	1705	1094	1334	1800	743	767
900	1318	1952	1242	1526	2050	834	874
1000	1477	2204	1392	1723	2305	928	984
1500	2294	3504	2166	2779	3590	1390	1758
2000	3138	4844	2965	3926	4890	1855	2512
2500	4007	6203	3779	5132	6200	2320	-
3000	4900	7600	4600	6300	7510	2780	-

Díky hodnotám uvedených v tabulce 3.3 bylo možné v programu MS Excel vytvořit graf závislosti měrné entalpie spalin na teplotě.



Obrázek 3.2 Závislost měrné entalpie složek spalin na teplotě

Hodnoty měrné entalpie pro 100 °C jsou u všech spalin přibližně stejné. Podobný průběh mají jednotlivé složky spalin až do 1000 °C. Všechny složky rostou téměř lineárně. Takřka shodný průběh mají SO<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>, jejichž měrné entalpie zároveň dosahují nejvyšších hodnot. Nejnižších hodnot měrné entalpie dosahuje složka Ar. Pro popílek jsou známy hodnoty pouze do teploty 2000 °C. Lze u něj zaznamenat skok pro teploty 1000 °C, není však tak výrazný jako u měrné tepelné kapacity v obrázku 3.1.

Následně byla použita funkce Spojnice trendu, pomocí které bylo možné zjistit nejvhodnější polynomy pro měrné entalpie jednotlivých složek spalin v závislosti na konkrétní teplotě.

#### Polynomy

O<sub>2</sub>

$$h^{O_2}(t) = -2,3642 + 1,3043 \cdot t + 0,0002 \cdot t^2 - 7 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 + 9 \cdot 10^{-12} \cdot t^4 \quad 3.36$$

CO<sub>2</sub>

$$h^{CO_2}(t) = -12,129 + 1,7242 \cdot t + 0,0007 \cdot t^2 - 2 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 3 \cdot 10^{-11} \cdot t^4 \quad 3.37$$

N<sub>2</sub>

$$h^{N_2}(t) = 6,2621 + 1,2285 \cdot t + 0,0002 \cdot t^2 - 4 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 + 4 \cdot 10^{-12} \cdot t^4 \quad 3.38$$

H<sub>2</sub>O

$$h^{H_2O}(t) = 19,548 + 1,3478 \cdot t + 0,0004 \cdot t^2 - 5 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 \quad 3.39$$

SO<sub>2</sub>

$$h^{SO_2}(t) = -17,515 + 1,9658 \cdot t + 0,0005 \cdot t^2 - 2 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 + 2 \cdot 10^{-11} \cdot t^4 \quad 3.40$$

Ar

$$h^{Ar}(t) = 0,7677 + 0,9269 \cdot t \quad 3.41$$

Popílek

$$h^{pop}(t) = 27,324 + 0,6493 \cdot t + 0,0004 \cdot t^2 - 4 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 \quad 3.42$$

**3.3.5 Tepelná vodivost, kinematická viskozita, Prandtlovo číslo**

Prandtlovo číslo je bezrozměrné kritérium fyzikálních vlastností média. Je dáno vztahem [4]:

$$Pr = \frac{v \cdot c_p \cdot \rho \cdot 10^3}{\lambda} \quad 3.43$$

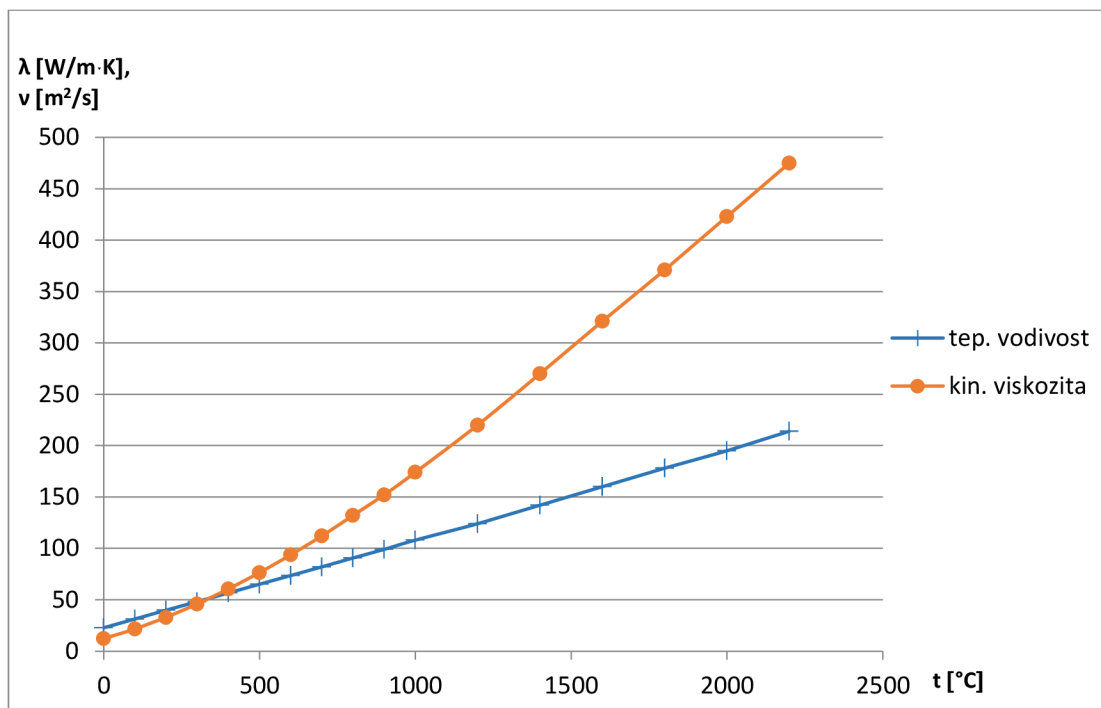
**Spaliny**

Tabulka 3.4 ukazuje hodnoty tepelné vodivosti, kinematické viskozity a Prandtlova čísla spalin pro různé teploty. Tato tabulka platí pro podmínky 0,101 MPa a 13 % CO<sub>2</sub>.

Tabulka 3.4 Spaliny – tep. kapacita, kin. viskozita, Prandtl. číslo v závislosti na teplotě [2]

Spaliny			
t [°C]	$\lambda \cdot 10^{-3}$ [W/m·K]	$\nu \cdot 10^{-6}$ [m <sup>2</sup> /s]	Prandtl [-]
0	22,7	12,2	0,72
100	31,2	21,5	0,69
200	39,8	32,8	0,67
300	48,1	45,8	0,65
400	56,6	60,4	0,64
500	65,1	76,3	0,63
600	73,5	93,6	0,62
700	82	112	0,61
800	90,6	132	0,6
900	99	152	0,59
1000	108	174	0,58
1200	124	220	0,56
1400	142	270	0,54
1600	160	321	0,52
1800	178	371	0,5
2000	195	423	0,49
2200	214	475	0,47

Stejně jako v případě měrné tepelné kapacity a měrné entalpie byl vytvořen graf těchto závislostí (vyjma Prandtlova čísla) na teplotě (obrázek 3.3). Následně byly pomocí funkce Spojnice trendu v MS Excel vyhledány nejvhodnější polynomy. Nevýhodou je, že hodnoty těchto vlastností nejsou známy pro jednotlivé složky spalin.



Obrázek 3.3 Spaliny - závislost tep. vodivosti, kin. viskozity na teplotě

Tepelná vodivost spalín roste s teplotou výrazně, jejich kinematická viskozita již méně. Obě funkce mají téměř lineární průběh.

Vzhledem k tomu, že literatura neuvádí bližší hodnoty Prandtlova čísla, není nutné vynášet jeho průběh do grafu.

### Polynomy

Kinematická viskozita spalín

$$\nu^{SP} \cdot 10^{-6}(t) = 12,249 + 0,0847 \cdot t + 9 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 \quad 3.44$$

Tepelná vodivost spalín

$$\lambda^{SP} \cdot 10^{-3}(t) = 23,059 + 0,0828 \cdot t + 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \quad 3.45$$

Prandtlovo číslo spalín

$$Pr^{SP}(t) = 0,7197 - 0,0003 \cdot t + 5 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 5 \cdot 10^{-10} \cdot t^3 + 2 \cdot 10^{-13} \cdot t^4 - 3 \cdot 10^{-17} \cdot t^5 \quad 3.46$$



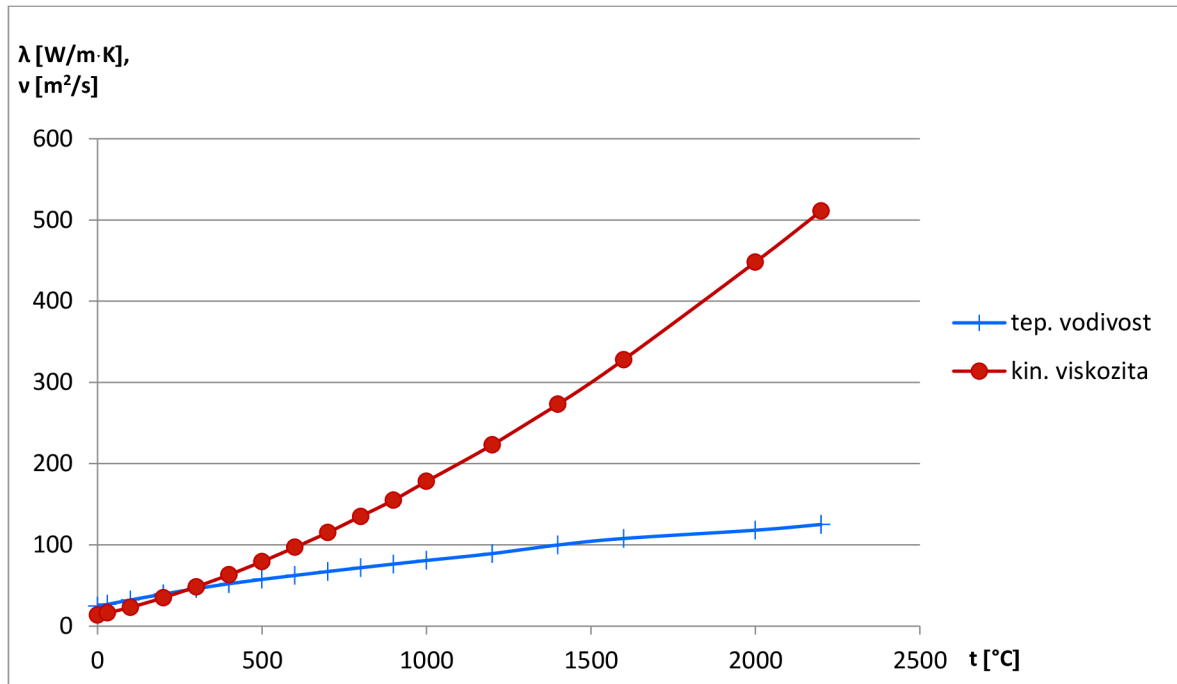
### Vzduch

Tabulka 3.5 obsahuje hodnoty tepelné vodivosti a kinematické viskozity pro vzduch v závislosti na teplotě při tlaku 0,101 MPa. Hodnoty Prandtlova čísla pro vzduch jsou převzaty ze [4], a platí pro tlak blízký atmosférickému, 11 % H<sub>2</sub>O a 13 % CO<sub>2</sub>.

Tabulka 3.5 Vzduch – tep. kapacita, kin. viskozita, Prandtl. číslo v závislosti na teplotě [2] [4]

Vzduch			
t [°C]	$\lambda \cdot 10^{-3}$ [W/m·K]	$\nu \cdot 10^{-6}$ [m <sup>2</sup> /s]	Pr [-]
0	24,4	13,3	0,70
30	26,7	16,2	-
100	32,1	23	0,69
200	39,3	34,8	0,69
300	46,1	48,2	0,69
400	52,1	63	0,70
500	57,4	79,3	0,70
600	62,3	96,8	0,71
700	67,1	115	0,71
800	71,8	135	0,72
900	76,3	155	0,72
1000	80,7	178	0,72
1200	89,2	223	0,73
1400	99,8	273	0,73
1600	107,8	328	0,74
2000	118	448	-
2200	125	511	-

Následný postup byl stejný jako v případě spalin. Nejprve byly hodnoty vlastností v závislosti na teplotě vyneseny do grafu znázorněného v obrázku 3.4.



Obrázek 3.4 Vzduch - závislost tep. vodivosti, kin. viskozity na teplotě

Tepelná vodivost a kinematická viskozita vzduchu dosahují podobných hodnot jako v případě spalín. Kinematická viskozita pro vzduch roste mírněji než pro spaliny. Průběh Prandtlůva čísla pro vzduch nebyl opět z důvodu méně přesných hodnot vykreslen.

Nakonec byly pomocí funkce Spojnice trendu v MS Excel zjištěny polynomy těchto vlastností v závislosti na konkrétní teplotě.

#### Polynomy

Kinematická viskozita vzduchu

$$\nu^{VZ} \cdot 10^{-6}(t) = 12,687 + 0,1 \cdot t + 7 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 5 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 \quad 3.47$$

Tepelná vodivost vzduchu

$$\lambda^{VZ} \cdot 10^{-3}(t) = 23,877 + 0,0959 \cdot t - 1 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 9 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 4 \cdot 10^{-11} \cdot t^4 + 7 \cdot 10^{-15} \cdot t^5 \quad 3.48$$

Prandtlůvo číslo vzduchu

$$Pr^{VZ}(t) = 0,4045 + 0,0018 \cdot t - 4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 4 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 2 \cdot 10^{-12} \cdot t^4 + 3 \cdot 10^{-16} \cdot t^5 \quad 3.49$$

## 4 Výpočet přehříváku páry

Cílem této kapitoly je zjistit vliv přesnosti volby fyzikálních vlastností spalín na přenášený tepelný výkon. Jako konkrétně řešený výměník je uvažován trubkový svazek přehříváku páry umístěný v proudu spalín.

### 4.1 Zadání

Trubky přehříváku jsou řazeny za sebou a vyrobeny z oceli. Příčně kolem trubek proudí spaliny, uvnitř trubek pára. Cílem této kapitoly je vypočítat rychlost a teplotu páry a spalín na výstupu z přehříváku za předpokladu, že jsou známy vstupní hodnoty teploty, rychlosti a vlastností medií, a to pro několik případů uvedených níže. Nakonec jsou výsledky mezi sebou porovnány. Zvoleným palivem je černé uhlí o složení uvedeném v tabulce 4.1. Tepelný výpočet výměníku je proveden se zanedbáním plochy ohybů a tlakových ztrát výměníku.

Tabulka 4.1 Složení paliva [7]

A <sup>r</sup>	W <sup>r</sup>	C <sup>r</sup>	H <sub>2</sub> <sup>r</sup>	S <sup>r</sup>	O <sub>2</sub> <sup>r</sup>	N <sup>r</sup>	f	α
8,25	5,1	72,48	5,64	0,94	11,1	1,28	1,023	1,14

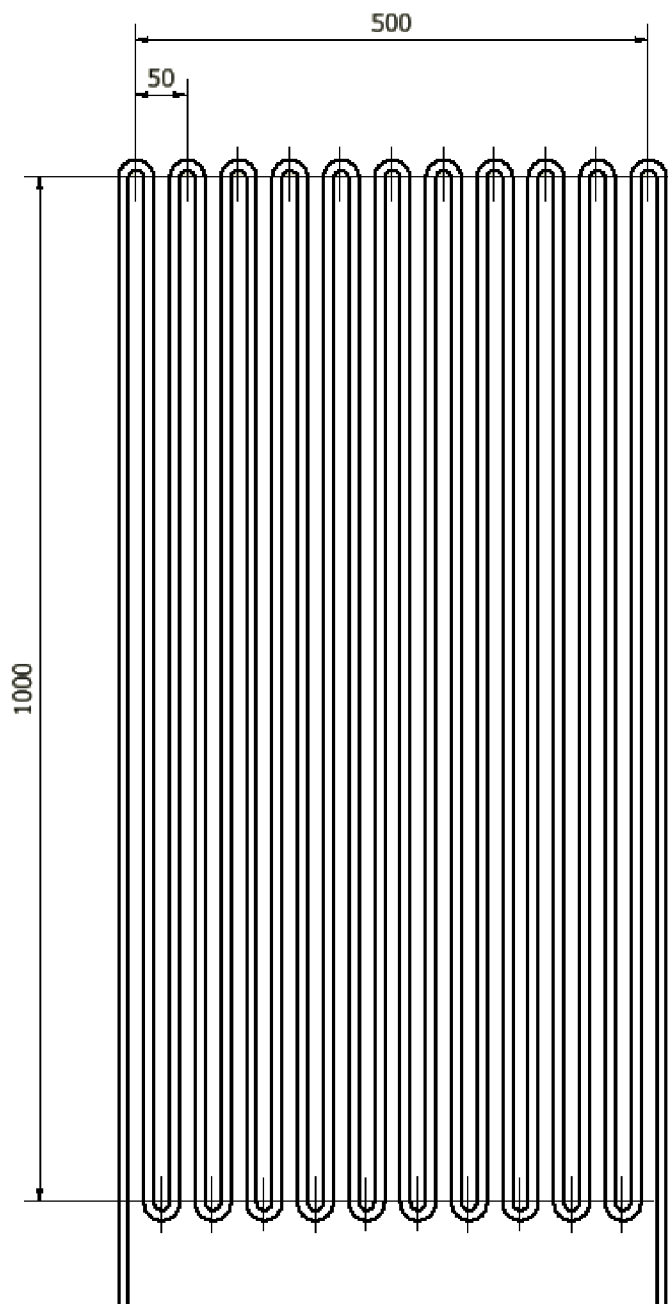
Tabulka 4.2 ukazuje zadané rozměry a parametry přehříváku a medií.

Tabulka 4.2 Zadané údaje

Délka trubky	L	1	[m]
Vnitřní průměr trubky	d <sub>1</sub>	0,021	[m]
Vnější průměr trubky	d <sub>2</sub>	0,025	[m]
Tloušťka stěny	δ	0,002	[m]
Počet trubek	n	10	[-]
Příčná rozteč	s <sub>1</sub>	0,05	[m]
Podélná rozteč	s <sub>2</sub>	0,05	[m]
Rychlost proudění páry na vstupu	w <sub>11</sub>	20	[m/s]
Teplota páry na vstupu	t <sub>11</sub>	180	[°C]
Rychlost proudění spalín na vstupu	w <sub>21</sub>	10	[m/s]
Teplota spalín na vstupu	t <sub>21</sub>	500	[°C]

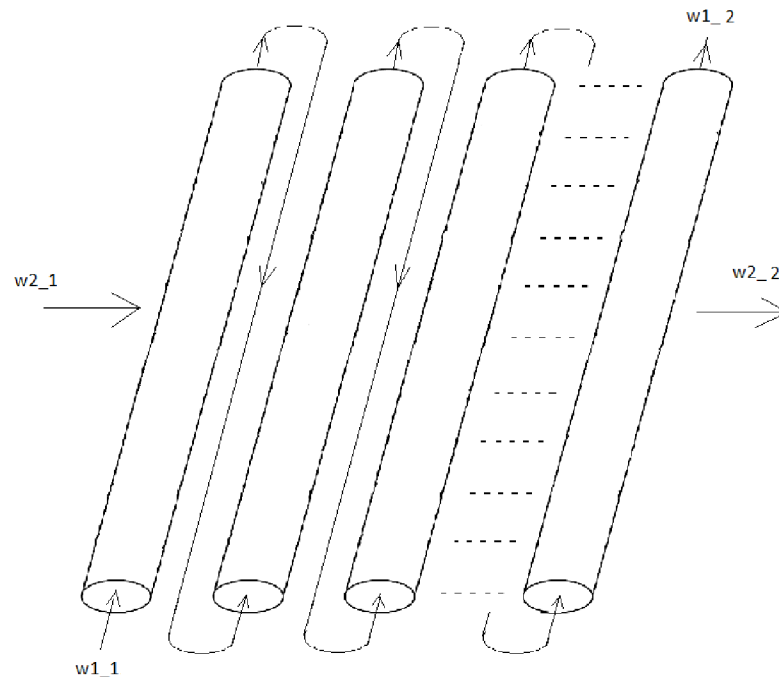
Jak již bylo zmíněno výše, postup výpočtu byl proveden pro čtyři různé případy. Vstupní teplota a rychlost zůstaly pro páru i spaliny vždy stejné. Výpočet výstupních hodnot byl proveden:

- na základě středních hodnot parametrů spalín a páry (varianta č. 1),
- na základě vstupních parametrů (varianta č. 2),
- na základě výstupních parametrů (varianta č. 3),
- detailním řešením po elementech (varianta č. 4).



Obrázek 4.1 Návrh jedné řady přehříváku páry

Zvolený směr proudění páry a spalín v přehříváku pro výpočet na základě středních hodnot, vstupních parametrů a výstupních parametrů je zobrazen v obrázku 4.2.



Obrázek 4.2 Nákres směru proudění páry a spalín v přehřívači

#### 4.2 Výpočet součinitele přestupu tepla

Následující výpočet je ilustrativní. Ukazuje postup výpočtu, který je pro všechny varianty analogický, mění se pouze číselné údaje. Výsledkem tohoto výpočtu je teplota a rychlost páry a spalín na konci jedné trubky přehřívači. Výpočet byl podrobněji proveden v programu MS Excel pro všechny varianty. Výsledné hodnoty z MS Excel se od ukázkového výpočtu mohou lišit z důvodu rozdílného zaokrouhlování. Postup výpočtu součinitele přestupu tepla pro páru i spaliny byl proveden na základě literatury [8].

##### Pára – proudění uvnitř trubky

Tepelná vodivost, Prandtlovo číslo i kinematická viskozita páry byly zjištěny pomocí programu X-Steam [5]. Byly nalezeny hodnoty Prandtlova čísla a tepelné vodivosti pro 180 °C, 340 °C a 500 °C. Poté byly na základě zjištěných údajů dopočítány polynomy těchto vlastností, které byly následně použity pro výpočet v programu MS Excel.

Pro zjištění kinematické viskozity páry byl postup odlišný. Protože program X-Steam neuvádí hodnoty přímo pro kinematickou viskozitu, byly odtud nejprve zjištěny hodnoty dynamické viskozity a hustoty pro 180 °C, 340 °C a 500 °C. Poté byly pomocí vztahu 4.1 dopočítány příslušné hodnoty kinematické viskozity. Nakonec byl stejně jako v případě ostatních vlastností dopočítán polynom, který byl následně použit v programu MS Excel.

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad 4.1$$

V tabulce 4.3 jsou uvedeny vlastnosti páry o vstupní teplotě 180 °C potřebné pro výpočet součinitele přestupu tepla páry.

Tabulka 4.3 Kin. viskozita, tep. vodivost, Prandtl. číslo páry pro teplotu 180 °C

Kinematická viskozita	$\nu_1$	$3,1947 \cdot 10^{-5}$	$[\text{m}^2/\text{s}]$
Tepelná vodivost	$\lambda_1$	0,03149	$[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$
Prandtlovo číslo	$Pr_1$	0,9642	$[-]$

Vztahy pro výpočet v MS Excel:

$$\nu = 4,5788 \cdot 10^{-10} \cdot t^2 - 3,9820 \cdot 10^{-8} \cdot t + 2,4279 \cdot 10^{-5} \quad 4.2$$

$$\lambda = 5,2322 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 + 7,5049 \cdot 10^{-5} \cdot t + 0,0163 \quad 4.3$$

$$Pr = 1,9316 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 2,9520 \cdot 10^{-4} \cdot t + 1,0111 \quad 4.4$$

Pro výpočet součinitele přestupu tepla páry byl použit následující postup [8]:

Charakteristický rozměr pro proudění páry uvnitř trubky je vnitřní průměr trubky:

$$l_1 = 25 - 2 \cdot 2 = 21 \text{ mm} = 0,021 \text{ m} \quad 4.5$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re_1 = \frac{w_1 \cdot l_1}{\nu_1} = \frac{20 \cdot 0,021}{3,1947 \cdot 10^{-5}} \doteq 13147 \quad 4.6$$

Součinitel A pro  $Re \in (2300; 1 \cdot 10^6)$ :

$$A = \frac{1}{(1,82 \cdot \log_{10} Re_1 - 1,64)^2 \cdot 8} \quad 4.7$$

$$A = \frac{1}{(1,82 \cdot \log_{10} 13147 - 1,64)^2 \cdot 8} \doteq 3,645 \cdot 10^{-3} \quad 4.8$$

Nusseltovo číslo:

$$Nu_1 = \frac{A \cdot (Re_1 - 1000) \cdot Pr_1}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{A} \cdot (Pr_1^{2/3} - 1)} \quad 4.9$$

$$Nu_1 = \frac{3,645 \cdot 10^{-3} \cdot (13147 - 1000) \cdot 0,9642}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{3,645 \cdot 10^{-3}} \cdot (0,9642^{2/3} - 1)} \doteq 42,4881 \quad 4.10$$

Korekční součinitel respektující vliv počátečního úseku:

$$\epsilon_l = 1 + \left(\frac{l_1}{L}\right)^{2/3} = 1 + \left(\frac{0,021}{1}\right)^{2/3} \doteq 1,076 \quad 4.11$$

$\epsilon_l \sim 1 \rightarrow$  korekce není nutná

Součinitel přestupu tepla páry:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{l_1} = \frac{42,488 \cdot 0,03149}{0,021} \doteq 63,712 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad 4.12$$

### Spaliny – příčné proudění (s ohledem na počet řad)

Pro spaliny byly hodnoty tepelné vodivosti, Prandtlova čísla i kinematické viskozity vypočítány z polynomů uvedených v předchozí kapitole, jedná se o rovnice 3.44, 3.45 a 3.46. Ty byly zároveň použity i pro výpočetní model v MS Excel.

V tabulce 4.4 jsou uvedeny vlastnosti spalin o vstupní teplotě 500 °C potřebné pro výpočet jejich součinitele přestupu tepla.

Tabulka 4.4 Kin. viskozita, tep. vodivost, Prandtl. číslo spalin pro teplotu 500 °C

Kinematická viskozita	$\nu_2$	$7,4599 \cdot 10^{-5}$	[m <sup>2</sup> /s]
Tepelná vodivost	$\lambda_2$	0,064959	[W/m·K]
Prandtlovo číslo	$Pr_2$	0,643763	[-]

Dále se při výpočtu součinitele přestupu tepla spalin postupuje podle [8].

Charakteristický rozměr:

$$l_2 = \frac{\pi \cdot d_2}{2} = \frac{\pi \cdot 0,025}{2} \doteq 0,03927 \quad 4.13$$

Poměrná příčná rozteč:

$$a = \frac{s_1}{d} = \frac{0,05}{0,025} = 2 \quad 4.14$$

Poměrná podélná rozteč:

$$b = \frac{s_2}{d} = \frac{0,05}{0,025} = 2 \quad 4.15$$

Součinitel zohledňující velikost příčné rozteče (pro  $b \geq 1$ ):

$$\tau = 1 - \frac{\pi}{4a} = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot 2} \doteq 0,6073 \quad 4.16$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re_2 = \frac{w_2 \cdot l_2}{\nu_2 \cdot \tau} = \frac{10 \cdot 0,03927}{7,4599 \cdot 10^{-5} \cdot 0,6073} \doteq 8668 \quad 4.17$$

Nusseltovo číslo (laminární proudění):

$$Nu_2^{lam} = 0,664 \cdot \sqrt{Re_2} \cdot \sqrt[3]{Pr_2} = 0,664 \cdot \sqrt{8668} \cdot \sqrt[3]{0,643763} \doteq 53,379 \quad 4.18$$

Nusseltovo číslo (turbulentní proudění):

$$Nu_2^{tur} = \frac{0,037 \cdot Re_2^{0,8} \cdot Pr_2}{1 + 2,443 \cdot Re_2^{-0,1} \cdot \left(Pr_2^{\frac{2}{3}} - 1\right)^2} \quad 4.19$$

$$Nu_2^{tur} = \frac{0,037 \cdot 8668^{0,8} \cdot 0,643763}{1 + 2,443 \cdot 8668^{-0,1} \cdot (0,643763^{2/3} - 1)} \doteq 31,65 \quad 4.20$$

Nusseltovo číslo:

$$Nu_2 = 0,3 + \sqrt{(Nu_2^{lam})^2 + (Nu_2^{tur})^2} \quad 4.21$$

$$Nu_2 = 0,3 + \sqrt{(53,379)^2 + (31,65)^2} \doteq 62,357 \quad 4.22$$

Korekční součinitel pro zákrytové uspořádání svazku:

$$f_A = 1 + \frac{0,7}{\tau^{1,5}} \cdot \frac{\left(\frac{b}{a} - 0,3\right)}{\left(\frac{b}{a} + 0,7\right)^2} = 1 + \frac{0,7}{0,6073^{1,5}} \cdot \frac{\left(\frac{2}{2} - 0,3\right)}{\left(\frac{2}{2} + 0,7\right)^2} \doteq 1,3582 \quad 4.23$$

Nusseltovo číslo svazku (pro  $n < 10$ ):

$$Nu_2^{sv} = \frac{1 + (n - 1) \cdot f_A}{n} \cdot Nu_2 \quad 4.24$$

$$Nu_2^{sv} = \frac{1 + (10 - 1) \cdot 1,3582}{10} \cdot 62,357 \doteq 82,463 \quad 4.25$$

Součinitel přestupu tepla spalín:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2^{sv} \cdot \lambda_2}{l_2} = \frac{82,463 \cdot 0,064959}{0,039} \doteq 137,407 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad 4.26$$

Pro výpočet součinitele prostupu tepla bylo zapotřebí zjistit tepelnou vodivost oceli.

Tepelná vodivost oceli dopočítaná lineární interpolací [6]:

$$\lambda_{ocel} = 43,8 \frac{W}{m \cdot K}$$

Součinitel prostupu tepla pro válcovou stěnu:

$$k_l = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} + \frac{1}{2\lambda_o} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2}} \quad 4.27$$



$$k_l = \frac{\pi}{\frac{1}{65,22 \cdot 0,0105} + \frac{1}{43,8 \cdot \ln\left(\frac{0,0125}{0,0105}\right)} + \frac{1}{137,407 \cdot 0,0125}} \quad 4.28$$

$$k_l \doteq 3,064 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

Výsledné teplo:

$$Q = k_l \cdot L \cdot \Delta t = 3,064 \cdot 1 \cdot (500 - 180) \doteq 980,48 \text{ W} \quad 4.29$$

### 4.3 Výpočet výstupních hodnot

Pro výpočet výsledné teploty a rychlosti páry a spalín na konci výměníku byla použita kalorimetrická rovnice a rovnice kontinuity.

#### Pára

Z programu X-Steam [5] byla zjištěna hustota a měrná tepelná kapacita páry pro teploty 180 °C, 340 °C a 500 °C, následně byly opět dopočítány polynomy těchto vlastností. Ty byly využity ve výpočtu v MS Excel.

Hustota a měrná tepelná kapacita páry o vstupní teplotě 180 °C potřebné pro výpočet teploty páry na konci přehříváku jsou uvedeny v tabulce 4.5.

Tabulka 4.5 Vlastnosti páry pro teplotu 180 °C pro výpočet výstupní teploty

Hustota	$\rho_1$	0,48	[kg/m <sup>3</sup> ]
Měrná tepelná kapacita	$c_{p1}$	1975,51	[J/kg·K]

Vztahy pro výpočet v MS Excel:

$$\rho_1 = 1,0449 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 1,3376 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,6880 \quad 4.30$$

$$c_{p1} = 8,2853 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 0,0664 \cdot t + 1960,6150 \quad 4.31$$

Střední průměr trubky:

$$d_{stř} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{0,021 + 0,025}{2} = 0,023 \text{ m} \quad 4.32$$

Hmotnostní tok páry:

$$\dot{m}_1 = w_1 \cdot \rho_1 \cdot S_1 = w_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_{stř}^2}{4} = 20 \cdot 0,48 \cdot \frac{\pi \cdot 0,023^2}{4} \doteq 0,004 \text{ kg/s} \quad 4.33$$

Teplota páry na konci jedné trubky přehříváku:

$$Q = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_{12} - t_{11}) \rightarrow t_{12} = t_{11} + \frac{Q}{\dot{m}_1 \cdot c_{p1}} \quad 4.34$$

$$t_{12} = t_{11} + \frac{Q}{\dot{m}_1 \cdot c_{p1}} = 180 + \frac{979,84}{0,004 \cdot 1975,51} \doteq 303 \text{ °C} \quad 4.35$$

Rychlost páry na konci jedné trubky přehříváku:

$$w_{12} = w_{11} \cdot \frac{t_{12} + 273,15}{t_{11} + 273,15} = 20 \cdot \frac{303 + 273,15}{180 + 273,15} \doteq \mathbf{25,43 \text{ m/s}} \quad 4.36$$

### Spaliny

Z rovnic uvedených ve třetí kapitole a použitých v MS Excel byly zjištěny hodnoty hustoty a měrné tepelné kapacity spalin pro teploty 180 °C, 340 °C a 500 °C. Na základě zjištěných hodnot byly dopočítány polynomy, které byly nadále použity ve výpočtu v programu MS Excel.

Tabulka 4.6 Vlastnosti spalin pro teplotu 500 °C pro výpočet výstupní teploty

Hustota	$\rho_2$	0,467	[kg/m <sup>3</sup> ]
Měrná tepelná kapacita	$c_{p2}$	1533,9	[J/kg·K]

Vztahy pro výpočet v MS Excel:

$$\rho_2 = 1,6822 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 2,1754 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,1346 \quad 4.37$$

$$c_{p2} = 4,3711 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,2118 \cdot t + 1417,0725 \quad 4.38$$

Průtočný průřez (volný průřez):

$$S_2 = L \cdot s_1 = 1 \cdot 0,05 = 0,05 \text{ m}^2 \quad 4.39$$

Hmotnostní tok spalin:

$$\dot{m}_2 = w_2 \cdot \rho_2 \cdot S_2 = 10 \cdot 0,467 \cdot 0,05 \doteq 0,2335 \text{ kg/s} \quad 4.40$$

Výpočet teploty spalin na konci jedné trubky přehříváku:

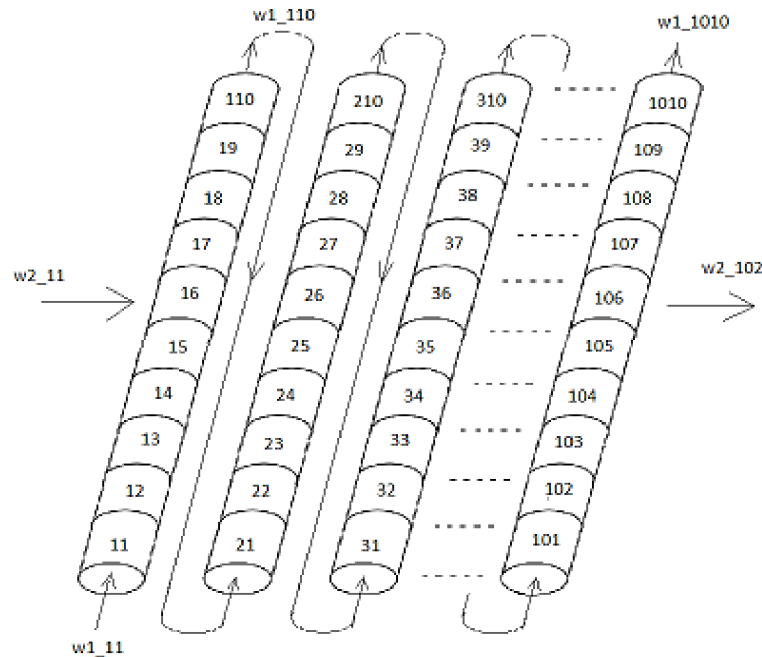
$$Q = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_{21} - t_{22}) \rightarrow t_{22} = t_{21} - \frac{Q}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}} \quad 4.41$$

$$t_{22} = 500 - \frac{979,84}{0,2335 \cdot 1533,9} \doteq \mathbf{497,3 \text{ °C}} \quad 4.42$$

Rychlost spalin na konci jedné trubky přehříváku:

$$w_{22} = w_{21} \cdot \frac{t_{22} + 273,15}{t_{21} + 273,15} = 10 \cdot \frac{497,3 + 273,15}{500 + 273,15} \doteq \mathbf{9,97 \text{ m/s}} \quad 4.43$$

Obrázek 4.3 ukazuje rozdělení přehříváku na elementy pro detailní výpočet. V tomto případě byly teploty, rychlosti i vlastnosti páry počítány pro každých 100 mm délky přehříváku. Vlastnosti spalin zůstaly vždy stejné na délce jedné trubky.



Obrázek 4.3 Schéma přehříváku páry rozděleného na elementy

Ukázka postupu této části výpočtu v programu MS Excel je znázorněna na snímku obrazovky na obrázku 4.4.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Element			11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	Výměník												
3	Délka trubky	L	[m]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
4	Vnější průměr	$d_e$	[m]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
5	Tloušťka stěny	$\delta$	[m]	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
6	Vnitřní průměr	$d_i$	[m]	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
7	Počet řad	n	[-]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
8	Příčná rozteč	$s_1$	[m]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
9	Podélná rozteč	$s_2$	[m]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
10	Tepečná vodivost oceli	$\lambda_w$	[W/mK]	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8
12	PÁRA												
13	Rychlost proudění	$w_{11}$	[m/s]	20	20,5479208	21,09377947	21,6378679	22,18044047	22,72171734	23,26188614	23,8011038	24,33949773	24,8771667
14	Teplota na vstupu	$t_{11}$	[°C]	180	192,414515	204,7823084	217,109991	229,40333	241,6673106	253,9061852	266,1235094	278,3221698	290,504405
15	Kinematická viskozita	$\nu_1$	[m <sup>2</sup> /s]	3,1947E-05	3,3570E-05	3,5326E-05	3,7217E-05	3,9241E-05	4,1398E-05	4,3687E-05	4,6110E-05	4,8665E-05	5,1353E-05
16	Tepečná vodivost	$\lambda_1$	[W/mK]	0,0314944	0,032668	0,03385214	0,03505052	0,036260319	0,03748299	0,03871885	0,039968167	0,041231159	0,04250799
17	Prandtlovo číslo	Pr <sub>1</sub>	[-]	0,96421	0,96143836	0,958736352	0,95610192	0,953533284	0,951028962	0,948587694	0,94620844	0,943890353	0,941631276
18	Entalpie	h	[kJ/kg]	2836,0	2860,3	2884,6	2908,9	2933,1	2957,5	2981,9	3006,2	3030,7	3055,1
19													
20	Charakteristický rozměr	$l_s$	[m]	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
21	Reynoldsovo číslo	Re <sub>1</sub>	[-]	13146,80	12854,10	12539,34	12209,39	11870,05	11526,17	11181,70	10839,80	10502,96	10173,11
22	Součinitel pro Nusseitovo číslo	A	[-]	0,003644773	0,00366703	0,003691766	0,00371866	0,003747402	0,003777739	0,003809438	0,003842296	0,003876134	0,0039108
23	Nusseitovo číslo	Nu <sub>1</sub>	[-]	43,48820102	42,6416346	41,73483491	40,7853084	39,80794404	38,81520428	37,81736421	36,82277098	35,83810305	34,8686161
24	Korekční součinitel	$\epsilon_1$	[-]	1,353302082	1,35330208	1,353302082	1,35330208	1,353302082	1,353302082	1,353302082	1,353302082	1,353302082	1,35330208
25	Součinitel přestupu tepla	$\alpha_1$	[W/m <sup>2</sup> K]	65,22070469	66,3341323	67,2789659	68,0736232	68,73565396	69,28142502	69,72594502	70,08279256	70,3641195	70,5807048
27	Měrná tepečná kapacita	$c_{p1}$	[J/kgK]	1975,5074	1978,51366	1981,762549	1985,25314	1988,984778	1992,957035	1997,169626	2001,622355	2006,315052	2011,24752
28	Hustota	$\rho_1$	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,4811085	0,46933425	0,457924582	0,44687002	0,436162524	0,42579529	0,415762631	0,406059843	0,396683093	0,38762932
29	Střední průměr trubky	$d_{w1}$	[m]	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
30	Přičný průřez 1 trubky	$S_1$	[m <sup>2</sup> ]	0,000415476	0,00041548	0,000415476	0,00041548	0,000415476	0,000415476	0,000415476	0,000415476	0,000415476	0,00041548
31	Hmotnostní průtok	$m_1$	[kg/s]	0,003997777	0,00400678	0,004013229	0,00401736	0,004019426	0,004019644	0,004018241	0,004015436	0,004011445	0,00400648
32	Tepečný odpor	$k_{11}$	[W/mK]	3,063917039	3,06285004	3,062850036	3,06285004	3,062850036	3,062850036	3,062850036	3,062850036	3,062850036	3,06285004
33	Teplota	$Q_1$	[W]	98,04534525	98,01120111	98,01120114	98,01120114	98,01120114	98,01120114	98,01120114	98,01120114	98,01120114	98,01120114
34	Teplota páry na výstupu	$t_{12}$	[°C]	192,4145145	204,782308	217,1099912	229,40333	241,6673106	253,9061852	266,1235094	278,3221698	290,5044053	302,671822
35	Rychlost páry na výstupu	$w_{12}$	[m/s]	20,54792076	21,0937795	21,63786787	22,1804405	22,72171734	23,26188614	23,8011038	24,33949773	24,87716674	25,4141817
37	SPALINY												
38	Rychlost proudění	$w_{21}$	[m/s]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
39	Teplota na vstupu	$t_{21}$	[°C]	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
40	Kinematická viskozita	$\nu_2$	[m <sup>2</sup> /s]	7,4599E-05	7,4599E-05	7,4599E-05	7,4599E-05	7,4599E-05	7,4599E-05	7,4599E-05	7,4599E-05	7,4599E-05	7,4599E-05
41	Tepečná vodivost	$\lambda_2$	[W/mK]	0,064959	0,06488	0,06488	0,06488	0,06488	0,06488	0,06488	0,06488	0,06488	0,06488

Obrázek 4.4 Detailní výpočet v programu MS Excel

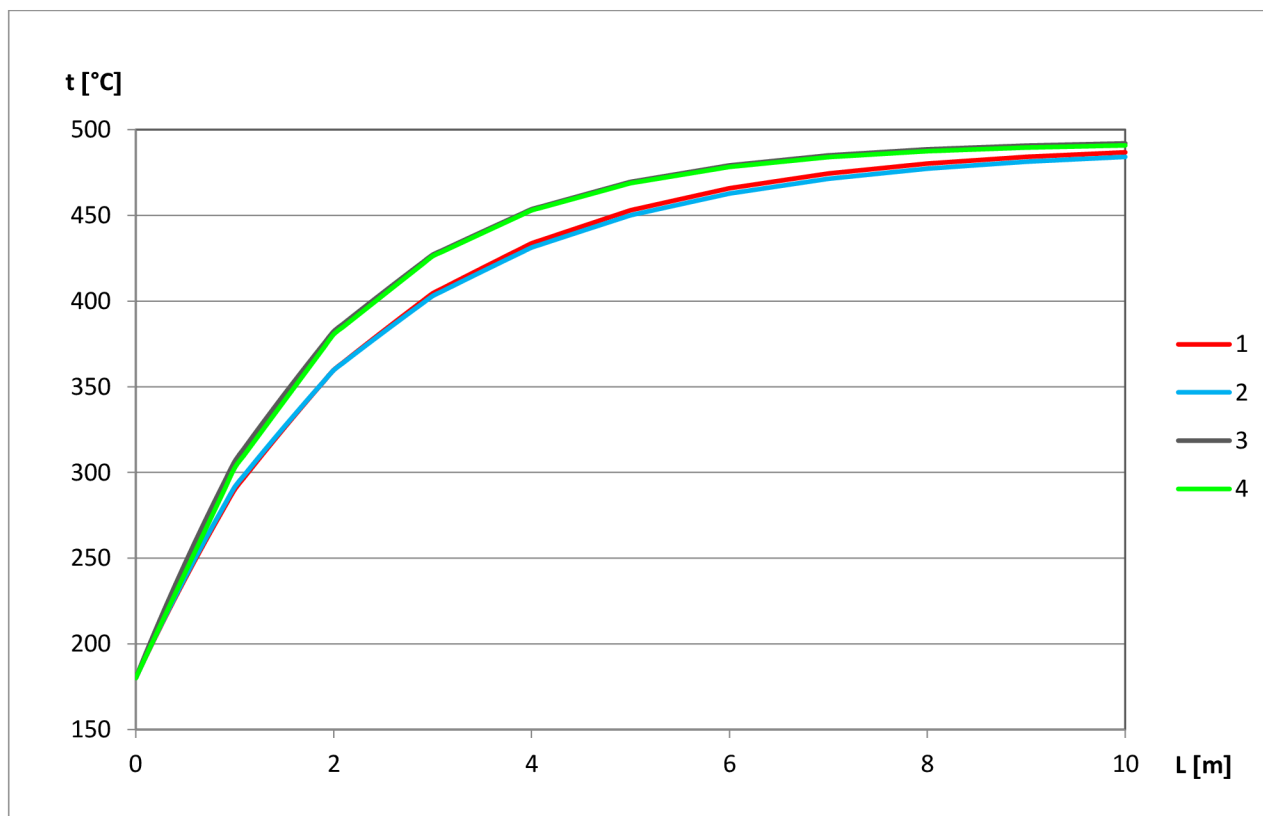
#### 4.4 Shrnutí

V tabulce 4.7 jsou shrnuty výsledky jednotlivých variant výpočtů provedených v MS Excel.

Tabulka 4.7 Výsledné hodnoty rychlostí a teplot médií

Varianta	Vstup				Výstup			
	Pára		Spaliny		Pára		Spaliny	
	w [m/s]	t [°C]	w [m/s]	t [°C]	w [m/s]	t [°C]	w [m/s]	t [°C]
1	20	180	10	500	33,54	486,85	9,90	492,56
2	20	180	10	500	33,43	484,20	9,88	490,94
3	20	180	10	500	33,77	492,08	9,92	494,19
4	20	180	10	500	33,72	490,91	9,91	492,96

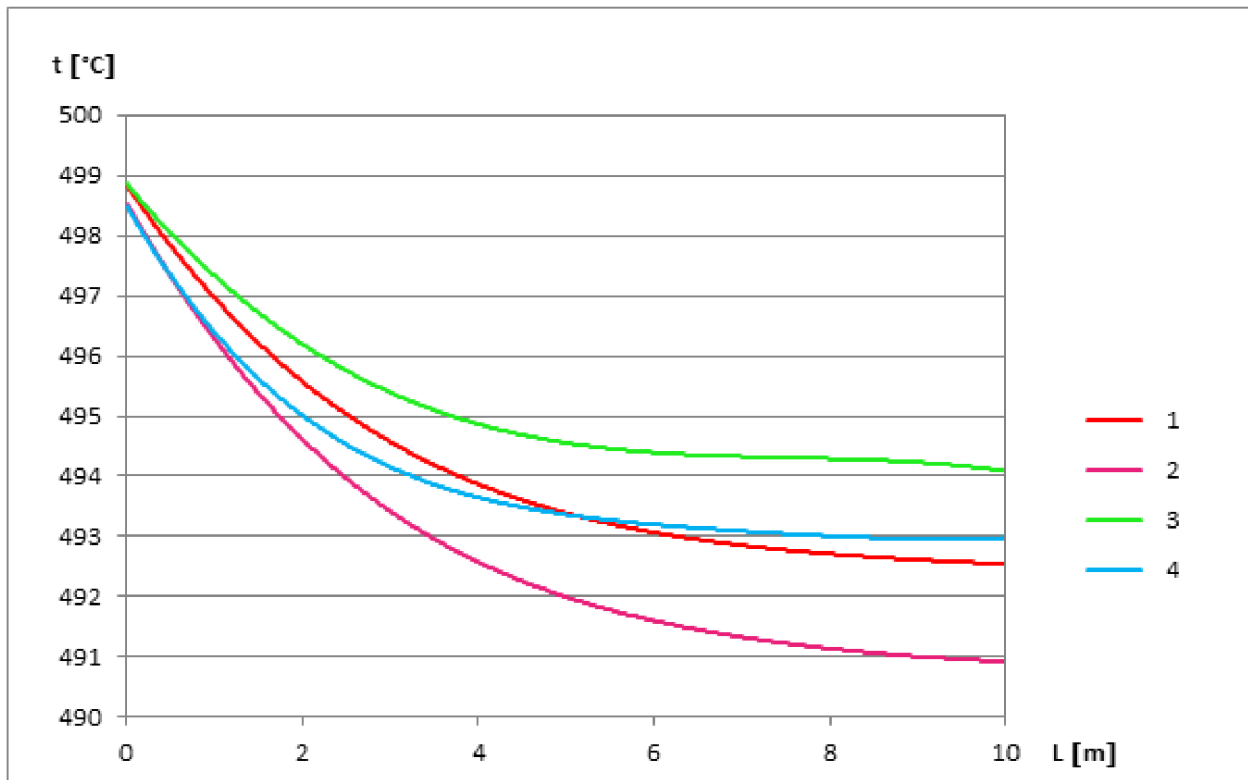
Z výsledků byly sestrojeny grafy pro průběh teploty páry (obrázek 4.5) a teploty spalín (obrázek 4.6) po celé délce výměníku pro všechny varianty výpočtu.



Obrázek 4.5 Průběh teploty páry

Při použití různých vstupních údajů vlastností páry jsou počáteční i koncové hodnoty velmi podobné. Odchylka teplot zpočátku roste a až ke konci dochází k ustálení na podobných hodnotách. K největšímu rozdílu dochází pro variantu č. 2 na začátku čtvrté trubky, tj. na elementu č. 40, kdy je velikost odchýlení od detailního řešení rovno přibližně 23,2 °C, tj. cca 5,5 %. Nejvíce se detailnímu řešení blíží průběh teploty páry pro variantu č. 3, kdy jsou křivky téměř shodné. Odchylky byly dopočítány v MS Excel.

Teplota spalín během proudění kolem svazku je zobrazena v obrázku 4.6.



Obrázek 4.6 Průběh teploty spalín

Pro průběh teploty spalín během proudění byly hodnoty proloženy křivkami. Z tohoto důvodu nemají vstupní teploty spalín počátek v hodnotě 500 °C.

Nejvyšší přesnost vykazuje výpočet na základě středních hodnot, tj. varianta č. 1. Výsledná teplota spalín se liší o cca 0,1 %. Výsledné hodnoty pro ostatní varianty jsou také relativně přesné. Největší odchýlení vychází v případě druhé varianty, a to přibližně o 0,4 %.

#### 4.5 Výpočet tlakové ztráty

Protože tlaková ztráta je důležitý údaj ve výpočtu výměníku, byly pro všechny varianty výpočtu pro kontrolu dopočítány tlakové ztráty potrubí.

##### Tlaková ztráta při podélném proudění v trubce

Tlakové ztráty pro páru [Pa] byly určeny ze vztahu [4]:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad 4.44$$

kde  $L=10$  m,  
 $d=0,021$  m,  
 $\lambda=0,036$ .

Součinitel tření  $\lambda$  byl určen z grafu pro závislost součinitele tření pro trubky na Reynoldsově čísle uvedeného v literatuře [4].

Pro rychlost proudění a hustotu páry byla použita jejich průměrná hodnota z jednotlivých variant výpočtu z modelu, který byl vytvořen v MS Excel.

Vypočítané tlakové ztráty jsou uvedeny v tabulce 4.8.

Tabulka 4.8 Tlakové ztráty pro podélné proudění páry

Varianta	$\Delta p$ [Pa]
1	3064,32
2	3836,08
3	2364,54
4	2602,05

### Tlaková ztráta při příčném omývání svazku trubek

Tlaková ztráta svazku [Pa] omývaného příčným proudem spalin se vypočítá ze vztahu [4]:

$$\Delta p_{sv} = \zeta_{sv} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad 4.45$$

Ztrátový součinitel  $\zeta_{sv}$  závisí na typu a geometrii svazku. Pro svazek trubek uspořádaných za sebou se vypočítá jako [4]:

$$\zeta_{sv} = (6 + 9 \cdot n) \cdot Re^{-0,26} \cdot \left(\frac{s_1}{d_2}\right)^{-0,23} \quad 4.46$$

Hodnoty příčné rozteče  $s_1$ , vnějšího průměru  $d_2$  a počtu trubek  $n$  jsou zadány. Pro Reynoldsovo číslo, hustotu a rychlost proudění spalin byly použity jejich průměrné hodnoty z jednotlivých výpočtů. Výsledné tlakové ztráty jsou uvedeny v tabulce 4.9.

Tabulka 4.9 Tlakové ztráty pro příčné proudění spalin

Varianta	$\Delta p$ [Pa]
1	178,90
2	178,09
3	179,64
4	179,14

## ZÁVĚR

Po úvodním seznámení se základními termíny z oblasti spalování byla ve druhé části bakalářské práce pozornost věnována základním vlastnostem spalin, zejména měrné tepelné kapacitě, entalpii, kinematické viskozitě, tepelné vodivosti a Prandtlovu číslu. Na základě tabulkových údajů z vybrané literatury byly v MS Excel sestrojeny závislosti těchto vlastností na teplotě a nakonec pomocí funkce Spojnice trendu nalezeny jejich polynomy.

Poslední částí práce byl konkrétní příklad výměníku. Byl proveden výpočet přehříváku páry pro čtyři různé volby fyzikálních vlastností dohledaných na základě známé teploty. První případ byl počítán pro střední hodnoty vlastností medií, ve druhém byly vlastnosti určeny na základě vstupních teplot medií, ve třetím na základě výstupních hodnot. Jako poslední bylo provedeno detailní řešení přehříváku, kdy byly vlastnosti páry vypočítány pro každých deset centimetrů a vlastnosti spalin pro každou obtékanou řadu trubek. Toto řešení lze považovat za nejpřesnější. Pro lepší přehlednost byly vytvořeny grafy, které znázorňují průběh teplot spalin a páry po celé délce přehříváku.

V porovnání s detailním řešením byla teplota spalin nejpřesněji vypočítána v případě středních hodnot vlastností. Odchylka činí přibližně 0,08 %. Pro výslednou teplotu páry byl nejpřesnější výpočet pomocí metody na základě známých výstupních parametrů. V tomto případě se od sebe výsledky liší o cca 0,24 %. Ale i ostatní výsledky jsou relativně přesné. Největší odchylky teploty páry se neprojevují na konci přehříváku, ale přibližně v jeho polovině, jak lze vidět na obrázku 4.5. Nejvýraznější odchylka od detailního výpočtu byla vypočítána pro variantu č. 2 na elementu č. 40. Tato odchylka činí asi 23 °C (tj. cca 5,5 %).

Nakonec byly pro kontrolu dopočítány tlakové ztráty jak pro podélné proudění páry uvnitř trubek, tak pro příčné omývání svazku trubek spalinami. Ztráty během proudění uvnitř trubek pro jednotlivé varianty výpočtu se pohybují v přibližném rozmezí od 2,3 kPa do 3,8 kPa. Tlakové ztráty při příčném proudění se pohybují v řádech stovek Pascalů a vzájemně se od sebe výsledné hodnoty téměř neliší.

Závěrem lze říci, že pro zadaný přehřívák páry není zcela nutné zabývat se podrobným výpočtem. Tento závěr však nelze použít obecně. V případě počítaného přehříváku by odchylky od přesného výpočtu, nemusely pro provoz znamenat velkou komplikaci. Pro spoustu jiných, větších a energeticky náročnějších zařízení by ale v této práci dopočítaná odchylka 5,5 % mohla být naopak výraznou komplikací.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2009. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-3955-9.
- [2] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet*. 4. přeprac. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0426-4.
- [3] BUDÍN, Jan. Ropa - vlastnosti, rozdělení a obchodování. *OEnergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/ropa-prumysl/ropa-vlastnosti-rozdeleni-aobchodovani/>
- [4] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 2. přeprac. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02591-8.
- [5] HOLMGREN, Magnus. *X-Steam Tables 2.6*. Excel Steam Tables [software]
- [6] JAHODA, M., O. HOLEČEK a L. SCHREIBEROVÁ. Ústav chemického inženýrství VŠCHT Praha. *Vscht.cz* [online]. [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: [https://vscht.cz/uchi/e\\_tabulky/tepvods.html](https://vscht.cz/uchi/e_tabulky/tepvods.html)
- [7] JUCHELKOVÁ, Dagmar, KOPPE, Klaus: Odpady, vedlejší produkty nebo alternativní paliva?. *Biom.cz* [online]. 2002-01-15 [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/odpady-vedlejsi-produkty-nebo-alternativni-paliva>. ISSN: 1801-2655
- [8] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Závěrečný projekt: Výpočet tepelných turbín a jejich příslušenství*. Brno: Ediční středisko Vysokého učení technického, 1987
- [9] POLACH, Vladislav. *Parní kotle* [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: [https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01\\_Stavba-a-provoz-stroju\\_1-3/1\\_IUT/005\\_Parn-kotle---Polach---P0.pdf](https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/005_Parn-kotle---Polach---P0.pdf)
- [10] Spalování - Analyzátoři spalín. *Analyzátoři spalín* [online]. [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.analyzatoryspalin.cz/spaliny/>



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$\alpha$	Součinitel přestupu tepla	$W/m^2 \cdot K$
$a$	Poměrná přímá rozteč	–
$a_u$	Poměrný úlet popílku z ohniště	–
$b$	Poměrná podélná rozteč	–
$c_p$	Měrná tepelná kapacita	$J/m^3 \cdot K$ $J/kg \cdot K$
$C^r$	Obsah uhlíku v surovém palivu	%
$\delta$	Tloušťka stěny	m
$d_1$	Vnitřní průměr	m
$d_2$	Vnější průměr	m
$\epsilon$	Korekční součinitel respektující vliv počátečního úseku	–
$f$	Součinitel vlhkosti vzduchu	–
$f_A$	Korekční součinitel pro zákrytové uspořádání svazku	–
$h$	Měrná entalpie	$kJ/m_N^3$ $kJ/kg$
$H^r$	Obsah vodíku v surovém palivu	%
$k$	Součinitel prostupu tepla	$W/m \cdot K$
$\lambda$	Tepelná vodivost	$W/m \cdot K$
$l$	Charakteristický rozměr	m
$L$	Délka trubky	m
$\dot{m}$	Hmotnostní tok	kg/s
$\nu$	Kinematická viskozita	$m^2/s$
$n$	Počet řad	–
$N^r$	Obsah dusíku v surovém palivu	%
$Nu$	Nusseltovo číslo	–
$O$	Množství složek spalín v palivu	$m^3/kg$
$O^r$	Obsah kyslíku v surovém palivu	%
$\Delta p$	Tlaková ztráta	Pa
$Pr$	Prandtlovo číslo	–
$Q$	Teplo	W
$Q_i^r$	Výhřevnost	kJ/kg
$Q_s$	Spalné teplo	kJ/kg
$\rho$	Hustota	$kg/m^3$
$Re$	Reynoldsovo číslo	–
$S$	Průtočný průřez	$m^2$
$S^r$	Obsah síry v surovém palivu	%
$s_1$	Příčná rozteč	mm
$s_2$	Podélná rozteč	mm

$\tau$	Součinitel zohledňující velikost příčné rozteče	—
$t_{11}$	Teplota páry na vstupu	°C
$t_{12}$	Teplota páry na výstupu	°C
$t_{21}$	Teplota spalín na vstupu	°C
$t_{22}$	Teplota spalín na výstupu	°C
$w$	Rychlost proudění	m/s
$W^r$	Obsah vody v surovém palivu	%
$\zeta_{sv}$	Ztrátový součinitel svazku	—

## **SEZNAM OBRÁZKŮ**

- Obrázek 3.1 Závislost měrné tepelné kapacity složek spalín na teplotě
- Obrázek 3.2 Závislost měrné entalpie složek spalín na teplotě
- Obrázek 3.3 Spaliny - závislost tep. vodivosti, kin. viskozity na teplotě
- Obrázek 3.4 Vzduch - závislost tep. vodivosti, kin. viskozity na teplotě
- Obrázek 4.1 Nákres jedné řady přehříváku páry
- Obrázek 4.2 Nákres směru proudění páry a spalín v přehříváku
- Obrázek 4.3 Schéma přehříváku páry rozděleného na elementy
- Obrázek 4.4 Detailní výpočet v programu MS Excel
- Obrázek 4.5 Průběh teploty páry
- Obrázek 4.6 Průběh teploty spalín

## **SEZNAM TABULEK**

- Tabulka 3.1 Objemové složení suchého vzduchu [4]
- Tabulka 3.2 Měrná tepelná kapacita složek spalin [2]
- Tabulka 3.3 Entalpie složek spalin v závislosti na teplotě [2]
- Tabulka 3.4 Spaliny – tep. kapacita, kin. viskozita, Prandtl. číslo v závislosti na teplotě [2]
- Tabulka 3.5 Vzduch – tep. kapacita, kin. viskozita, Prandtl. číslo v závislosti na teplotě [2] [4]
- Tabulka 4.1 Složení paliva [7]
- Tabulka 4.2 Zadané údaje
- Tabulka 4.3 Kin. viskozita, tep. vodivost, Prandtl. číslo páry pro teplotu 180 °C
- Tabulka 4.4 Kin. viskozita, tep. vodivost, Prandtl. číslo spalin pro teplotu 500 °C
- Tabulka 4.5 Vlastnosti páry pro teplotu 180 °C pro výpočet výstupní teploty
- Tabulka 4.6 Vlastnosti spalin pro teplotu 500 °C pro výpočet výstupní teploty
- Tabulka 4.7 Výsledné hodnoty rychlostí a teplot médií
- Tabulka 4.8 Tlakové ztráty pro podélné proudění páry
- Tabulka 4.9 Tlakové ztráty pro příčné proudění spalin

## **SEZNAM PŘÍLOH**

- 1 Výpočet v programu Microsoft Office Excel na CD