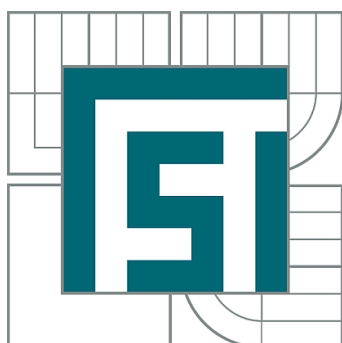


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V  
BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF ENERGY

## KOTEL NA SPALOVÁNÍ SMRKOVÉ KŮRY – 18t/h

STEAM BOILER FOR SPRUCE BARK BURNING-18t/h

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Lukáš Dračka

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK SKÁLA CSc.

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**

---

---

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student: Bc. Lukáš Dračka

který studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

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

**Kotel na spalování smrkové kůry-18t/h**

v anglickém jazyce:

**Steam boiler for spruce bark burning-18t/h**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhnout parní kotel a provést tepelný výpočet.

Parametry kotle: Výkon kotle 18t/h, přehřátá pára 4,2MPa, 450°C, teplota nap. vody 105°C

palivo:  $Q_{ir}=8,6\text{MJ/kg}$ ,  $W_r=50\%$ ,  $A_r=1,25\%$

Cíle diplomové práce:

Návrh kotle, řazení výhřevných ploch včetně základních dimenzí, výpočtový projekt – základní výkres kotle.

---

Seznam odborné literatury:

Dlouhý, T: Parní kotle, podklady pro tepelný výpočet, skriptum ČVUT Praha  
Černý, Janeba, Teysler: Parní kotel, technický průvodce Praha SNTL0192

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 20011/12.

V Brně, dne 11.1.2012

L.S

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

---

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**

---

**Abstrakt**

Cílem diplomové práce je navrhnout roštový kotel s přirozenou cirkulací na spalování smrkové kůry o výkonu 18t/h. Po vypracování stechiometrických výpočtů z dodaného prvkového rozboru paliva byly spočítány jednotlivé části kotle a jejich teplosměnné plochy, tak aby kotel splňoval zadané parametry: výkon kotle, tlak a teplotu přehřáté páry.

**Abstract**

To design a grate boiler with a natural circulation for burning of a pine bark with an output 18t/h is a primary objective of this dissertation. Individual parts of a boiler and its heat transferring surfaces were calculated after the working out of stoichiometric calculations from given element analysis of fuel. All computations have to fulfill several parameters: boiler output, temperature and pressure of an overheated steam.

**Klíčová slova:**

parní kotel, přehřívák, výparník, ekonomizér, smrková kůra

**Key words:**

Steam-boiler, super heater, evaporator, economizer, spruce bark

---

**Bibliografická citace mé práce:**

DRAČKA, L. *Kotel na spalování smrkové kůry-18t/h*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 140 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc..

---

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „*Kotel na spalování smrkové kůry 18t/h*“ jsem vypracoval samostatně, s pomocí vedoucího diplomové práce doc. Ing. Zdeňka Skály CSc. a konzultanta Ing. Pavla Křemínského, dále s pomocí odborné literatury a dalších zdrojů uvedených v závěru této práce.

V Brně dne 20. 5. 2012

Lukáš Dračka

---

**Poděkování:**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Skálovi CSc. a panu Ing. Pavlu Křemínskému za odborné vedení, užitečné rady a praktické připomínky při řešení jednotlivých kroků při výpočtu a také za poskytnutí potřebných podkladů.

V Rychnově nad Kněžnou  
dne 20. května 2012

Bc. Lukáš Dračka

---

---

**OBSAH**

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>11</b>
1.1	Technický popis kotle	11
1.2	Zadání kotle	12
<b>2</b>	<b>STECHEMIOMETRICKÉ VÝPOČTY</b>	<b>12</b>
2.1	Minimální objemy vzduchu a spalin	12
2.2	Hustota vzduchu a spalin	15
2.3	Entalpie vzduchu a spalin	16
<b>3</b>	<b>TEPELNÁ BILANCE KOTLE</b>	<b>19</b>
3.1	Předběžná volba následujících parametrů	19
3.2	Teplo přivedené do kotle na 1kg tuhého paliva	19
3.3	Ztráty a tepelná účinnost kotle	20
3.4	Výrobní teplo páry a množství paliva	22
<b>4</b>	<b>VÝPOČET SPALOVACÍ KOMORY</b>	<b>22</b>
4.1	Výpočet rozměrů spalovací komory	22
4.2	Teplota nechlazeného plamene	25
4.3	Stupeň černosti plamene	26
4.4	Stupeň černosti ohniště	28
4.5	Boltzmanovo číslo	28
4.6	Určení rozdělení tepla v ohništi	30
<b>5</b>	<b>ROZVRŽENÍ TEPELNÉHO VÝKONU KOTLE NA VÝHŘEVNÉ PLOCHY</b>	
5.1	Výkon ohříváku vody (EKO)	31
5.2	Výkon výparníku	31
5.3	Výkon závěsných trubek	32
5.4	Výkon přehříváků	32
5.5	Kontrola tepelného výkonu všech ploch	34
5.6	Rozvržení tepelné bilance jednotlivých částí kotle	34
	5.6.1 <i>Tepelná bilance ohříváku vzduchu</i>	34
	5.6.2 <i>Tepelná bilance ohříváku vody (EKO)</i>	35
	5.6.3 <i>Tepelná bilance přehříváku páry PP1</i>	35
	5.6.4 <i>Tepelná bilance přehříváku páry PP2</i>	36
	5.6.5 <i>Tepelná bilance přehříváku páry PP3</i>	37
<b>6</b>	<b>VÝPOČET MŘÍŽE</b>	<b>39</b>
6.1	Součinitel přestupu tepla	40
6.2	Bilance tepla na straně spalin v mříži	44
<b>7</b>	<b>VÝPOČET II. TAHU KOTLE</b>	<b>45</b>
7.1	Geometrie II. Tahu	45
7.2	Výpočet membránové stěny	46
7.3	Bilance tepla na straně spalin v II. Tahu	51
<b>8</b>	<b>VÝPOČET VÝSYPKY MEZI II. A III. TAHEM</b>	<b>51</b>
8.1	Geometrie výsypky	51
8.2	Výpočet membránové stěny	52
8.3	Bilance tepla na straně spalin ve výsypce	58
<b>9</b>	<b>VÝPOČET III. TAHU</b>	<b>58</b>
9.1	Výpočet 1. části III. tahu	58
	9.1.1 <i>Přehřívák III</i>	59
	9.1.2 <i>Geometrie III. tahu</i>	60

---

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**

	9.1.3	<i>Výpočet přehříváku III</i>	62
	9.1.4	<i>Výpočet membránové stěny</i>	66
	9.1.5	<i>Výpočet závěsných trubek</i>	70
	9.1.6	<i>Přepočet teploty spalin na výstupu z 1. části III. tahu</i>	75
9.2		Výpočet 2. části III. tahu	76
	9.2.1	<i>Přehřívák II</i>	76
	9.2.2	<i>Výpočet přehříváku II</i>	78
	9.2.3	<i>Výpočet membránové stěny</i>	83
	9.2.4	<i>Výpočet závěsných trubek</i>	87
	9.2.5	<i>Přepočet teploty spalin na výstupu z 2. části III. tahu</i>	92
9.3		Výpočet 3. části III. tahu	93
	9.3.1	<i>Přehřívák I</i>	93
	9.3.2	<i>Geometrie III. tahu</i>	94
	9.3.3	<i>Výpočet přehříváku I</i>	95
	9.3.4	<i>Výpočet membránové stěny</i>	100
	9.3.5	<i>Výpočet závěsných trubek</i>	104
	9.3.6	<i>Přepočet teploty spalin na výstupu z 3. části III. tahu</i>	109
<b>10</b>		<b>VÝPOČET IV. A V. TAHU</b>	<b>109</b>
10.1		Výpočet EKA	109
	10.1.1	<i>Geometrie IV. tahu</i>	110
	10.1.2	<i>Přepočet teploty spalin na výstupu EKA II ve IV. tahu</i>	114
10.2		Výpočet ideálního okruhu vzduchu	114
10.3		Výpočet ohříváku vzduchu II (sekundární vzduch)	115
	10.3.1	<i>Geometrie IV. tahu</i>	116
	10.3.2	<i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin</i>	118
	10.3.3	<i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu</i>	119
10.4		Výpočet EKA I	121
	10.4.1	<i>Geometrie IV. tahu</i>	122
	10.4.2	<i>Přepočet teploty spalin na výstupu EKA I ve IV. Tahu</i>	125
10.5		Výpočet ohříváku vzduchu I (primární vzduch)	126
	10.5.1	<i>Geometrie V. tahu</i>	127
	10.5.2	<i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin</i>	130
	10.5.3	<i>Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu</i>	131
<b>11</b>		<b>KONTROLY</b>	<b>134</b>
11.1		Kontrola výkonu výparníku	134
11.2		Kontrola výkonu kotle	134
<b>12</b>		<b>ZÁVĚR</b>	<b>135</b>
<b>13</b>		<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b>	<b>136</b>
<b>14</b>		<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>139</b>
<b>15</b>		<b>SEZNAM POŽITÉ LITERATURY</b>	<b>140</b>

---

# 1 ÚVOD

## 1.1 Technický popis kotle

Jedná se o roštový kotel s přirozenou cirkulací na spalování smrkové kůry. Použitý rošt je vzduchem chlazený tzv. rotograte dodán firmou DSC. Kotel je koncipován jako pět tahový, kde první tři tahy jsou chlazené membránovou stěnou s trubkami o průměru 60 mm a roztečí 90 mm, proto ve III. tahu v boční stěně budou tyto trubky mírně vyhnuty do strany kvůli přehřívákům. Zbývající dva tahy už jsou pouze z plechového kanálu kvůli menším teplotám spalin.

Ze spalovací komory procházejí spaliny přes mříž do druhého tahu, kde z důvodu vysokých teplot nejsou umístěny žádné svazky jen s membránovými stěnami. Mezi II., III. a IV., V. tahem jsou umístěny výsyvky. Ty mají za úkol pomocí šnekových dopravníků vracet nashromážděný popel zpět do spalovací komory.

Ve III. tahu jsou na chlazených závěsech tři přehříváky páry. Mezi druhým a třetím je situován vstřík napájecí vody, kterým regulují výstupní teplotu páry a kterým je zároveň prováděno dokonalé smíšení. Na nechlazených závěsech ve IV. a V. tahu se nacházejí ohříváky vody a vzduchu, které jsou řazeny tak, aby se co nejefektivněji využilo teplo spalin.

Aby docházelo k dokonalému spálení paliva, které má poměrně vysoký obsah vlhkosti, je do kotle přiváděn primární a sekundární vzduch, který je zapojen do tzv. ideálního vzduchového okruhu. Do prvního ohříváku vzduchu, což je poslední plocha na kotli, přivádíme vzduch o teplotě 50°C. Toto ohřátí je z ekonomických důvodů prováděno mícháním nasávaného vzduchu z kotelny s již ohřátým vzduchem. Ohříváky vzduchu budou řešeny následně:

10% vzduchu jde do spalovací komory pohazováním paliva,

45% vzduchu je jako sekundární a do spalovací komory vstupuje dýzami z přední a zadní stěny, teplota je 240°C,

45% vzduchu je jako primární a do spalovací komory vstupuje ze spodní části roštu, vzhledem ke spalování vlhkého paliva by byla ideální také teplota 240°C, ale roštnice přes které jde primární vzduch, by se nestíhali chladit, proto se tento vzduch ohřívá pouze na 200°C.

Ekonomizér je rozdělen na dva svazky umístěné ve IV. tahu kotle a spojené tzv. by pass, pomocí kterých se reguluje odchozí teplota spalin, která může být pohyblivá díky obsahu vody v palivu.

Mezi jednotlivými svazky jsou umístěny parní ofukovače a otvory pro obsluhu. Ofukovače jsou vždycky umístěny před a za svazkem, aby docházelo k dokonalému očištění svazku od nalepeného popela a nečistot. Samozřejmostí jsou i prvky, které chrání jednotlivé svazky před těmito ofukovači. V případě ekonomizéru je to navaření tzv. pancéřování a v případě ohříváku vzduchu jsou vždy dvě první a poslední řady zesíleny.

## 1.2 Zadání kotle

Navrhněte roštový kotel s přirozenou cirkulací na spalování smrkové kůry:

Parametry kotle: výkon kotle 18t/h, tlak přehřáté páry 4,2 MPa, teplota přehřáté páry 480°C, teplota napájecí vody 105°C.

### Procentuální zastoupení prvků

Smrková kůra:

$$Q_i^r = 8,6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$W^r = 50\%$$

$$A^r = 1,25\%$$

Prvkový obsah:

$$C^r = 25,84\%$$

$$H^r = 3,07\%$$

$$O^r = 19,58\%$$

$$N^r = 0,24\%$$

$$S^r = 0,02\%$$

$$Cl^r \text{ max } 0,02\%$$

$$h^r + A^r + W^r = 100\% \Rightarrow h^r = 100 - A^r - W^r = \underline{\underline{48,75\%}}$$

## 2 STECHIOMETRICKÉ VÝPOČTY

### 2.1 Minimální objemy vzduchu a spalin

Minimální množství kyslíku ke spálení 1kg paliva:

Vypočtené objemy se označují jako minimální a jsou vyjádřeny v  $\text{Nm}^3$  na kg 1 spáleného paliva. Jednotka  $\text{Nm}^3$  je metr krychlový při normálních podmínkách ( $T_N = 273\text{K}$ ,  $p_N = 101,325\text{kPa}$ ).

$$O_{O_2 \min} = 22,39 \cdot \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S_{prch}^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right)$$

$$O_{O_2 \min} = 22,39 \cdot \left( \frac{0,2584}{12,01} + \frac{0,0307}{4,032} + \frac{0,0002}{32,06} - \frac{0,1958}{32} \right) \quad [2.1-1]$$

$$\underline{\underline{O_{O_2 \min} = 0,51 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1kg paliva:

$$O_{VS \min} = \frac{O_{O_2 \min}}{0,21}$$

$$O_{VS \min} = \frac{0,51}{0,21} \quad [2.1-2]$$

$$\underline{\underline{O_{VS \min} = 2,45 Nm^3 \cdot kg^{-1}}}$$

**Tab. 1 Objemové složení suchého vzduchu<sup>1</sup>**

Složka	Objemový podíl [-]
Kyslík $O_2$	0,2100
Dusík $N_2$	0,7808
Argon Ar (včetně vzácných plynů)	0,0092
Oxid uhličitý $CO_2$	0,0003

Podíl vodní páry na 1 Nm<sup>3</sup> suchého vzduchu

$$\chi_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} \quad [-] \quad [2.1-3]$$

$\varphi$  [%] relativní vlhkost vzduchu

$p''$  [MPa] parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro teplotu  $t_v$

$p_c$  [MPa] celkový tlak 0,1MPa

Pro běžné konstrukční a klimatické podmínky odpovídající  $\varphi = 70\%$  a teplotě  $t_v = 20^\circ C$  je možno zvolit  $\chi_v = 1,016$

Minimální objem vlhkého vzduchu ke spálení 1kg paliva

$$O_{VV \min} = \chi_v \cdot O_{VS \min}$$

$$O_{VV \min} = 1,016 \cdot 2,45 \quad [2.1-4]$$

$$\underline{\underline{O_{VV \min} = 2,49 Nm^3 \cdot kg^{-1}}}$$

Objem vodní páry v tomto objemu

$$O_{H_2O}^V = O_{VV \min} - O_{VS \min} = (\chi_v - 1) \cdot O_{VS \min}$$

$$O_{H_2O}^V = (1,016 - 1) \cdot 2,45 \quad [2.1-5]$$

$$\underline{\underline{O_{H_2O}^V = 0,04 Nm^3 \cdot kg^{-1}}}$$

Minimální množství suchých spalin z 1kg paliva

<sup>1</sup> tab. 1 z: Ing. Tomáš Dlouhý, CSc., Výpočty kotlů a spalinových výměníků

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**

$$\begin{aligned}
 O_{SS\min} &= O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \\
 O_{SS\min} &= 0,48 + 0,00014 + 1,91 + 0,02 \quad [2.1-6] \\
 \underline{\underline{O_{SS\min} &= 2,41 Nm^3 \cdot kg^{-1}}}
 \end{aligned}$$

-objem CO<sub>2</sub>

$$\begin{aligned}
 O_{CO_2} &= \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VS\min} \\
 O_{CO_2} &= \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,2584 + 0,0003 \cdot 2,45 \\
 \underline{\underline{O_{CO_2} &= 0,48 Nm^3 \cdot kg^{-1}}}
 \end{aligned}$$

-objem Ar

$$\begin{aligned}
 O_{Ar} &= 0,0092 \cdot O_{VS\min} \\
 O_{Ar} &= 0,0092 \cdot 2,45 \\
 \underline{\underline{O_{Ar} &= 0,02 Nm^3 \cdot kg^{-1}}}
 \end{aligned}$$

-objem SO<sub>2</sub>

$$\begin{aligned}
 O_{SO_2} &= \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r \\
 O_{SO_2} &= \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0002 \\
 \underline{\underline{O_{SO_2} &= 0,00014 Nm^3 \cdot kg^{-1}}}
 \end{aligned}$$

-objem N<sub>2</sub>

$$\begin{aligned}
 O_{N_2} &= \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot O_{VS\min} \\
 O_{N_2} &= \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0024 + 0,7805 \cdot 2,45 \\
 \underline{\underline{O_{N_2} &= 1,91 Nm^3 \cdot kg^{-1}}}
 \end{aligned}$$

Jednotlivé dílčí výpočty objemů plynů můžeme dosadit do vzorce 2.1.1-6 a spočítat minimální množství suchých spalín.

Minimální objem vodní páry

$$\begin{aligned}
 O_{H_2O}^S &= \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + O_{H_2O}^V \\
 O_{H_2O}^S &= \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,0307 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,5 + 0,04 \quad [2.1-7] \\
 \underline{\underline{O_{H_2O}^S &= 1,002 Nm^3 \cdot kg^{-1}}}
 \end{aligned}$$

Minimální objem vlhkých spalín

$$\begin{aligned}
 O_{SV\min} &= O_{SS\min} + O_{H_2O}^S \\
 O_{SV\min} &= 2,41 + 1,002 \quad [2.1-8] \\
 \underline{\underline{O_{SV\min} &= 3,42 Nm^3 \cdot kg^{-1}}}
 \end{aligned}$$

Objem spalín z 1kg paliva s přebytkem vzduchu

Součinitel přebytku spalovacího vzduchu volím  $\alpha = 1,3$

$$\begin{aligned}
 O_{SV} &= O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min} \\
 O_{SV} &= 3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49 & [2.1-9] \\
 \underline{\underline{O_{SV} &= 4,16 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}}
 \end{aligned}$$

## 2.2 Hustota vzduchu a spalin

### Hustota vzduchu

$$\begin{aligned}
 \rho_{VV} &= \frac{O_{VS \min} \cdot \rho_{VS} + (\chi_V - 1) \cdot O_{VS \min} \cdot \rho_{H_2O}}{O_{VV \min}} \\
 \rho_{VV} &= \frac{2,45 \cdot 1,29 + (1,016 - 1) \cdot 2,45 \cdot 0,81}{2,49} & [2.2-1] \\
 \underline{\underline{\rho_{VV} &= 1,28 \text{ kg} \cdot \text{Nm}^{-3}}}
 \end{aligned}$$

### Hustota stechiometrických spalin

$$\begin{aligned}
 \rho_{SV \min} &= \frac{\sum_i O_i \cdot \rho_i}{O_{SV \min}} \\
 \rho_{SV \min} &= \frac{O_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot \rho_{SO_2} + O_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + O_{Ar} \cdot \rho_{Ar} + O_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}}{O_{SV \min}} & [2.2-2] \\
 \rho_{SV \min} &= \frac{0,48 \cdot 1,98 + 0,00014 \cdot 2,93 + 1,91 \cdot 1,25 + 0,02 \cdot 1,78 + 1,002 \cdot 0,81}{3,42} \\
 \underline{\underline{\rho_{SV \min} &= 1,22 \text{ kg} \cdot \text{Nm}^{-3}}}
 \end{aligned}$$

### Hustota spalin s přebytkem vzduchu $\alpha$

$$\begin{aligned}
 \rho_{SV} &= \frac{O_{SV \min} \cdot \rho_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min} \cdot \rho_{VV}}{O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min}} \\
 \rho_{SV} &= \frac{3,42 \cdot 1,23 + (1,3 - 1) \cdot 2,49 \cdot 1,28}{3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49} & [2.2-3] \\
 \underline{\underline{\rho_{SV} &= 1,24 \text{ kg} \cdot \text{Nm}^{-3}}}
 \end{aligned}$$

## 2.3 Entalpie vzduchu a spalin

úlet popílku  $a_{\dot{u}} = 50\%$

Výpočet pro 25°C

## Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h

$$I_S^{t,\alpha} = I_{S\min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{V\min}^t$$

$$I_S^{t,\alpha} = 121,84 + (1,3 - 1) \cdot 81,36 \quad [2.3-1]$$

$$\underline{\underline{I_S^{t,\alpha} = 146,25 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

$$I_{S\min}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^t + a_u \cdot A^r \cdot i_{pop}^t$$

$$I_{S\min}^t = 0,48 \cdot 41,62 + 0,00014 \cdot 46,81 + 1,91 \cdot 32,53 + 0,02 \cdot 23,32 + 1,002 \cdot 39,10 + 0,50 \cdot 0,0125 \cdot 20,20$$

$$\underline{\underline{I_{S\min}^t = 121,84 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

[2.3-2]

$$I_{V\min}^t = O_{VS\min} \cdot i_{VS}^t + O_{H_2O}^V \cdot i_{H_2O}^t$$

$$I_{V\min}^t = 2,45 \cdot 32,57 + 0,04 \cdot 39,1 \quad [2.3-3]$$

$$\underline{\underline{I_{V\min}^t = 81,36 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Vypočtené hodnoty entalpií vzduchu a produktů spalování v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu jsou v tabulce 2.

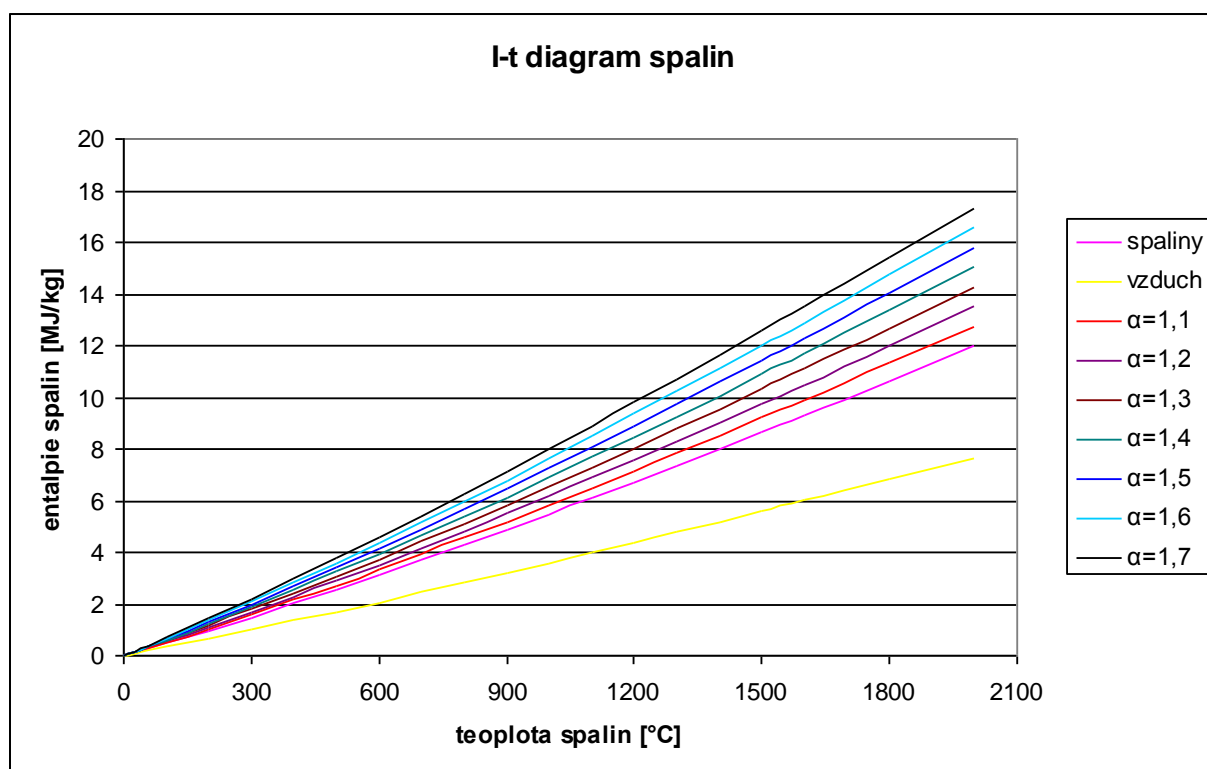
**Tab. 2 Měrné entalpie některých složek spalin**

t	CO2	SO2	N2	Ar	H2O	Such. Vzduch	popílek
25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,1	32,57	20,2
100	170	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3	80,4
200	357,5	394,1	259,9	186	304,5	266,2	170
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	264,6
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	361,6
500	994,4	1070	664	464,7	794,5	684,1	459,5
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6	558
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1	658,3
800	1705	1801	1093	743,2	1335	1129	760,8
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1283	868,4
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1439	982,8
1100	1458	2540	1544	1020	1925	1597	1106
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1756	1240
1300	2976	3063	1853	1207	2344	1919	1386
1400	3239	3323	2009	1300	2559	2077	1543
1500	3503	3587	2166	1393	2779	2240	1710
1600	3769	3838	2325	1577	3002	2403	2061
1800	4305	4363	2643	1742	3458	2732	2381
2000	4844	4890	2965	1857	3925	3065	2500

## Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h

Tab. 3 I-t tabulka vzduchu a produktů spalování

t [°C]	$I_{S\min}^t$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$I_{V\min}^t$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	$I_S^{t,\alpha} = I_{S\min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{V\min}^t$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]						
			$\alpha=1,1$	$\alpha=1,2$	$\alpha=1,3$	$\alpha=1,4$	$\alpha=1,5$	$\alpha=1,6$	$\alpha=1,7$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	122	81	130	138	146	154	163	171	179
100	482	330	515	548	581	614	647	680	713
200	978	664	1044	1111	1177	1244	1310	1377	1443
300	1488	1005	1589	1689	1790	1890	1990	2091	2191
400	2013	1352	2149	2284	2419	2554	2690	2825	2960
500	2554	1708	2725	2896	3066	3237	3408	3579	3749
600	3110	2071	3317	3524	3731	3938	4145	4353	4560
700	3680	2442	3924	4168	4412	4657	4901	5145	5389
800	4264	2819	4546	4827	5109	5391	5673	5955	6237
900	4859	3204	5179	5500	5820	6141	6461	6781	7102
1000	5468	3594	5827	6187	6546	6905	7265	7624	7984
1100	6085	3990	6484	6883	7282	7681	8080	8479	8878
1200	6714	4387	7152	7591	8030	8469	8907	9346	9785
1300	7350	4788	7828	8307	8786	9265	9744	10222	10701
1400	7992	5191	8511	9030	9549	10069	10588	11107	11626
1500	8642	5599	9202	9762	10322	10882	11442	12002	12562
1600	9303	6007	9904	10504	11105	11706	12307	12907	13508
1800	10630	6832	11313	11996	12679	13362	14046	14729	15412
2000	11975	7666	12741	13508	14274	15041	15808	16574	17341



Obr. 1 I-t diagram spalín

### 3 TEPELNÁ BILANCE KOTLE

#### 3.1 Předběžná volba následujících parametrů

Rozdělení tlakových ztrát:

Tlaková ztráta v Přehříváku III	$\Delta p_{pp3} = 0,1MPa$
Tlaková ztráta v Přehříváku II	$\Delta p_{pp2} = 0,1MPa$
Tlaková ztráta v Přehříváku I	$\Delta p_{pp1} = 0,1MPa$
Tlaková ztráta v závěsných trubkách	$\Delta p_{zt} = 0,05MPa$
Tlaková ztráta ve výparníku	$\Delta p_b = 0MPa$
Tlaková ztráta v ekonomizéru	$\Delta p_{nv} = 0,2MPa$

Rozdělení přísávání falešného vzduchu do kotle je v dnešní době zanedbatelné. Dnes kdy je těsnění kotle lepší, můžeme přísávání v ostatních tazích kotle použít minimální (žádné). Pro počet v celém spalinovém kanále jsem zvolil:

přebytek vzduchu za kotlem	$\alpha_K = 1,3$
teplota přísávaného vzduchu	$t_v = 25^\circ C$
entalpie přísávaného vzduchu	$I_v = 81kJ \cdot kg^{-1}$
teplota spalin za kotlem zvolena	$t_{sk} = 140^\circ C$
entalpie spalin za kotlem pro $\alpha_K$	$I_{sk} = 819,4kJ \cdot kg^{-1}$

#### 3.2 Teplo přivedené do kotle na 1kg tuhého paliva

$$Q_{ired} = Q_i^r + i_{pv} + Q_{CZ} + Q_{pr} + Q_S^{\frac{1}{3}}$$

$$Q_{ired} = 8600 + 56,4 + 0 \quad [3.2-1]$$

$$\underline{\underline{Q_{ired} = 8656,4kJ \cdot kg^{-1}}}$$

Fyzické teplo paliva

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv} = 2,82 \cdot 20 = \underline{\underline{56,4kJ \cdot kg^{-1}}} \quad [3.2-2]$$

$i_p$  - se uvažuje, pokud je splněno:

$$W^r \geq \frac{Q_i^r}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \quad W^r \geq \frac{8600}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \quad [3.2-3]$$

$$\underline{\underline{50 \geq 13,68\% \Rightarrow t_p = 20^\circ C}}$$

Měrné teplo paliva

$$c_p = c_w \cdot \frac{W^r}{100} + c_{SU} \cdot \frac{100 - W^r}{100} = 4,19 \cdot \frac{50}{100} + 1,45 \cdot \frac{100 - 50}{100} = \underline{\underline{2,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}} \quad [3.2-4]$$

$$c_w = 4,19 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad \text{-měrné teplo vody}$$

$$c_{SU} = 1,45 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad \text{-měrné teplo sušiny paliva}$$

**3.3 Ztráty a tepelná účinnost kotle**

Při spalování tuhých paliv se obvykle uvažuje pět základních ztrát:

- ztráta mechanickým nedopalem  $Z_C$
- ztráta chemickým nedopalem  $Z_{CO}$
- ztráta sáláním a vedením tepla do okolí  $Z_{SV}$
- ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků  $Z_f$
- ztráta citelným teplem spalin (komínová)  $Z_K$

Ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_C = Z_{CS} + Z_{CP} + Z_{CÚ} + Z_{CR} + Z_{CB}$$

$$Z_C = 0,23 + 0,18 + 0,004$$

[3.3-1]

$$Z_C = \underline{\underline{0,414\%}}$$

$$Z_{CS} = \frac{c_S}{100 - c_S} \cdot \frac{x_S}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{CS}$$

$$Z_{CS} = \frac{7}{100 - 7} \cdot \frac{65}{100} \cdot \frac{1,25}{8656,4} \cdot 32600$$

$$\underline{\underline{Z_{CS} = 0,23\%}}$$

$$Z_{CU} = \frac{c_U}{100 - c_U} \cdot \frac{x_u}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{CU}$$

$$Z_{CU} = \frac{11}{100 - 11} \cdot \frac{32}{100} \cdot \frac{1,25}{8656,4} \cdot 32600$$

$$\underline{\underline{Z_{CU} = 0,18\%}}$$

$$Z_{CR} = \frac{c_R}{100 - c_R} \cdot \frac{x_R}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{CR}$$

$$Z_{CR} = \frac{3}{100 - 3} \cdot \frac{3}{100} \cdot \frac{1,25}{8656,4} \cdot 32600$$

$$\underline{\underline{Z_{CR} = 0,004\%}}$$

Ztráta chemickým nedopalem

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{SS\min}}{(21 - O_{2ref}) \cdot Q_{ired}}$$

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot 400 \cdot 2,41}{(21 - 11) \cdot 8656} \quad [3.3-2]$$

$$\underline{\underline{Z_{CO} = 0,0023}}$$

Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

$$Z_{SV} = 1,3\% \quad \text{-pro hliníkový nátěr oplechování}$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot \left( \frac{x_S}{100 - C_S} \cdot c_S \cdot t_S + \frac{x_R}{100 - C_R} \cdot c_R \cdot t_R \right)$$

$$Z_f = \frac{1,25}{8656,4} \cdot \left( \frac{65}{100 - 7} \cdot 1,01 \cdot 600 + \frac{3}{100 - 3} \cdot 1,01 \cdot 600 \right) \quad [3.3-3]$$

$$\underline{\underline{Z_f = 0,006\%}}$$

Ztráta citelným teplem spalín (komínová ztráta)

- teplota spalín za kotlem zvolena předběžně na  $t_{Sk} = 140^\circ C$
- entalpie spalín za kotlem pro  $\alpha I_{Sk} = 819,4 kJ \cdot kg^{-1}$

$$Z_K = (100 - z_C) \cdot \frac{I_S^{t_k, \alpha_k} - I_S^{t_{vz}, \alpha_k}}{Q_{ired}}$$

$$Z_K = (100 - 0,414) \cdot \frac{819,4 - 146}{8656,4} \quad [3.3-4]$$

$$\underline{\underline{Z_K = 7,75\%}}$$

Tepelná účinnost kotle

$$\eta_K = 100 - \sum Z_i$$

$$\eta_K = 100 - (Z_K + Z_{CO} + Z_{SV} + Z_C + Z_f)$$

$$\eta_K = 100 - (7,75 + 0,0023 + 1,3 + 0,414 + 0,006) \quad [3.3-5]$$

$$\underline{\underline{\eta_K = 90,51\%}}$$

### 3.4 Výrobní teplo páry a množství paliva

Parní výkon kotle

$$m_{pp} = 18t \cdot h^{-1} = 5kg \cdot s^{-1}$$

Entalpie dle parních tabulek:

Entalpie přehřáté páry při tlaku 4,2Mpa a teplotě 480°C  
teplota napájecí vody 105°C a entalpie napájecí vody

$$i_{pp} = 3397,76kJ \cdot kg^{-1}$$

$$i_{nv} = 443,7kJ \cdot kg^{-1}$$

entalpie vody v bubnu

$$i_b = 1125,6kJ \cdot kg^{-1}$$

Odhadnuté množství odluhu  $M_o = 0,01 \cdot M_{pp}$

$$M_o = 0,05kg \cdot s^{-1}$$

#### Výrobní teplo páry

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_o \cdot (i_b - i_{nv})$$

$$Q_v = 5 \cdot (3397,76 - 443,7) + 0,05 \cdot (1125,6 - 443,7) \quad [3.4-1]$$

$$\underline{\underline{Q_v = 14804,4kW}}$$

#### Množství paliva přivedeného do kotle

$$M_{Pal} = \frac{Q_v}{Q_{ired} \cdot \frac{\eta_K}{100}}$$

$$M_{Pal} = \frac{14804,4}{8656,4 \cdot \frac{90,51}{100}} \quad [3.4-2]$$

$$\underline{\underline{M_{Pal} = 1,89kg \cdot s^{-1}}}$$

#### Množství skutečně spáleného paliva (výpočtově)

$$M_{pv} = M_{Pal} \cdot \left(1 - \frac{z_c}{100}\right)$$

$$M_{pv} = 1,89 \cdot \left(1 - \frac{0,414}{100}\right) \quad [3.4-3]$$

$$\underline{\underline{M_{pv} = 1,88kg \cdot s^{-1}}}$$

## 4 VÝPOČET SPALOVACÍ KOMORY

### 4.1 Výpočet rozměrů spalovací komory

Tepelné zatížení volím v souladu s předešlou konzultací na základě odborných zkušeností konzultanta.

Předběžný průřez ohniště

$$q_s = \frac{M_{Pal} \cdot Q_i^r}{S_o}$$

$$S_o = \frac{M_{Pal} \cdot Q_i^r}{q_s}$$

$$S_o = \frac{1,89 \cdot 8600}{2000}$$

$$\underline{\underline{S_o = 8,127m^2}}$$

[4.1-1]

$$q_s = 2000kW \cdot m^{-2} \quad \text{-tepelné zatížení roštu}$$

Předběžný objem ohniště

$$q_v = \frac{M_{Pal} \cdot Q_i^r}{V_o}$$

$$V_o = \frac{M_{Pal} \cdot Q_i^r}{q_v}$$

$$V_o = \frac{1,89 \cdot 8600}{200}$$

$$\underline{\underline{V_o = 116,1m^3}}$$

[4.1-2]

$$q_v = 160kW \cdot m^{-3} \quad \text{objemové zatížení spalovací komory pro roštová ohniště}$$

Předběžná výška ohniště

$$h = \frac{V_o}{S_o} \approx 12,5m$$

[4.1-3]

Z průřezu ohniště jsme vypočetli rozměry ohniště

$$a = 2,61m$$

$$b = 3,15m$$

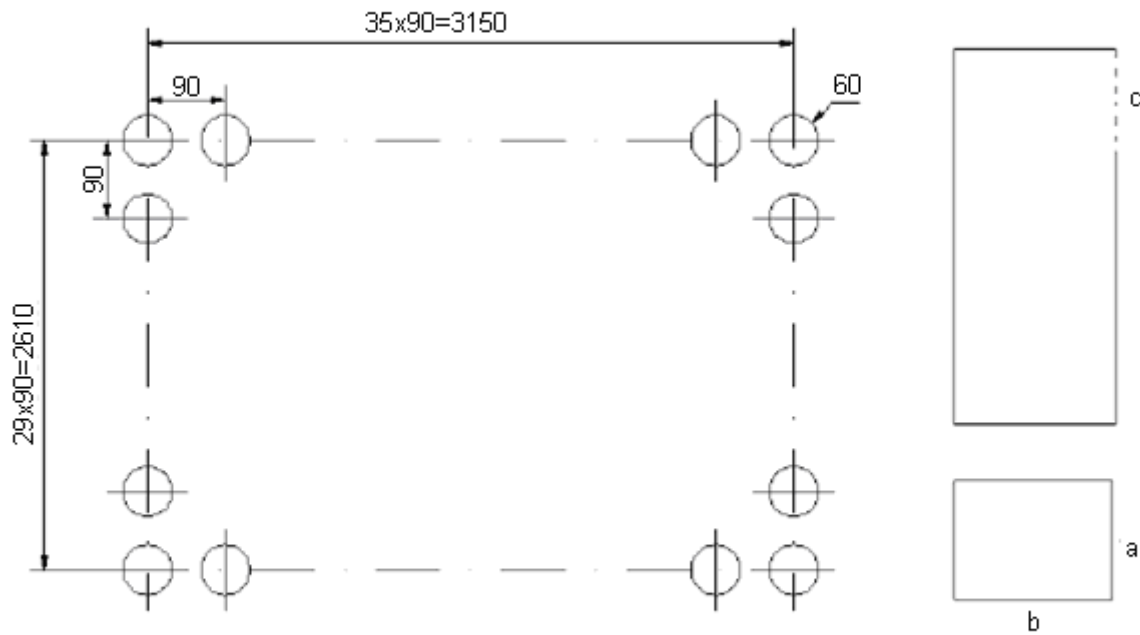
Projekční povrch stěn ohniště

$$a = 2,61m$$

$$b = 3,15m$$

$$c = 2,5m$$

## Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h



Obr. 2 Schéma spalovací komory

$$S_{st} = \sum_i b_i \cdot l_i$$

$$S_{st} = 2 \cdot (a \cdot b + a \cdot h + b \cdot h)$$

$$S_{st} = 2 \cdot (2,61 \cdot 3,15 + 2,61 \cdot 12,5 + 3,15 \cdot 12,5)$$

$$\underline{\underline{S_{st} = 160,4 m^2}}$$

[4.1-4]

Aktivní objem ohniště

$$V = a \cdot b \cdot h$$

$$V = 2,61 \cdot 3,15 \cdot 12,5$$

$$\underline{\underline{V = 102,77 m^3}}$$

[4.1-5]

Účinná sálavá plocha stěn ohniště

$$S_{ús} = (S_{st} - a \cdot c - a \cdot b) \cdot x_{st}$$

$$S_{ús} = (160,4 - 2,61 \cdot 2,5 - 2,61 \cdot 3,15) \cdot 0,95$$

$$\underline{\underline{S_{ús} = 138,5 m^2}}$$

[4.1-6]

úhlový součinitel po konzultaci volen

$$x_{st} = 0,95$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S_{st}}$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{102,77}{160,4} \quad [4.1-7]$$

$$\underline{\underline{s = 2,25m}}$$

Součinitel M

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot x_{pl}$$

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot 0 \quad [4.1-8]$$

$$\underline{\underline{M = 0,59}}$$

$x_{pl} = 0$  poloha maximální teploty plamene pro roštová ohniště s tenkou vrstvou paliva na roštu

Výsledkem tepelného výpočtu ohniště je teplota odchozících spalin, která se počítá iteračně. První nástřel teploty spalin na výstupu z ohniště je  $t_{ok} = 918^\circ\text{C}$

**4.2 Teplota nechlazeného plamene**Teplo přivedené ve vzduchu

$$Q_V = (\alpha_{ok} - \Delta\alpha_0) \cdot I_V^{tovz} + \Delta\alpha_0 \cdot I_V^{tf}$$

$$Q_V = (1,3 - 0) \cdot 800,4 + 0 \cdot 81,36 \quad [4.2-1]$$

$$\underline{\underline{Q_V = 1040,52kJ \cdot kg^{-1}}}$$

entalpie řízeného vzduchu do kotle při teplotě  $240^\circ\text{C}$

$$I_V^{tovz} = 800,4kJ \cdot kg^{-1}$$

entalpie přísávaného vzduchu při teplotě  $25^\circ\text{C}$

$$I_V^{tf} = 81,36kJ \cdot kg^{-1}$$

Teplo uvolněné v ohništi

$$Q_u = Q_{ired} \cdot (1 - Z_{CO} - Z_C - Z_f) + Q_V - Q_{CZ}$$

$$Q_u = 8656,4 \cdot (1 - 0,0023 - 0,00414 - 0,006) + 1040,52 \quad [4.2-2]$$

$$\underline{\underline{Q_u = 9612,86kJ \cdot kg^{-1}}}$$

Entalpie nechlazeného plamene

$$I_{np} = Q_u$$

---

Teplota nechlazeného plamene z I-t diagramu spalín je  $t_{np} = 1408^{\circ}\text{C}$

### 4.3 Stupeň černosti plamene

#### Hmotnost spalín

$$G_S = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{ok} \cdot O_{VV \min}$$

$$G_S = 1 - 0,0125 + 1,306 \cdot 1,3 \cdot 2,49 \quad \alpha_{ok} = 1,3 \quad \text{přebytek vzduchu na výstupu ohniště}$$

$$\underline{\underline{G_S = 5,21 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

[4.3-1]

#### Koncentrace popílku ve spalínách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{\dot{u}} + 1)}{2 \cdot G_S}$$

$$\mu_{pk} = \frac{0,0125 \cdot (0,32 + 1)}{2 \cdot 5,21}$$

[4.3-2]

$$\underline{\underline{\mu_{pk} = 0,00158 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

#### Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{ok} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(918 + 273,15)^2 \cdot 20^2}}$$

[4.3-3]

$$\underline{\underline{k_p = 68,85}}$$

$$d_{pk} = 20 \mu\text{m} \quad \text{efektivní průměr částic popílku}$$

#### Objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^S + (\chi_V - 1) \cdot (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VV \min}}{O_{SV \min} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VV \min}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{1,002 + (1,016 - 1) \cdot (1,3 - 1) \cdot 2,49}{3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49}$$

[4.3-4]

$$\underline{\underline{r_{H_2O} = 0,243}}$$

Objemová koncentrace CO<sub>2</sub> a SO<sub>2</sub> ve spalínách

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SV\min} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VV\min}}$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,48 + 0,00014}{3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49} \quad [4.3-5]$$

$$\underline{\underline{r_{RO_2} = 0,115}}$$

Objemová koncentrace 3-atomových plynů ve spalínách

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2}$$

$$r_s = 0,243 + 0,115 \quad [4.3-6]$$

$$\underline{\underline{r_s = 0,358}}$$

Celkový parciální tlak 3-atomových plynů

$$p_s = r_s \cdot p$$

$$p_s = 0,358 \cdot 0,1 \quad \text{tlak spalin } p = 0,1 \text{ Mpa} \quad [4.3-7]$$

$$\underline{\underline{p_s = 0,0358 \text{ MPa}}}$$

Součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{2,49 + 5,11 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{ok} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s$$

$$k_s = \left( \frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,243}{\sqrt{0,0358 \cdot 2,25}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{918 + 273,15}{1000} \right) \quad [4.3-8]$$

$$\underline{\underline{k_s = 6,78}}$$

Optická hustota plamene

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (6,78 \cdot 0,358 + 68,85 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 2,25 \quad [4.3-9]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,571}}$$

Stupeň černosti plamene

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a_{pl} = 1 - e^{-0,571}$$

$$\underline{\underline{a_{pl} = 0,435}}$$

[4.3-10]

**4.4 Stupeň černosti ohniště**

součinitel zanesení stěn ohniště	$\zeta = 0,45$
úhlový součinitel osálení stěn	$x = 1$
plocha nechlazených povrchů	$S_h = 4m^2$
plocha hořící vrstvy paliva na roštu	$R = 7,5m^2$

Součinitel tepelné efektivity stěn

$$\bar{\psi} = x_{st} \cdot \zeta$$

$$\bar{\psi} = 0,95 \cdot 0,45$$

$$\underline{\underline{\bar{\psi} = 0,4275}}$$

[4.4-1]

součinitel zanesení stěn ohniště po konzultaci voleno  $\zeta = 0,45$

Stupeň černosti ohniště

$$a_o = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{R}{S_{ús}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \bar{\psi}) \cdot \left(1 - \frac{R}{S_{ús}}\right)}$$

$$a_o = \frac{0,435 + (1 - 0,435) \cdot \frac{7,5}{138,5}}{1 - (1 - 0,435) \cdot (1 - 0,4275) \cdot \left(\frac{7,5}{138,5}\right)}$$

[4.4-2]

$$\underline{\underline{a_o = 0,474}}$$

**4.5 Boltzmanovo číslo**Střední tepelná jímavost spalin v ohništi

entalpie spalin pro teplotu a přebytek vzduchu na konci ohniště  $I_s^{\prime, \alpha} = 5950,5 kJ \cdot kg^{-1}$

$$(O_s \bar{c}_s)_o = \frac{Q_u - (1+r_1) \cdot (1+r_3) \cdot I_s^{t,\alpha}}{t_{np} - t_{ok}}$$

$$(O_s \bar{c}_s)_o = \frac{9612,86 - 5950,5}{1408 - 918} \quad [4.5-1]$$

$$\underline{\underline{(O_s \bar{c}_s)_o = 7,474 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Boltzmanovo číslo

$$B_o = \frac{(1 - Z_{sv}^o) \cdot M_{pv} \cdot (O_s \bar{c}_s)_o}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot \bar{\psi} \cdot S_o \cdot (273,15 + t_{np})^3}$$

$$B_o = \frac{(1 - 0,014) \cdot 1,88 \cdot 7,474}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot 0,4275 \cdot 138,5 \cdot (273,15 + 1408)^3} \quad [4.5-2]$$

$$\underline{\underline{B_o = 0,867}}$$

$$Z_{sv}^o = \frac{z_{sv}}{\eta_K + z_{sv}}$$

$$Z_{sv}^o = \frac{1,3}{90,51 + 1,3} \quad [4.5-3]$$

$$\underline{\underline{Z_{sv}^o = 0,014}}$$

Teplota spalin na výstupu t ohniště

$$t_{ok} = \frac{t_{np} + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{B_o}\right)^{0,6}} - 273,15$$

$$t_{ok} = \frac{1408 + 273,15}{1 + 0,59 \cdot \left(\frac{0,474}{0,867}\right)^{0,6}} - 273,15 \quad [4.5-4]$$

$$\underline{\underline{t_{ok} = 918,5^\circ\text{C}}}$$

Pokud teplota spalin na výstupu z ohniště leží v tolerančním pásmu +/- 50°C od zvolené hodnoty, vypočtená teplota spalin je platná.

$$t_{ok,vyp} \in \langle t_{ok,teor} \pm 50^\circ\text{C} \rangle \Rightarrow \text{podmínka je splněna}$$

$$\underline{\underline{918,5 \in \langle 918 \pm 50^\circ\text{C} \rangle}}$$

## 4.6 Určení rozdělení tepla v ohništi

Celkové zachycené teplo v ohništi

$$\begin{aligned}
 Q_o &= M_{pv} \cdot (Q_u - I_S^{t,\alpha} - Z_{sv}^o \cdot Q_{ired}) \\
 Q_o &= 1,88 \cdot (9612,86 - 5950,5 - 0,014 \cdot 8656,4) \\
 \underline{Q_o} &= \underline{6667,4kW}
 \end{aligned}
 \tag{4.6-1}$$

Střední tepelné zatížení stěn ohniště

$$\begin{aligned}
 \bar{q} &= \frac{Q_o}{S_{ús}} \\
 \bar{q} &= \frac{6667,4}{138,5} \\
 \underline{\bar{q}} &= \underline{48,14kW \cdot m^{-2}}
 \end{aligned}
 \tag{4.6-2}$$

Rychlost spalín

$$\begin{aligned}
 w_s &= \frac{V_s}{F_s} \cdot \left( \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} \right) \\
 w_s &= \frac{7,834}{3,15 \cdot 2,61} \cdot \left( \frac{273,15 + \frac{1408 + 918}{2}}{273,15} \right) \\
 \underline{w_s} &= \underline{5m \cdot s^{-1}}
 \end{aligned}
 \tag{4.6-3}$$

Objemový průtok spalín

$$\begin{aligned}
 V_s &= M_{pv} \cdot [O_{SV\min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\min}] \\
 V_s &= 1,88 \cdot [3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49] \\
 \underline{V_s} &= \underline{7,834Nm^3 \cdot s^{-1}}
 \end{aligned}
 \tag{4.6-4}$$

## 5 ROZVRŽENÍ TEPELNÉHO VÝKONU KOTLE NA VÝHŘEVNÉ PLOCHY

Tlaková ztráta v Přehříváku III	$\Delta p_{PP3} = 0,1MPa$
Tlaková ztráta v Přehříváku II	$\Delta p_{PP2} = 0,1MPa$
Tlaková ztráta v Přehříváku I	$\Delta p_{PP1} = 0,1MPa$
Tlaková ztráta v závěsných trubkách	$\Delta p_{zt} = 0,05MPa$

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**


---

tlaková ztráta ve výparníku	$\Delta p_b = 0 \text{ MPa}$
tlaková ztráta v ekonomizéru	$\Delta p_{nv} = 0,2 \text{ MPa}$
parní výkon kotle	$m_{pp} = 18 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} = 5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
entalpie dle parních tabulek:	
entalpie přehřáté páry při tlaku 4,2 MPa a teplotě 480°C	$i_{pp} = 3397,76 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
teplota napájecí vody 105°C a entalpie napájecí vody	$i_{nv} = 443,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
entalpie vody v bubnu	$i_b = 1125,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Odhadnuté množství odluhu $M_o = 0,01 \cdot M_{pp}$	$M_o = 0,05 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Tlak napájecí vody

$$p_{nv} = p_{pp} + \Delta p_{PP3} + \Delta p_{PP2} + \Delta p_{PP1} + \Delta p_{zt} + \Delta p_b + \Delta p_{nv}$$

$$p_{nv} = 4,2 + 0,1 + 0,1 + 0,1 + 0,05 + 0 + 0,2 \quad [5-1]$$

$$\underline{\underline{p_{nv} = 4,75 \text{ MPa}}}$$

**5.1 Výkon ohříváku vody (EKO)**

teplota vody na výstupu z EKA	$t_{wEKO} = 180^\circ\text{C}$
entalpie vody na výstupu z EKA	$i_{wEKO} = 763 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

kotel bude mít regulaci teploty páry vstřikem napájecí vody, volí se množství vstřiku

navržené množství vstřiku

$$M_v = 0,05 \cdot M_p$$

$$M_v = 0,05 \cdot 5 \quad [5.1-1]$$

$$\underline{\underline{M_v = 0,25 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Tepelný výkon EKA

$$Q_{EKO} = (M_p + M_o - M_v) \cdot (i_{wEKO} - i_{nv})$$

$$Q_{EKO} = (5 + 0,05 - 0,25) \cdot (763 - 443,7) \quad [5.1-2]$$

$$\underline{\underline{Q_{EKO} = 1532,64 \text{ kW}}}$$

**5.2 Výkon výparníku**

do výparníku vstupuje voda z EKA a vystupuje sytá pára a odluh při tlaku v bubnu

entalpie vody v bubnu	$i_b = 1125,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
entalpie páry na výstupu z výparníku	$i_p = 2797,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

---

tlak v bubnu

$$p_b = p_{pp} + \Delta p_{PP3} + \Delta p_{PP2} + \Delta p_{PP1} + \Delta p_{zt} + \Delta p_b$$

$$p_b = 4,2 + 0,1 + 0,1 + 0,1 + 0,05 + 0 \quad [5.2-1]$$

$$\underline{\underline{p_b = 4,55MPa}}$$

Tepelný výkon výparníku

$$Q_{výp} = (M_p - M_v) \cdot (i_p - i_{wEKO}) + M_o \cdot (i_b - i_{wEKO})$$

$$Q_{výp} = (5 - 0,25) \cdot (2797,5 - 763) + 0,05 \cdot (1125,6 - 763) \quad [5.2-2]$$

$$\underline{\underline{Q_{výp} = 9682kW}}$$

**5.3 Výkon závěsných trubek**

Závěsné trubky přivádějí páru z bubnu do PP1 a na kterých jsou zároveň zavěšeny PP2 a PP3. Procházejí přes spalínový trakt, tudíž musíme počítat s přihřátí páry. Závěsné trubky jsou zapojeny jako sou proud.

teplota na vstupu z výparníku	$t_{ZT1} = 257,5^\circ C$
teplota na výstupu z trubek	$t_{ZT2} = 271^\circ C$
entalpie páry na vstupu	$i_{ZT1} = 2797,5kJ \cdot kg^{-1}$
entalpie páry na výstupu z trubek	$i_{ZT2} = 2850,3kJ \cdot kg^{-1}$
tlak páry na výstupu z trubek	$p_{ZT2} = 4,5MPa^\circ C$

$$Q_{ZT} = (M_p - M_v) \cdot (i_{ZT2} - i_{ZT1})$$

$$Q_{ZT} = (5 - 0,25) \cdot (2850,3 - 2797,5) \quad [5.3-1]$$

$$\underline{\underline{Q_{ZT} = 250,8kW}}$$

**5.4 Výkon přehříváků**

Přehřívák kotle bude rozdělen na 3 díly, které se nacházejí ve 3. tahu kotle. Regulační vstřík bude situován za 2. díl přehříváku.

Tepelný výkon PP1

Navržená teplota páry na výstupu z přehříváku	$t_{PP1} = 350^\circ C$
entalpie páry na výstupu z přehříváku	$i_{PP1} = 3083,9kJ \cdot kg^{-1}$

Tlak na výstupu z PP1

$$p_b = p_{pp} + \Delta p_{PP3} + \Delta p_{PP2}$$

$$p_b = 4,2 + 0,1 + 0,1 \quad [5.4-1]$$

$$\underline{\underline{p_b = 4,4MPa}}$$

$$Q_{PP1} = (M_p - M_v) \cdot (i_{PP1} - i_{ZT2})$$

$$Q_{PP1} = (5 - 0,25) \cdot (3083,9 - 2850,3) \quad [5.4-2]$$

$$\underline{\underline{Q_{PP1} = 1109,6}}$$

Tepelný výkon PP2

Navržená teplota páry na výstupu z přehříváku  $t_{PP2} = 450^\circ C$   
entalpie páry na výstupu z přehříváku  $i_{PP2} = 3327 kJ \cdot kg^{-1}$

Tlak na výstupu z PP2

$$p_b = p_{pp} + \Delta p_{PP3}$$

$$p_b = 4,2 + 0,1 \quad [5.4-3]$$

$$\underline{\underline{p_b = 4,3MPa}}$$

$$Q_{PP2} = (M_p - M_v) \cdot (i_{PP2} - i_{PP1})$$

$$Q_{PP2} = (5 - 0,25) \cdot (3327 - 3083,9) \quad [5.4-4]$$

$$\underline{\underline{Q_{PP2} = 1154,7kW}}$$

Tepelný výkon PP3Bilance regulačního vstřiku

Entalpie páry za vstřikem (na vstupu do PP3)

$$i_{PP3} = \frac{(M_p - M_v) \cdot i_{PP2} + M_v \cdot i_{nv}}{M_p}$$

$$i_{PP3} = \frac{(5 - 0,25) \cdot 3327 + 0,25 \cdot 443,7}{5} \quad [5.4-5]$$

$$\underline{\underline{i_{PP3} = 3182,8kJ \cdot kg^{-1}}}$$

odpovídající teplota páry za vstřikem  $t_{PP3} = 389^\circ C$

$$\begin{aligned}
 Q_{PP3} &= M_p \cdot (i_p - i_{PP3}) \\
 Q_{PP3} &= 5 \cdot (3397,76 - 3182,8) \\
 Q_{PP3} &= 1074,8 \text{ kW}
 \end{aligned}
 \tag{5.4-6}$$

## 5.5 Kontrola tepelného výkonu všech ploch

$$\begin{aligned}
 \sum Q_i &= Q_{EKO} + Q_{výp} + Q_{ZT} + Q_{PP1} + Q_{PP2} + Q_{PP3} \\
 \sum Q_i &= 1532,64 + 9682 + 250,8 + 1109,6 + 1154,7 + 1074,8 \\
 \sum Q_i &= 14804,54 \text{ kW}
 \end{aligned}
 \tag{5.5-1}$$

Výrobní teplo páry  $Q_v = 14804,43 \text{ kW}$

## 5.6 Rozvržení tepelné bilance jednotlivých částí kotle

### 5.6.1 Tepelná bilance ohříváku vzduchu

teplota vzduchu na vstupu do OVZ  $t_{vin} = 50^\circ\text{C}$   
 (po smíchání, bude realizován odběr za OVZ a míchán se vstupním vzduchem o teplotě  $25^\circ\text{C}$  na teplotu  $50^\circ\text{C}$ )

teplota na výstupu z OVZ  $t_{vout} = 240^\circ\text{C}$   
 pro vlhkost paliva musí být  $2^\circ$  vzduch ohřát na cca  $240^\circ\text{C}$  i k vůli emisím CO

teplota spalin na výstupu z OVZ (za kotlem)  $t_{Sk} = 140^\circ\text{C}$

#### Tepelný výkon OVZ

entalpie vzduchu na vstupu do OVZ  $I_{vin} = 164,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

entalpie vzduchu na výstupu z OVZ  $I_{vout} = 800,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

poměrná ztráta do okolí prostoru OVZ  $Z_{OVZ} = 0,0002$

$$\begin{aligned}
 Q_{OVZ} &= M_{pv} \cdot (\beta_{OVZ}^1 \cdot I_{vout} - \beta_{OVZ}^2 \cdot I_{vin}) \\
 Q_{OVZ} &= 1,88 \cdot (1,3 \cdot 800,4 - 1,3 \cdot 164,2)
 \end{aligned}
 \tag{5.6.1-1}$$

$$\underline{Q_{OVZ} = 1554,9 \text{ kW}}$$

$$\beta_{OVZ}^1 = \beta_{OVZ}^2 = 1,3$$

Ztráta OVZ sáláním a vedením tepla do okolí

$$Q_z = Z_{OVZ} \cdot M_{pv} \cdot Q_{ired}$$

$$Q_z = 0,0002 \cdot 1,91 \cdot 8656,4 \quad [5.6.1-2]$$

$$\underline{\underline{Q_z = 3,25kW}}$$

Entalpie spalin na vstupu do OVZ

$$I_{SOVZ} = \frac{Q_{OVZ} + Q_z + M_{pv} \cdot I_{Sk} - M_{pv} \cdot \Delta\alpha_{OVZ} \cdot I_{vf}}{M_{pv}}$$

$$I_{SOVZ} = \frac{1554,9 + 3,25 + 1,88 \cdot 819,4 - 1,88 \cdot 0 \cdot 81}{1,88} \quad [5.6.1-3]$$

$$\underline{\underline{I_{SOVZ} = 1648,2kJ \cdot kg^{-1}}}$$

Odpovídající teplota spalin na vstupu do OVZ určená z I-t diagramu spalin je 277°C

**5.6.2 Tepelná bilance ohříváku vody (EKO)**

poměrná ztráta tepla do okolí prostoru EKA  $Z_{EKO} = 0,0003$

Ztráta EKA sáláním a vedením tepla do okolí

$$Q_z = Z_{EKO} \cdot M_{pv} \cdot Q_{ired}$$

$$Q_z = 0,0003 \cdot 1,88 \cdot 8656,4 \quad [5.6.2-1]$$

$$\underline{\underline{Q_z = 4,88kW}}$$

Entalpie spalin na vstupu do EKA

$$I_{SEKO} = \frac{Q_{EKO} + Q_z + M_{pv} \cdot I_{SOVZ} - M_{pv} \cdot \Delta\alpha_{EKO} \cdot I_{vf}}{M_{pv}}$$

$$I_{SEKO} = \frac{1532,83 + 4,88 + 1,88 \cdot 1648,2 - 1,88 \cdot 0 \cdot 81}{1,88} \quad [5.6.2-2]$$

$$\underline{\underline{I_{SEKO} = 2466,1kJ \cdot kg^{-1}}}$$

Odpovídající teplota spalin na vstupu do EKA určená z I-t diagramu spalin je 407,5°C

**5.6.3 Tepelná bilance přehříváku páry PP1**

Paralelně řazenou plochou k PP1 je membránová stěna a chlazené závěsy.  
ztráta tepla do okolí v oblasti PP1  $Z_{PP1} = 0,0002$

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**

odhadnutý výkon paralelní plochy

$$Q_{par} = 180kW$$

Ztráta PP1 sáláním a vedením tepla do okolí

$$Q_z = Z_{PP1} \cdot M_{pv} \cdot Q_{ired}$$

$$Q_z = 0,0002 \cdot 1,88 \cdot 8656,4 \quad [5.6.3-1]$$

$$\underline{Q_z = 3,25kW}$$

Entalpie spalin na vstupu do PP1

$$I_{SPP1} = \frac{Q_{PP1} + Q_z + Q_{par} + M_{pv} \cdot I_{SEKO} - M_{pv} \cdot \Delta\alpha_{PP1} \cdot I_{Vf}}{M_{pv}}$$

$$I_{SPP1} = \frac{1109,6 + 3,25 + 180 + 1,88 \cdot 2466,1 - 1,88 \cdot 0 \cdot 81}{1,88} \quad [5.6.3-2]$$

$$\underline{I_{SPP1} = 3153,79kJ \cdot kg^{-1}}$$

Odpovídající teplota spalin na vstupu do PP1 určená z I-t diagramu spalin je 513°C

**5.6.4 Tepelná bilance přehříváku páry PP2**

Paralelně řazenou plochou k PP2 je membránová stěna a chlazené závěsy.

ztráta tepla do okolí v oblasti PP2

$$Z_{PP2} = 0,0002$$

odhadnutý výkon paralelní plochy

$$Q_{par} = 270kW$$

Ztráta PP2 sáláním a vedením tepla do okolí

$$Q_z = Z_{PP2} \cdot M_{pv} \cdot Q_{ired}$$

$$Q_z = 0,0002 \cdot 1,88 \cdot 8656,4 \quad [5.6.4-1]$$

$$\underline{Q_z = 3,25kW}$$

Entalpie spalin na vstupu do PP2

$$I_{SPP2} = \frac{Q_{PP2} + Q_z + Q_{par} + M_{pv} \cdot I_{SPP1} - M_{pv} \cdot \Delta\alpha_{PP2} \cdot I_{Vf}}{M_{pv}}$$

$$I_{SPP2} = \frac{1154,7 + 3,25 + 270 + 1,88 \cdot 3153,79 - 1,88 \cdot 0 \cdot 81}{1,88} \quad [5.6.4-2]$$

$$\underline{I_{SPP2} = 3913,3kJ \cdot kg^{-1}}$$

Odpovídající teplota spalin na vstupu do PP2 určená z I-t diagramu spalin je 627°C

### 5.6.5 Tepelná bilance přehříváku páry PP3

Paralelně řazenou plochou k PP3 je membránová stěna a chlazené závěsy.

ztráta tepla do okolí v oblasti PP3

$$Z_{PP3} = 0,0002$$

odhadnutý výkon paralelní plochy

$$Q_{par} = 410 \text{ kW}$$

#### Ztráta PP3 sáláním a vedením tepla do okolí

$$Q_z = Z_{PP3} \cdot M_{pv} \cdot Q_{ired}$$

$$Q_z = 0,0002 \cdot 1,88 \cdot 8656,4$$

[5.6.5-1]

$$\underline{\underline{Q_z = 3,25 \text{ kW}}}$$

#### Entalpie spalin na vstupu do PP3

$$I_{SPP3} = \frac{Q_{PP3} + Q_z + Q_{par} + M_{pv} \cdot I_{SPP2} - M_{pv} \cdot \Delta\alpha_{PP3} \cdot I_{Vf}}{M_{pv}}$$

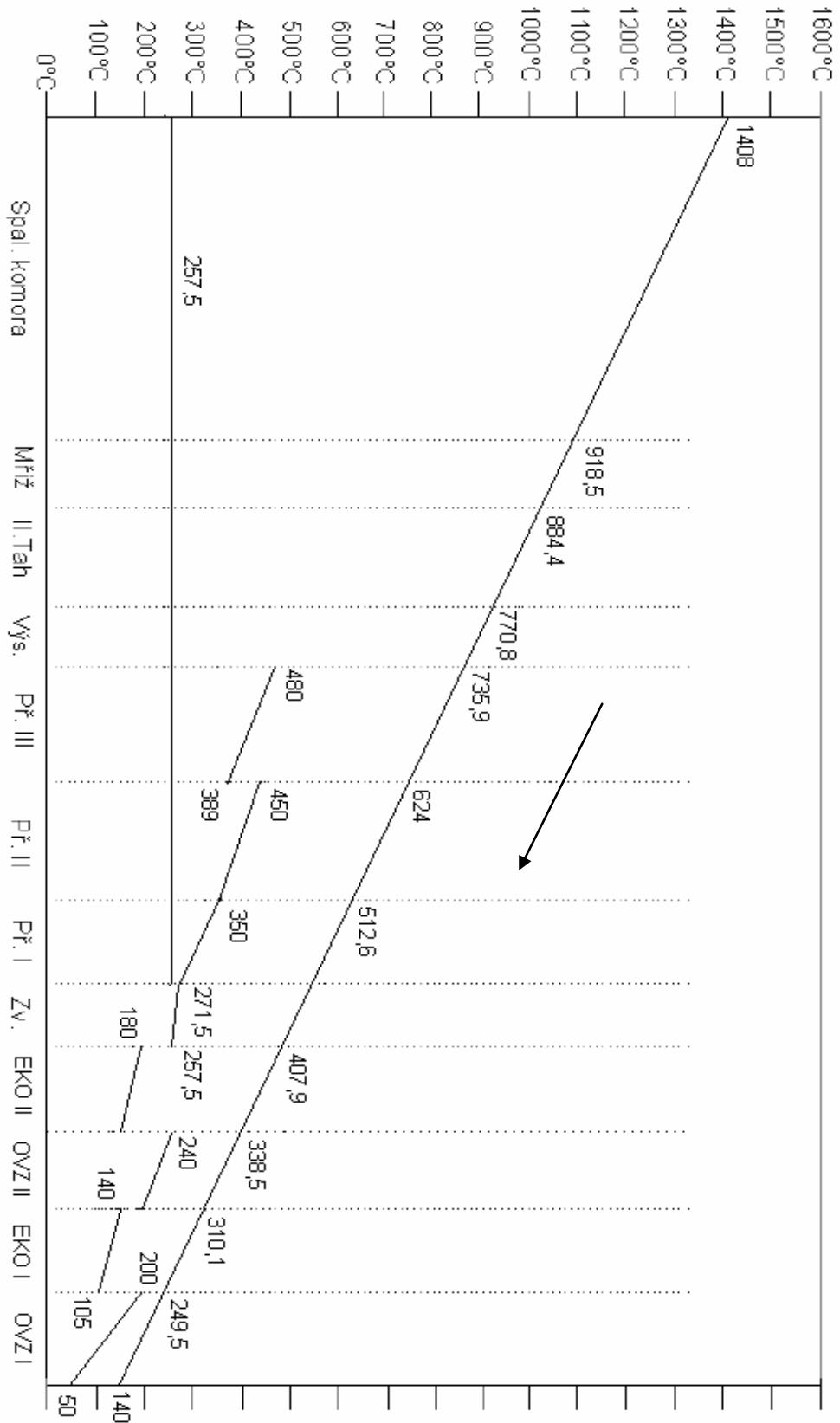
$$I_{SPP3} = \frac{1074,8 + 3,25 + 410 + 1,88 \cdot 3913,3 - 1,88 \cdot 0 \cdot 81}{1,88}$$

[5.6.5-2]

$$\underline{\underline{I_{SPP3} = 4704,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Odpovídající teplota spalin na vstupu do PP3 určená z I-t diagramu spalin je 742°C.

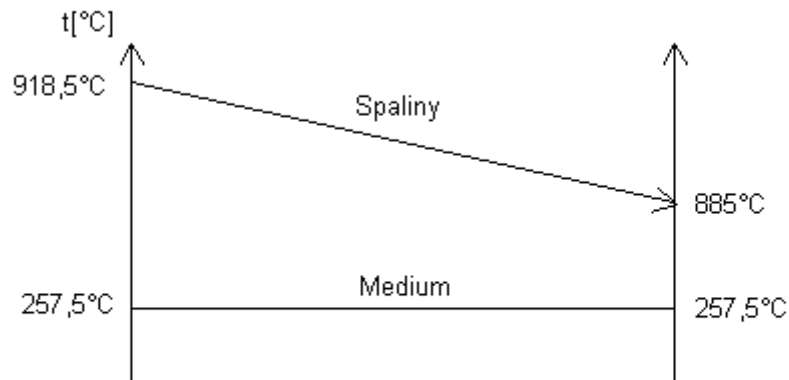
Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h



Obr. 3 Pilový diagram

## 6 VÝPOČET MŘÍŽE

Mříž v kotli je provedena rozvolněním trubek zadní stěny ohniště při průchodu spalínovým kanálem, kdy vytvoří uspořádání trubek za sebou. V kotli tvoří přechod mezi prvním a druhým tahem kotle. Vstupní teplotou je teplota z konce ohniště a teplotu za mříží zvolím odhadem, kterou následně porovnáme s výpočtovou. Postup opakujeme, dokud se teploty neshodují.



Obr. 4 Průběh teplot spalín a média

Teplota spalín před mříží	$t_{ok} = 918,5^{\circ}\text{C}$
Teplota spalín za mříží	$t_{mříží} = 885^{\circ}\text{C}$
počet řad	$n = 3$
počet trubek v řadě	$z = 9$
uvažovaná rychlost spalín	$w_s = 6,5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
příčná rozteč trubek	$s_1 = 0,27\text{m}$
podélná rozteč trubek	$s_2 = 0,1\text{m}$
průměr trubek membránové stěny	$D = 60\text{mm}$

### Střední teplota spalín v mříží

$$t_{stř} = \frac{t_{ok} + t_{mříží}}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{918,4 + 885}{2}$$

$$\underline{\underline{t_{stř} = 901,7^{\circ}\text{C}}}$$

[6-1]

Výška rozvolnění mříže

$$c = \frac{V_S}{w_S \cdot (a - z_1 \cdot D)} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15}$$

$$c = \frac{7,834}{6,5 \cdot (2,61 - 9 \cdot 0,06)} \cdot \frac{273,15 + 901,7}{273,15} \quad [6-2]$$

$$\underline{\underline{c = 2,5m}}$$

Skutečná rychlost spalin

$$w_S = \frac{V_S}{c \cdot (a - z_1 \cdot D)} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15}$$

$$w_S = \frac{7,834}{2,5 \cdot (2,61 - 9 \cdot 0,06)} \cdot \frac{273,15 + 901,7}{273,15} \quad [6-3]$$

$$\underline{\underline{w_S = 6,51m \cdot s^{-1}}}$$

**6.1 Součinitel přestupu tepla**

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro uspořádání trubek za sebou

Hodnoty pro střední teplotu 901,7°C

Součinitel tepelné vodivosti spalin

$$\lambda_s = 10 \cdot 10^{-2} W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu_s = 146 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 0,58$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_S \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,9225 \cdot 0,946 \cdot \frac{0,1}{0,06} \cdot \left( \frac{6,51 \cdot 0,06}{146 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,58^{0,33} \quad [6.1-1]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = 41,06W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

korekční součinitel na počet řad při  $n \leq 10$

$$C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (z_2 - 2)$$

$$C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (3 - 2) \quad [6.1-2]$$

$$\underline{\underline{C_z = 0,9225}}$$

Korekční součinitel na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D}$$

$$\sigma_1 = \frac{0,27}{0,06} \quad \sigma_2 = \frac{0,1}{0,06} \quad [6.1-3]$$

$$\underline{\underline{\sigma_1 = 4,5}} \quad \underline{\underline{\sigma_2 = 1,666}}$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2}$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 4,5 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,666}{2}\right)^3\right]^2} \quad [6.1-4]$$

$$\underline{\underline{C_s = 0,946}}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,232 \cdot (901,7 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{340 + 273,15}{901,7 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{340 + 273,15}{901,7 + 273,15}} \quad [6.1-5]$$

$$\underline{\underline{\alpha_{sal} = 37,37W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

tlak spalin

$$p = 0,1Mpa,$$

celkový parciální tlak

$$p_s = 0,0358Mpa$$

objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = 0,243$$

objemová koncentrace 3-atomových plynů

$$r_s = 0,358Mpa$$

koncentrace popílku ve spalínách

$$\mu_{pk} = 0,00158kg \cdot kg^{-1}$$

Absolutní teplota zaneseného povrchu plochy  
pro mříž na výstupu z ohniště

$$\Delta t = 80^\circ C$$

$$t_z = t_{\text{sytl}} + \Delta t$$

$$t_z = 260 + 80 \quad [6.1-6]$$

$$\underline{\underline{t_z = 340^\circ\text{C}}}$$

teplota sytosti vody

$$t_{\text{sytl}} = 178,7 \cdot \sqrt[4]{p_b}$$

$$t_z = 178,7 \cdot \sqrt[4]{4,5} \quad [6.1-7]$$

$$\underline{\underline{t_z = 260^\circ\text{C}}}$$

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,264} \quad [6.1-8]$$

$$\underline{\underline{a = 0,232}}$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (15,72 \cdot 0,358 + 69,48 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 0,46 \quad [6.1-9]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,264}}$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro svazky hladkých trubek

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,06 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,27 \cdot 0,1}{0,06^2} - 1 \right) \quad [6.1-10]$$

$$\underline{\underline{s = 0,46\text{m}}}$$

Součinitel zeslabení sálení 3-atomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{\text{stř}} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,243}{3,16 \cdot \sqrt{0,0358 \cdot 0,46}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{901,7 + 273,15}{1000} \right) \quad [6.1-11]$$

$$\underline{\underline{k_s = 15,72}}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(901,7 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \quad [6.1-12]$$

$$\underline{\underline{k_p = 69,48 \text{MPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}}}$$

efektivní průměr částic popílku

$$d_{pk} = 20 \mu\text{m}$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_s = 0,9 \cdot 41,06 + 37,37 \quad [6.1-13]$$

$$\underline{\underline{\alpha_s = 74,33 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Součinitel prostupu tepla

pro výparníkové plochy

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s}$$

$$k = \frac{74,33}{1 + 0,0045 \cdot 74,33} \quad [6.1-14]$$

$$\underline{\underline{k = 55,7 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel zanesení pro mříž

$$\varepsilon = 0,0045 \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Teplosměnná plocha mříže

$$S = \pi \cdot D \cdot c \cdot n \cdot z$$

$$S = \pi \cdot 0,06 \cdot 2,56 \cdot 3 \cdot 9 \quad [6.1-15]$$

$$\underline{\underline{S = 13,03 \text{m}^2}}$$

Střední logaritmický spád

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{641,7 - 625}{\ln \frac{641,7}{625}}$$

$$\Delta t_{stř} = 633,3^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_1 = t_{ok} - t_{syt}$$

$$\Delta t_1 = 901,7 - 260 = \underline{\underline{641,7^\circ\text{C}}}$$

$$\Delta t_2 = t_{mříži} - t_{syt}$$

$$\Delta t_2 = 885 - 260 = \underline{\underline{625^\circ\text{C}}}$$
[6.1-16]

Teplo odebrané mříží spalinám

$$Q_{mříži} = k \cdot S \cdot \Delta t_{stř} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{mříži} = 55,7 \cdot 13,03 \cdot 633,3 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{\underline{Q_{mříži} = 459,64\text{kW}}}$$
[6.1-17]

**6.2 Bilance tepla na straně spalin v mříži**Teplo spalin na vstupu

$$Q_{1ok} = I_{ok} \cdot M_{pv}$$

$$Q_{1ok} = 5953,4 \cdot 1,88$$

$$\underline{\underline{Q_{1ok} = 11192,4\text{kW}}}$$
[6.2-1]

Teplo spalin na výstupu

$$Q_{2mříži} = Q_{1ok} - Q_{mříži}$$

$$Q_{2mříži} = 11192,4 - 459,64$$

$$\underline{\underline{Q_{2mříži} = 10732,7\text{kW}}}$$
[6.2-2]

Entalpie výstupních spalin

$$I_{2mříži} = \frac{Q_{2mříži}}{M_{pv}}$$

$$I_{2mříži} = \frac{10732,7}{1,88}$$

$$\underline{\underline{I_{2mříži} = 5708,9\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$
[6.2-3]

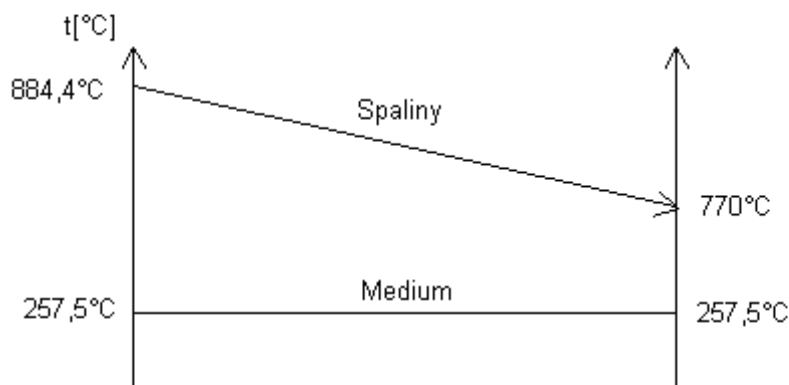
Odpovídající teplota spalin na výstupu z mříže určená z I-t diagramu spalin je 884,4°C  
Od předpokládané teploty se liší pouze o 0,6°C což je minimální.

## 7 VÝPOČET II. TAHU KOTLE

Druhý tah zůstává volný. Nejsou v něm žádné vyhřevné plochy, kromě membránových stěn, které jsou pokračováním výparníku.

### 7.1 Geometrie II. tahu

přední stěna	$a=2,61$
Boční stěna	$b=1,62\text{m}$
Výška $h_1$	$h_1=4\text{m}$
Výška rozvolnění $c$	$c=2,5\text{ m}$



Obr. 5 Průběh teplot spalín a média



Obr. 6 Schéma II. tahu

Vstupní teplota spalín	$t_1 = 884,4^\circ\text{C}$
Výstupní teplota spalín	$t_2 = 770^\circ\text{C}$
entalpie spalín pro teplotu $884,4^\circ\text{C}$	$I_1 = 5708,9\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
entalpie spalín pro teplotu $770^\circ\text{C}$	$I_2 = 4899,9\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Střední teplota spalín

$$t_{stř} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{884,4 + 770}{2}$$

$$\underline{\underline{t_{stř} = 827,2^\circ\text{C}}}$$

[7.1-1]

Rychlost spalin

$$w_s = \frac{V_s}{F_s} \cdot \left( \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} \right)$$

$$w_s = \frac{7,834}{2,61 \cdot 1,62} \cdot \left( \frac{273,15 + 827,2}{273,15} \right) \quad [7.1-2]$$

$$\underline{\underline{w_s = 7,46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Objemový průtok spalin

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min}]$$

$$V_s = 1,88 \cdot [3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49] \quad [7.1-3]$$

$$\underline{\underline{V_s = 7,834 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}}}$$

**7.2 Výpočet membránové stěny**

Hodnoty pro střední teplotu 827,2°C

Součinitel tepelné vodivosti spalin

$$\lambda_s = 9,38 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu_s = 131,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,5873$$

Obvod spalinovodu

$$O = 2 \cdot (a + b)$$

$$O = 2 \cdot (2,61 + 1,62) \quad [7.2-1]$$

$$\underline{\underline{O = 8,46 \text{ m}}}$$

Ekvivalentní průměr spalin

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{O}$$

$$d_e = \frac{4 \cdot 2,61 \cdot 1,62}{8,42} \quad [7.2-2]$$

$$\underline{\underline{d_e = 2 \text{ m}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4}$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0938}{2} \cdot \left( \frac{7,46 \cdot 2}{131,4 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,5873^{0,4} \quad [7.2-3]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = 9,65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,393 \cdot (827,2 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{352,2 + 273,15}{827,2 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{352,2 + 273,15}{827,2 + 273,15}} \quad [7.2-4]$$

$$\underline{\underline{\alpha_{sal} = 55,73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

stupeň černosti povrchu stěn

$a_{st} = 0,8$

tlak spalín

$p = 0,1 \text{ Mpa} ,$

celkový parciální tlak

$p_s = 0,0358 \text{ Mpa}$

objemová koncentrace vodní páry

$r_{H_2O} = 0,243$

objemová koncentrace 3-atomových plynů

$r_s = 0,358 \text{ Mpa}$

koncentrace popílku ve spalínách

$\mu_{pk} = 0,00158 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(827,2 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \quad [7.2-5]$$

$$\underline{\underline{k_p = 72,58}}$$

efektivní průměr částic popílku

$d_{pk} = 20 \mu\text{m}$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S_{st}}$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{27,18}{62,85} \quad [7.2-6]$$

$$\underline{\underline{s = 1,55m}}$$

Objem sálové vrstvy

$$V = (h_1 + c) \cdot a \cdot b$$

$$V = (4 + 2,43) \cdot 2,61 \cdot 1,62 \quad [7.2-7]$$

$$\underline{\underline{V = 27,18m^3}}$$

Projekční povrch stěn

$$S_{st} = \sum_i b_i \cdot l_i$$

$$S_{st} = 2 \cdot (a \cdot b + a \cdot (h_1 + c) + b \cdot (h_1 + c)) \quad [7.2-8]$$

$$S_{st} = 2 \cdot (2,61 \cdot 1,62 + 2,61 \cdot (4 + 2,43) + 1,62 \cdot (4 + 2,43))$$

$$\underline{\underline{S_{st} = 62,85m^2}}$$

Účinná sálová plocha stěn II tahu

$$S_{ús} = (S_{st} - a \cdot c - a \cdot b) \cdot x_{st}$$

$$S_{ús} = (62,85 - 2,61 \cdot 2,5 - 2,61 \cdot 1,62) \cdot 0,95 \quad [7.2-9]$$

$$\underline{\underline{S_{ús} = 49,49m^2}}$$

úhlový součinitel po konzultaci volen

$x_{st} = 0,95$

Součinitel zeslabení sálení 3-atomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,243}{3,16 \cdot \sqrt{0,0358 \cdot 1,55}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{827,2 + 273,15}{1000} \right) \quad [7.2-10]$$

$$\underline{\underline{k_s = 8,704MPa^{-1} \cdot m^{-1}}}$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (8,704 \cdot 0,358 + 72,58 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 1,55 \quad [7.2-11]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,5}}$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,5} \quad [7.2-12]$$

$$\underline{\underline{a = 0,393}}$$

Teplota povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{\text{syt}} + \varepsilon \cdot q$$

$$t_z = 260 + 0,003 \cdot 30731,4 \quad [7.2-13]$$

$$\underline{\underline{t_z = 352,2^\circ\text{C}}}$$

součinitel zanesení volím  $\varepsilon = 0,003 \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

Tepelné zatížení II. tahu

$$q = \frac{Q_1}{S_{\text{úš}}} \cdot 10^3$$

$$q = \frac{1520,9}{49,49} \cdot 10^3 \quad [7.2-14]$$

$$\underline{\underline{q = 30731,4 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}}}$$

Předběžné teplo odevzdané spalinami výparníku

$$Q_1 = \Delta I_{sp} \cdot M_{pv}$$

$$Q_1 = 809 \cdot 1,88 \quad [7.2-15]$$

$$\underline{\underline{Q_1 = 1520,9 \text{kW}}}$$

$$\Delta I_{sp} = I_1 - I_2$$

$$\Delta I_{sp} = 5708,9 - 4899,9 \quad [7.2-16]$$

$$\underline{\underline{\Delta I_{sp} = 809 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_s = 0,9 \cdot 9,65 + 55,73 \quad [7.2-17]$$

$$\underline{\underline{\alpha_s = 64,42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Součinitel omývání pro II tah volím

$$\omega = 0,9$$

Součinitel prostupu tepla

pro výparnickové plochy

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s}$$

$$k = \frac{64,42}{1 + 0,003 \cdot 63,54} \quad [7.2-18]$$

$$\underline{\underline{k = 53,98 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel zanesení pro membránové stěny

$$\varepsilon = 0,003 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Střední logaritmický spád

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{624,4 - 510}{\ln \frac{624,4}{510}}$$

$$\underline{\underline{\Delta t_{stř} = 565,27^\circ \text{C}}}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{syt}$$

$$\Delta t_1 = 884,4 - 260 = \underline{\underline{624,4^\circ \text{C}}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{syt}$$

$$\Delta t_2 = 770 - 260 = \underline{\underline{510^\circ \text{C}}}$$

[7.2-19]

Teplo odebrané membránovou stěnou spalinám

$$Q_{II} = k \cdot S \cdot \Delta t_{stř} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{II} = 53,98 \cdot 49,49 \cdot 565,27 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{\underline{Q_{II} = 1510,28 \text{ kW}}}$$

[7.2-20]

### 7.3 Bilance tepla na straně spalin v II. tahu

Teplo spalin na vstupu

$$\begin{aligned}
 Q_{1in} &= I_1 \cdot M_{pv} \\
 Q_{1in} &= 5708,9 \cdot 1,88 \\
 \underline{\underline{Q_{1in} &= 10732,7 \text{ kW}}}
 \end{aligned}
 \tag{7.3-1}$$

Teplo spalin na výstupu

$$\begin{aligned}
 Q_{2out} &= Q_{1in} - Q_{II} \\
 Q_{2out} &= 10732,7 - 1510,28 \\
 \underline{\underline{Q_{2out} &= 9222,4 \text{ kW}}}
 \end{aligned}
 \tag{7.3-2}$$

Entalpie výstupních spalin

$$\begin{aligned}
 I_{2out} &= \frac{Q_{2out}}{M_{pv}} \\
 I_{2out} &= \frac{9222,4}{1,88} \\
 \underline{\underline{I_{2out} &= 4905,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}
 \end{aligned}
 \tag{7.3-3}$$

Odpovídající teplota spalin na výstupu z II. tahu určená z I-t diagramu spalin je 770,8°C  
Teplota se od zvolené liší pouze o 0,8°C což je přijatelné.

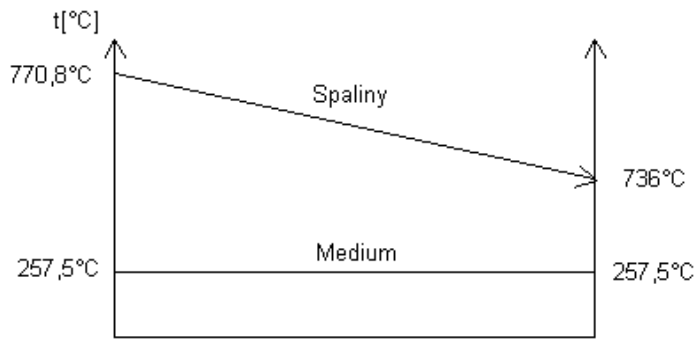
## 8 VÝPOČET VÝSYPKY MEZI II. A III. TAHEM

Výsypka tvoří přechod mezi II. a III. tahem a je tvořena pouze membránovou stěnou. Ve spodní části výsypky se nachází šnekový dopravník, který má za úkol přivádět zachycený popel zpět do spalovací komory.

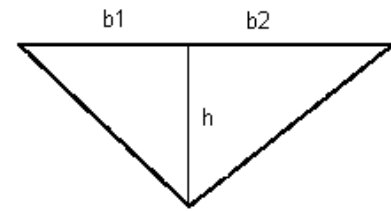
vstupní teplota spalin	$t_1 = 770,8^\circ\text{C}$
výstupní teplota spalin	$t_2 = 736^\circ\text{C}$
entalpie spalin pro teplotu 770,8°C	$I_1 = 4905,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
entalpie spalin pro teplotu 742°C	$I_2 = 4662,92 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

### 8.1 Geometrie výsypky

přední stěna	a=2,61m
boční stěna	b <sub>1</sub> =1,62m
boční stěna II	b <sub>2</sub> =2,43m
výška	h=2m



Obr. 7 Průběh teplot spalín a média



Obr. 8 Schéma výsypky

### Střední teplota spalín

$$t_{stř} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{770,8 + 736}{2}$$

$$\underline{\underline{t_{stř} = 753,4^\circ\text{C}}}$$

[8.1-1]

## 8.2 Výpočet membránové stěny

Hodnoty pro střední teplotu 753,4°C

Součinitel tepelné vodivosti spalín

$$\lambda_s = 8,74 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalín

$$\nu_s = 117,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,5947$$

Jelikož se vstupní a výstupní otvor z výsypky mění provedl jsem úpravu na střední hodnotu průřezu i obvodu spalínovodu.

### Střední obvod spalínovodu

$$O = \frac{2 \cdot (a + b_1) + 2 \cdot (a + b_2)}{2}$$

$$O = \frac{2 \cdot (2,61 + 1,62) + 2 \cdot (2,61 + 2,43)}{2}$$

$$\underline{\underline{O = 9,27\text{m}}}$$

[8.2-1]

Střední průřez spalínovodu

$$F_S = \frac{2 \cdot F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2}$$

$$F_S = \frac{2 \cdot (a \cdot b_1) \cdot (a \cdot b_2)}{(a \cdot b_1) + (a \cdot b_2)} \quad [8.2-2]$$

$$F_S = \frac{2 \cdot (2,61 \cdot 1,62) \cdot (2,61 \cdot 2,43)}{(2,61 \cdot 1,62) + (2,61 \cdot 2,43)}$$

$$\underline{\underline{F_S = 5,07m^2}}$$

Ekvivalentní průměr spalín

$$d_e = \frac{4 \cdot F_S}{O}$$

$$d_e = \frac{4 \cdot 5,07}{9,27} \quad [8.2-3]$$

$$\underline{\underline{d_e = 2,19m}}$$

Rychlost spalín

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \left( \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} \right)$$

$$w_S = \frac{7,834}{5,07} \cdot \left( \frac{273,15 + 753,4}{273,15} \right) \quad [8.2-4]$$

$$\underline{\underline{w_S = 5,81m \cdot s^{-1}}}$$

Objemový průtok spalín

$$V_S = M_{pv} \cdot [O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min}]$$

$$V_S = 1,88 \cdot [3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49] \quad [8.2-5]$$

$$\underline{\underline{V_S = 7,834Nm^3 \cdot s^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4}$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0874}{2,19} \cdot \left( \frac{5,81 \cdot 2,19}{117,1 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,5947^{0,4} \quad [8.2-6]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = 7,97 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,362 \cdot (753,4 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{322,5 + 273,15}{753,4 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{322,5 + 273,15}{753,4 + 273,15}} \quad [8.2-7]$$

$$\underline{\underline{\alpha_{sal} = 42,43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

stupeň černosti povrchu stěn

$a_{st} = 0,8$

tlak spalín

$p = 0,1 \text{ Mpa} ,$

celkový parciální tlak

$p_s = 0,0358 \text{ Mpa}$

objemová koncentrace vodní páry

$r_{H_2O} = 0,243$

objemová koncentrace 3-atomových plynů

$r_s = 0,358 \text{ Mpa}$

koncentrace popílku ve spalínách

$\mu_{pk} = 0,00158 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(753,4 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \quad [8.2-8]$$

$$\underline{\underline{k_p = 76,02}}$$

efektivní průměr částic popílku

$d_{pk} = 20 \mu\text{m}$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro svazky hladkých trubek

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S_{st}}$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{10,57}{33,6} \quad [8.2-9]$$

$$\underline{\underline{s = 1,13m}}$$

Objem sálové vrstvy

$$V = \frac{(b_1 + b_2) \cdot h}{2} \cdot a$$

$$V = \frac{(1,62 + 2,43) \cdot 2}{2} \cdot 2,61 \quad [8.2-10]$$

$$\underline{\underline{V = 10,57m^3}}$$

Projekční povrch stěn

$$S_{st} = \sum_i b_i \cdot l_i$$

$$S_{st} = (b_1 + b_2) \cdot h + \sqrt{h^2 + b_1^2} \cdot a + \sqrt{h^2 + b_2^2} \cdot a + (b_1 + b_2) \cdot a \quad [8.2-11]$$

$$S_{st} = (1,62 + 2,43) \cdot 2 + \sqrt{2^2 + 1,62^2} \cdot 2,61 + \sqrt{2^2 + 2,43^2} \cdot 2,61 + (1,62 + 2,43) \cdot 2,61$$

$$\underline{\underline{S_{st} = 33,6m^2}}$$

Účinná sálová plocha stěn II tahu

$$S_{ús} = (S_{st} - (b_1 + b_2) \cdot a) \cdot x_{st}$$

$$S_{ús} = (33,6 - (1,62 + 2,43) \cdot 2,61) \cdot 0,95 \quad [8.2-12]$$

$$\underline{\underline{S_{ús} = 21,88m^2}}$$

úhlový součinitel po konzultaci volen

$x_{st} = 0,95$

Součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny

$$k_S \cdot r_S = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_S$$

$$k_S = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,243}{3,16 \cdot \sqrt{0,0358 \cdot 1,13}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{753,4 + 273,15}{1000} \right) \quad [8.2-13]$$

$$\underline{\underline{k_S = 10,77 MPa^{-1} \cdot m^{-1}}}$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_S \cdot r_S + k_P \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (10,77 \cdot 0,358 + 76,02 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 1,13 \quad [8.2-14]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,449}}$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,449} \quad [8.2-15]$$

$$\underline{\underline{a = 0,362}}$$

Teplota povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{syt} + \varepsilon \cdot q$$

$$t_z = 260 + 0,003 \cdot 20843,25 \quad [8.2-16]$$

$$\underline{\underline{t_z = 322,5^\circ C}}$$

součinitel zanesení volím  $\varepsilon = 0,003 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$

Tepelné zatížení II. tahu

$$q = \frac{Q_1}{S_{ús}} \cdot 10^3$$

$$q = \frac{456}{21,88} \cdot 10^3 \quad [8.2-17]$$

$$\underline{\underline{q = 20843,25 W \cdot m^{-2}}}$$

Předběžné teplo odevzdané spaliny výparníku

$$Q_1 = \Delta I_{sp} \cdot M_{pv}$$

$$Q_1 = 242,58 \cdot 1,88 \quad [8.2-18]$$

$$\underline{\underline{Q_1 = 456 \text{ kW}}}$$

$$\Delta I_{sp} = I_1 - I_2$$

$$\Delta I_{sp} = 4905,5 - 4662,92 \quad [8.2-19]$$

$$\underline{\underline{\Delta I_{sp} = 242,58 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_s = 0,8 \cdot 7,97 + 42,43 \quad [8.2-20]$$

$$\underline{\underline{\alpha_s = 48,806 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel omývání plochy pro výsypku volím  $\omega = 0,8$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s}$$

$$k = \frac{48,806}{1 + 0,003 \cdot 48,806} \quad [8.2-21]$$

$$\underline{\underline{k = 42,57 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel zanesení pro membránové stěny  $\varepsilon = 0,003 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

Střední logaritmičkový spád

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{510,8 - 476}{\ln \frac{510,8}{476}}$$

$$\underline{\underline{\Delta t_{stř} = 493,2^\circ \text{C}}}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{syt}$$

$$\Delta t_1 = 770,8 - 260 = \underline{\underline{510,8^\circ \text{C}}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{syt}$$

$$\Delta t_2 = 736 - 260 = \underline{\underline{476^\circ \text{C}}}$$

[8.2-22]

Teplo odebrané membránovou stěnou spalinám

$$Q_{v\acute{y}s} = k \cdot S \cdot \Delta t_{st\acute{r}} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{v\acute{y}s} = 42,57 \cdot 21,88 \cdot 493,2 \cdot 10^{-3} \quad [8.2-23]$$

$$\underline{\underline{Q_{v\acute{y}s} = 459,4kW}}$$

**8.3 Bilance tepla na straně spalin ve výsypce**Teplo spalin na vstupu

$$Q_{1in} = I_1 \cdot M_{pv}$$

$$Q_{1in} = 4905,5 \cdot 1,88 \quad [8.3-1]$$

$$\underline{\underline{Q_{1in} = 9222,3kW}}$$

Teplo spalin na výstupu

$$Q_{2out} = Q_{1in} - Q_{v\acute{y}s}$$

$$Q_{2out} = 9222,3 - 459,4 \quad [8.3-2]$$

$$\underline{\underline{Q_{2out} = 8762,9kW}}$$

Entalpie výstupních spalin

$$I_{2out} = \frac{Q_{2out}}{M_{pv}}$$

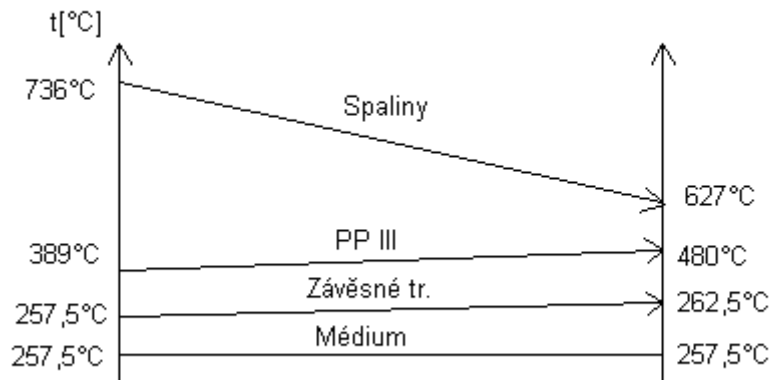
$$I_{2out} = \frac{8762,9}{1,88} \quad [8.3-3]$$

$$\underline{\underline{I_{2out} = 4661,13kJ \cdot kg^{-1}}}$$

Odpovídající teplota spalin na výstupu z výsypky určená z I-t diagramu spalin je 735,9°C  
Teplota se od zvolené liší pouze o 0,1°C což je přijatelné.

**9 VÝPOČET III. TAHU****9.1 Výpočet 1. části III. tahu**

1. část III. tahu tvoří membránové stěny, závěsné trubky a přehříváky III.



Obr. 9 Průběh teplot spalín a média v 1. části

### 9.1.1 Přeřívák III

Vstupní teplota spalín

$$t_1 = 736^\circ\text{C}$$

Výstupní teplota spalín

$$t_2 = 627^\circ\text{C}$$

Střední teplota spalín

$$t_{stř} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{736 + 627}{2}$$

[9.1.1-1]

$$\underline{\underline{t_{stř} = 681,5^\circ\text{C}}}$$

entalpie spalín na vstupu

$$I_{SPP3} = 4661,13\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

entalpie spalín na výstupu

$$I_{SPP2} = 3913,3\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

vstupní teplota páry

$$t_{PP3}^{in} = 389^\circ\text{C}$$

výstupní teplota páry

$$t_{PP3}^{out} = 480^\circ\text{C}$$

entalpie páry na vstupu

$$i_{PP3}^{in} = 3182,8\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

entalpie páry na výstupu

$$i_{PP3}^{out} = 3397,76\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

měrný objem vstup

$$v_{in} = 0,066\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

měrný objem výstup

$$v_{in} = 0,0798\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Střední objem páry

$$v_p = \frac{v_{in} + v_{out}}{2}$$

$$v_p = \frac{0,066 + 0,0798}{2} \quad [9.1.1-2]$$

$$\underline{\underline{v_p = 0,0729m^3 \cdot kg^{-1}}}$$

Střední teplota páry v přehříváku III

$$t_{Pstř} = \frac{t_{PP3}^{in} + t_{PP3}^{out}}{2}$$

$$t_{Pstř} = \frac{389 + 480}{2} \quad [9.1.1-3]$$

$$\underline{\underline{t_{Pstř} = 434,5^\circ C}}$$

**9.1.2 Geometrie III tahu**

přední stěna            a=2,61m  
boční stěna            b=2,43m

Závěsné zařízení přehříváku je konstruováno z trubek 38x6,3 , které podpírají přehřívák. Ten je konstruován jako dvojhad z trubek 38x4,5. Kvůli většímu zanášení trubek volím uspořádání trubek za sebou. Jelikož je přehřívák III zatížen větší teplotou spalin volím větší příčnou i podélnou rozteč.

vnější průměr trubek	$D = 38mm$
vnitřní průměr trubek	$d = 29mm$
uspořádání za sebou, podélná rozteč	$s_2 = (60mm, 90mm)$
příčná rozteč	$s_1 = 0,18m$
počet trubek v řadě	$z_1 = 14$
počet řad	$z_2 = 13$
počet závěsných trubek	$i = 28$
počet hadů	$n = 2$
výška	$h = 1,95m$

Příčná plocha svazku a závěsných trubek

$$S_{tr} = D \cdot l_e \cdot z_1 + i \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$S_{tr} = 0,038 \cdot 2,4 \cdot 14 + 28 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} \quad [9.1.2-1]$$

$$\underline{\underline{S_{tr} = 1,308m^2}}$$

Světlný průřez spalin

$$F_S = a \cdot b - S_{tr}$$

$$F_S = 2,61 \cdot 2,43 - 1,308 \quad [9.1.2-2]$$

$$\underline{\underline{F_S = 5,03m^2}}$$

Rychlost páry v trubkách přehříváku III

$$w_p = \frac{4 \cdot M_p \cdot v_p}{z_1 \cdot n \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$w_p = \frac{4 \cdot 5 \cdot 0,0729}{14 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,029^2} \quad [9.1.2-3]$$

$$\underline{\underline{w_p = 19,7m \cdot s^{-1}}}$$

Objemový průtok spalin

$$V_S = M_{pv} \cdot [O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min}]$$

$$V_S = 1,88 \cdot [3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49] \quad [9.1.2-4]$$

$$\underline{\underline{V_S = 7,834Nm^3 \cdot s^{-1}}}$$

Rychlost spalin

$$w_s = \frac{V_S}{F_S} \cdot \left( \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} \right)$$

$$w_s = \frac{7,834}{5,03} \cdot \left( \frac{273,15 + 681,5}{273,15} \right) \quad [9.1.2-5]$$

$$\underline{\underline{w_s = 5,44m \cdot s^{-1}}}$$

### 9.1.3 Výpočet přehříváku III

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Hodnoty pro střední teplotu 434,5°C

Měrná tepelná vodivost

$$\lambda_p = 0,0626 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Dynamická viskozita

$$\eta_p = 25,86 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$$

Měrná tepelná kapacita

$$c_p = 2,34 \text{ kJ} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr}_p = 0,965$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot \nu_p} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_p^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0626}{0,029} \cdot \left( \frac{19,7 \cdot 0,029}{25,86 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0729} \right)^{0,8} \cdot 0,965^{0,4} \quad [9.1.3-1]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = \alpha_2 = 1188,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí pro uspořádání trubek za sebou

Hodnoty pro střední teplotu 681,5°C

Součinitel tepelné vodivosti spalin

$$\lambda_s = 8,1 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu_s = 103,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,6019$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,081}{0,038} \cdot \left( \frac{5,44 \cdot 0,038}{103,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,6019^{0,33} \quad [9.1.3-2]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = 50,34 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

korekční součinitel na počet řad svazku v podélném směru  $z_2 \geq 10$   $C_z = 1$

korekční součinitel na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D}$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D}$$

$$\sigma_1 = \frac{0,18}{0,038}$$

$$\sigma_2 = \frac{0,078}{0,038}$$

pokud je  $\sigma_2 \geq 2$  je  $C_s = 1$

[9.1.3-3]

$$\underline{\underline{\sigma_1 = 4,74}}$$

$$\underline{\underline{\sigma_2 = 2,05}}$$

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**

Pokud se příčná nebo podélná rozteč trubek ve svazku mění, používá se střední hodnota rozteče podle vztahu:

$$s_2 = \frac{s_I \cdot S_I + s_{II} \cdot S_{II}}{S_I + S_{II}}$$

$$s_2 = \frac{0,06 \cdot 2,016 + 0,09 \cdot 3,024}{2,016 + 3,024} \quad [9.1.3-4]$$

$$\underline{\underline{s_2 = 0,078m}}$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,242 \cdot (681,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{505 + 273,15}{681,5 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{505 + 273,15}{681,5 + 273,15}} \quad [9.1.3-5]$$

$$\underline{\underline{\alpha_{sal} = 32,63W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

tlak spalín

$$p = 0,1Mpa ,$$

celkový parciální tlak

$$p_s = 0,0358Mpa$$

objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = 0,243$$

objemová koncentrace 3-atomových plynů

$$r_s = 0,358Mpa$$

koncentrace popílku ve spalínách

$$\mu_{pk} = 0,00158kg \cdot kg^{-1}$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(681,5 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \quad [9.1.3-6]$$

$$\underline{\underline{k_p = 79,79}}$$

efektivní průměr částic popílku

$$d_{pk} = 20\mu m$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro svazky hladkých trubek

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,18 \cdot 0,078}{0,038^2} - 1 \right) \quad [9.1.3-7]$$

$$\underline{\underline{s = 0,389m}}$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$t_z = t_{Pstř} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{PP3}}{S} \cdot 10^3$$

$$t_z = 434,5 + \left( 0,006 + \frac{1}{1188,3} \right) \cdot \frac{1074,8}{104,3} \cdot 10^3 \quad [9.1.3-8]$$

$$\underline{\underline{t_z = 505^\circ C}}$$

součinitel zanesení pro pro PPIII

$$\varepsilon = 0,006m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$$

Výrobní teplosměnná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot n$$

$$S = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,4 \cdot 14 \cdot 13 \cdot 2$$

$$\underline{\underline{S = 104,3m^2}}$$

Součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,243}{3,16 \cdot \sqrt{0,0358 \cdot 0,389}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{681,5 + 273,15}{1000} \right) \quad [9.1.3-9]$$

$$\underline{\underline{k_s = 19,61MPa^{-1} \cdot m^{-1}}}$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (19,61 \cdot 0,358 + 79,79 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 0,389 \quad [9.1.3-10]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,278}}$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,278} \quad [9.1.3-11]$$

$$\underline{\underline{a = 0,242}}$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_1 = 0,9 \cdot 50,34 + 31,63 \quad [9.1.3-12]$$

$$\underline{\underline{\alpha_1 = 77,94 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel omývání plochy pro přehřívák volím  $\omega = 0,9$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$$

$$k = \frac{0,6 \cdot 77,94}{1 + \frac{77,94}{1188,3}} \quad [9.1.3-13]$$

$$\underline{\underline{k = 43,89}}$$

součinitel tepelné efektivity, pro dřevité palivo  $\psi = 0,6$

Střední logaritmický spád

zapojení PPIII je souproud

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{347 - 147}{\ln \frac{347}{147}}$$

$$\underline{\underline{\Delta t_{stř} = 232,86^\circ\text{C}}}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{PP3}^{in}$$

$$\Delta t_1 = 736 - 389 = \underline{\underline{347^\circ\text{C}}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{PP3}^{out}$$

$$\Delta t_2 = 627 - 480 = \underline{\underline{147^\circ\text{C}}}$$

[9.1.3-14]

Velikost výhřevné plochy PPIII

$$S_{PP3} = \frac{Q_{PP3}}{k \cdot \Delta t_{stř}} \cdot 10^3$$

$$S_{PP3} = \frac{1074,8}{43,89 \cdot 232,86} \cdot 10^3 \quad [9.1.3-15]$$

$$\underline{\underline{S_{PP3} = 105,16m^2}}$$

Velikosti výhřevných ploch se od sebe liší pouze o (105,16 a 104,3m) 0,81%

**9.1.4 Výpočet membránové stěny**

Hodnoty pro střední teplotu 681,5°C

Součinitel tepelné vodivosti spalin

$$\lambda_s = 8,1 \cdot 10^{-2} W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu_s = 103,6 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 0,6019$$

Obvod spalinovodu

$$O = 2 \cdot (a + b) + i \cdot \pi \cdot D + 2 \cdot z_1 \cdot (l_e + D)$$

$$O = 2 \cdot (2,61 + 2,43) + 28 \cdot \pi \cdot 0,038 + 2 \cdot 14 \cdot (2,4 + 0,038) \quad [9.1.4-1]$$

$$\underline{\underline{O = 81,69m}}$$

Ekvivalentní průměr spalin

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{O}$$

$$d_e = \frac{4 \cdot 5,03}{96,21} \quad [9.1.4-2]$$

$$\underline{\underline{d_e = 0,209m}}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,081}{0,209} \cdot \left( \frac{5,44 \cdot 0,209}{103,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,6019^{0,4} \quad [9.1.4-3]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = 12,42W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,221 \cdot (681,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{486,11 + 273,15}{681,5 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{447,6 + 273,15}{681,5 + 273,15}} \quad [9.1.4-4]$$

$$\underline{\underline{\alpha_{sal} = 24,15 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

tlak spalin

$$p = 0,1 Mpa,$$

celkový parciální tlak

$$p_s = 0,0358 Mpa$$

objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = 0,243$$

objemová koncentrace 3-atomových plynů

$$r_s = 0,358 Mpa$$

koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = 0,00158 kg \cdot kg^{-1}$$

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(681,5 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \quad [9.1.4-5]$$

$$\underline{\underline{k_p = 79,79}}$$

efektivní průměr částic popílku

$$d_{pk} = 20 \mu m$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy**

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{a} + \frac{1}{h} + \frac{1}{s_1}}$$

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{2,61} + \frac{1}{1,95} + \frac{1}{0,18}} \quad [9.1.4-6]$$

$$\underline{\underline{s = 0,279 m}}$$

Součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,243}{3,16 \cdot \sqrt{0,0358 \cdot 0,279}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{681,5 + 273,15}{1000} \right) \quad [9.1.4-7]$$

$$\underline{\underline{k_s = 2468 MPa^{-1} \cdot m^{-1}}}$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (24,68 \cdot 0,358 + 79,79 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 0,279 \quad [9.1.4-8]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,25}}$$

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,25} \quad [9.1.4-9]$$

$$\underline{\underline{a = 0,221}}$$

Teplota povrchu nánosu na trubkách

$$t_z = t_{syt} + \varepsilon \cdot q$$

$$t_z = 260 + 0,003 \cdot 75371,18 \quad [9.1.4-10]$$

$$\underline{\underline{t_z = 486,1^\circ C}}$$

součinitel zanesení volím  $\varepsilon = 0,003 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$

Tepelné zatížení III. tahu 1. části

$$q = \frac{Q_1}{F_{ús}} \cdot 10^3$$

$$q = \frac{1407,18}{18,67} \cdot 10^3 \quad [9.1.4-11]$$

$$\underline{\underline{q = 75371,18 W \cdot m^{-2}}}$$

Předběžné teplo odevzdané spaliny výparníku

$$Q_1 = \Delta I_{sp} \cdot M_{pv}$$

$$Q_1 = 748,5 \cdot 1,88 \quad [9.1.4-12]$$

$$\underline{\underline{Q_1 = 1407,18 \text{ kW}}}$$

$$\Delta I_{sp} = I_1 - I_2$$

$$\Delta I_{sp} = 4661,8 - 3913,3 \quad [9.1.4-13]$$

$$\underline{\underline{\Delta I_{sp} = 748,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Účinná sálavá plocha stěn kanálu

$$F_{ús} = 2 \cdot h \cdot (a + b) \cdot x_{st}$$

$$F_{ús} = 2 \cdot 1,95 \cdot (2,61 + 2,43) \cdot 0,95 \quad [9.1.4-14]$$

$$\underline{\underline{F_{ús} = 18,67 \text{ m}^2}}$$

úhlový součinitel po konzultaci volen

$$x_{st} = 0,95$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_s = 0,9 \cdot 12,42 + 24,15 \quad [9.1.4-15]$$

$$\underline{\underline{\alpha_s = 35,33 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel omývání plochy pro membránovou stěnu volím

$$\omega = 0,9$$

Součinitel prostupu tepla

pro výparníkové plochy

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s}$$

$$k = \frac{35,33}{1 + 0,003 \cdot 35,33} \quad [9.1.4-16]$$

$$\underline{\underline{k = 31,92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel zanesení pro membránové stěny

$$\varepsilon = 0,003 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Střední logaritmický spád

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{syt}$$

$$\Delta t_1 = 736 - 260 = \underline{\underline{476^\circ C}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{syt}$$

$$\Delta t_2 = 627 - 260 = \underline{\underline{367^\circ C}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{476 - 367}{\ln \frac{476}{367}}$$

$$\underline{\underline{\Delta t_{stř} = 419,14^\circ C}}$$
[9.1.4-17]

Teplu odebrané membránovou stěnou spalínám

$$Q_{mem} = k \cdot S \cdot \Delta t_{stř} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{mem} = 31,92 \cdot 18,67 \cdot 419,14 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{\underline{Q_{mem} = 249,78 kW}}$$
[9.1.4-18]

**9.1.5 Výpočet závěsných trubek**

vstupní teplota páry	$t_{zv}^{in} = 257,5^\circ C$
výstupní teplota páry	$t_{zv}^{out} = 262,5^\circ C$
tlak na vstupu	$p_{zv}^{in} = 4,55^\circ C$
tlak na výstupu	$p_{zv}^{out} = 4,53^\circ C$
entalpie páry na vstupu	$i_{zv}^{in} = 2797,5 kJ \cdot kg^{-1}$
entalpie páry na výstupu	$i_{zv}^{out} = 2818,5 kJ \cdot kg^{-1}$
měrný objem vstup	$v_{in} = 0,0441 m^3 \cdot kg^{-1}$
měrný objem výstup	$v_{out} = 0,045 m^3 \cdot kg^{-1}$

Střední objem páry

$$v_p = \frac{v_{in} + v_{out}}{2}$$

$$v_p = \frac{0,0441 + 0,045}{2}$$

$$\underline{\underline{v_p = 0,04455 m^3 \cdot kg^{-1}}}$$
[9.1.5-1]

Střední teplota páry v závěsných trubkách

$$t_{Pstř} = \frac{t_{zv}^{in} + t_{zv}^{out}}{2}$$

$$t_{Pstř} = \frac{257,5 + 262,5}{2} \quad [9.1.5-2]$$

$$\underline{\underline{t_{Pstř} = 260^{\circ}\text{C}}}$$

Rychlost páry v závěsných trubkách

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_p - M_v) \cdot v_p}{i \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (5 - 0,25) \cdot 0,04455}{28 \cdot \pi \cdot 0,0254^2} \quad [9.1.5-3]$$

$$\underline{\underline{w_p = 14,92 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Hodnoty pro střední teplotu 260°C

Měrná tepelná vodivost

$\lambda_p = 0,0531 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Dynamická viskozita

$\eta_p = 17,9 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita

$c_p = 2,48 \text{ kJ} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$

Prandtlovo číslo

$\text{Pr}_p = 1,378$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot v_p} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_p^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0531}{0,0254} \cdot \left( \frac{14,92 \cdot 0,0254}{17,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,04455} \right)^{0,8} \cdot 1,2986^{0,4} \quad [9.1.5-4]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = \alpha_2 = 1857,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Hodnota konvekce ze strany spalín se u výpočtu závěsných trubek uvažuje stejná jako u svazku, který je na nich zavěšen, tedy:

$$\underline{\underline{\alpha_k = 50,34 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,242 \cdot (681,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{360 + 273,15}{681,5 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{360 + 273,15}{681,5 + 273,15}} \quad [9.1.5-5]$$

$$\underline{\underline{\alpha_{sal} = 25,87W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

tlak spalin

$$p = 0,1Mpa ,$$

celkový parciální tlak

$$p_s = 0,0358Mpa$$

objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = 0,243$$

objemová koncentrace 3-atomových plynů

$$r_s = 0,358Mpa$$

koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = 0,00158kg \cdot kg^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(681,5 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \quad [9.1.5-6]$$

$$\underline{\underline{k_p = 79,79}}$$

efektivní průměr částic popílku

$$d_{pk} = 20\mu m$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy závěsných trubek je stejná jako u svazku, který je na nich zavěšen.

$$\underline{\underline{s = 0,389m}}$$

Součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny

$$k_S \cdot r_S = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_S \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_S$$

$$k_S = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,243}{3,16 \cdot \sqrt{0,0358 \cdot 0,389}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{681,5 + 273,15}{1000} \right) \quad [9.1.5-7]$$

$$\underline{\underline{k_S = 19,68 MPa^{-1} \cdot m^{-1}}}$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_S \cdot r_S + k_P \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (19,68 \cdot 0,358 + 79,79 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 0,389 \quad [9.1.5-8]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,278}}$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,278} \quad [9.1.5-9]$$

$$\underline{\underline{a = 0,242}}$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$t_z = t_{p_{stř}} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_1}{S} \cdot 10^3$$

$$t_z = 260 + \left( 0,006 + \frac{1}{1857,4} \right) \cdot \frac{99,75}{6,52} \cdot 10^3 \quad [9.1.5-10]$$

$$\underline{\underline{t_z = 360^\circ C}}$$

součinitel zanesení pro závěsné trubky

$$\varepsilon = 0,006 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$$

Výrobní teplosměnná plocha závěsných trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot h \cdot i$$

$$S = \pi \cdot 0,038 \cdot 1,95 \cdot 28 \quad [9.1.5-11]$$

$$\underline{\underline{S = 6,52 m^2}}$$

Předběžné teplo odebrané závěsnými trubkami

$$Q_1 = (M_p - M_v) \cdot (i_2 - i_1)$$

$$Q_1 = (5 - 0,25) \cdot (2818,5 - 2797,5) \quad [9.1.5-12]$$

$$\underline{\underline{Q_1 = 99,75 \text{ kW}}}$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_1 = 0,9 \cdot 50,34 + 25,87 \quad [9.1.5-13]$$

$$\underline{\underline{\alpha_1 = 71,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel omývání plochy pro závěsné trubky volím

$$\omega = 0,9$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1$$

$$k = 0,6 \cdot 71,17 \quad [9.1.5-14]$$

$$\underline{\underline{k = 42,7}}$$

součinitel tepelné efektivity, pro dřevité palivo

$$\psi = 0,6$$

Střední logaritmický spád

zapojení závěsných trubek je souproud

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{478,5 - 364,5}{\ln \frac{478,5}{364,5}}$$

$$\underline{\underline{\Delta t_{stř} = 418,92^\circ \text{C}}}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{zv}^{out}$$

$$\Delta t_1 = 736 - 257,5 = \underline{\underline{478,5^\circ \text{C}}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{zv}^{in}$$

$$\Delta t_2 = 627 - 262,5 = \underline{\underline{364,5^\circ \text{C}}}$$

[9.1.5-15]

Teplo odebrané (skutečné) závěsnými trubkami

$$Q_{zv} = k \cdot S \cdot \Delta t_{stř} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{zv} = 42,7 \cdot 6,52 \cdot 418,92 \cdot 10^{-3} \quad [9.1.5-16]$$

$$\underline{\underline{Q_{zv} = 116,64 \text{ kW}}}$$

Přepoččet výstupní entalpie páry závěsných trubek

$$i_{zv}^{out} = \frac{Q_{zv} + (M_p - M_v) \cdot i_1}{(M_p - M_v)}$$

$$i_{zv}^{out} = \frac{116,64 + (5 - 0,25) \cdot 2797,5}{(5 - 0,25)} \quad [9.1.5-17]$$

$$\underline{\underline{i_{zv}^{out} = 2822 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Této entalpii a tlaku odpovídá teplota 263,2°C což se od zvolené teploty 262,5°C liší jen minimálně což je přijatelné.

**9.1.6 Přepoččet teploty spalin na výstupu z 1. části III. tahu**Celkové teplo

$$Q_C = Q_{zv} + Q_{mem} + Q_{PP3}$$

$$Q_C = 116,64 + 249,78 + 1074,8 \quad [9.1.6-1]$$

$$\underline{\underline{Q_C = 1441,22 \text{ kW}}}$$

Teplo spalin na vstupu

$$Q_{1in} = I_1 \cdot M_{pv}$$

$$Q_{1in} = 4661,8 \cdot 1,88 \quad [9.1.6-2]$$

$$\underline{\underline{Q_{1in} = 8764,18 \text{ kW}}}$$

Teplo spalin na výstupu

$$Q_{2out} = Q_{1in} - Q_C$$

$$Q_{2out} = 8764,18 - 1441,22 \quad [9.1.6-3]$$

$$\underline{\underline{Q_{2out} = 7322,96 \text{ kW}}}$$

Entalpie výstupních spalin

$$I_{2out} = \frac{Q_{2out}}{M_{pv}}$$

$$I_{2out} = \frac{7322,96}{1,88} \quad [9.1.6-4]$$

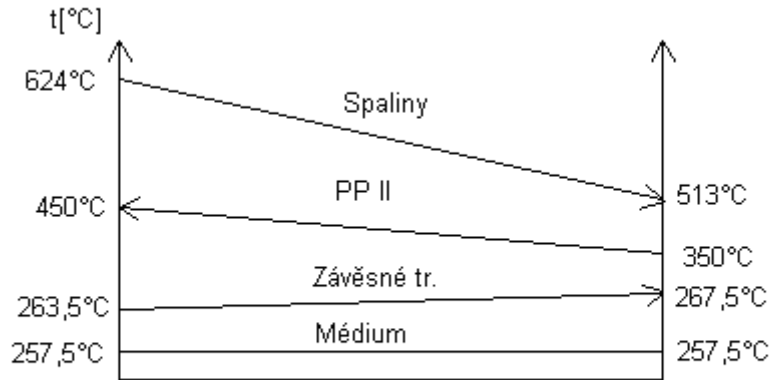
$$\underline{\underline{I_{2out} = 3895,19 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Odpovídající teplota spalin na výstupu z PP3 určená z I-t diagramu spalin je 624°C.

Teplota se od zvolené liší pouze o 3°C což je přijatelné.

## 9.2 Výpočet 2. části III. tahu

1. část III. tahu tvoří membránové stěny, závěsné trubky a přehříváky II.



Obr. 10 Průběh teplot spalín a média v 2. části

### 9.2.1 Přehřívák II

Vstupní teplota spalín

$$t_1 = 624^{\circ}\text{C}$$

Výstupní teplota spalín

$$t_2 = 513^{\circ}\text{C}$$

Střední teplota spalín

$$t_{stř} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{624 + 513}{2}$$

[9.2.1-1]

$$\underline{\underline{t_{stř} = 568,5^{\circ}\text{C}}}$$

entalpie spalín na vstupu

$$I_{SPP2} = 3895,19 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

entalpie spalín na výstupu

$$I_{SPP2} = 3153,79 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

vstupní teplota páry

$$t_{PP2}^{in} = 350^{\circ}\text{C}$$

výstupní teplota páry

$$t_{PP2}^{out} = 450^{\circ}\text{C}$$

entalpie páry na vstupu

$$i_{PP2}^{in} = 3083,9 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

entalpie páry na výstupu

$$i_{PP2}^{out} = 3327 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

měrný objem vstup

$$v_{in} = 0,0599 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

měrný objem výstup

$$v_{in} = 0,0742 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Střední objem páry

$$v_p = \frac{v_{in} + v_{out}}{2}$$

$$v_p = \frac{0,0599 + 0,0742}{2} \quad [9.2.1-2]$$

$$\underline{\underline{v_p = 0,067m^3 \cdot kg^{-1}}}$$

Střední teplota páry v přehříváku II

$$t_{Pstř} = \frac{t_{PP2}^{in} + t_{PP2}^{out}}{2}$$

$$t_{Pstř} = \frac{350 + 450}{2} \quad [9.2.1-3]$$

$$\underline{\underline{t_{Pstř} = 400^\circ C}}$$

Geometrie III tahu

přední stěna            a=2,61m  
boční stěna            b=2,43m

Závěsné zařízení přehříváku je konstruováno z trubek 38 x 6,3, které podpírají přehřívák. Ten je konstruován jako jednohad z trubek 38x4,5.

vnější průměr trubek	$D = 38mm$
vnitřní průměr trubek	$d = 29mm$
uspořádání za sebou, podélná rozteč	$s_2 = 90mm$
příčná rozteč	$s_1 = 0,09m$
počet trubek v řadě	$z_1 = 28$
počet řad	$z_2 = 21$
počet závěsných trubek	$i = 28$
počet hadů	$n = 1$
výška	$h = 1,89m$

Příčná plocha svazku a závěsných trubek

$$S_{tr} = D \cdot l_e \cdot z_1 + i \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$S_{tr} = 0,038 \cdot 2,4 \cdot 28 + 28 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} \quad [9.2.1-4]$$

$$\underline{\underline{S_{tr} = 2,585m^2}}$$

Světlný průřez spalín

$$F_S = a \cdot b - S_{tr}$$

$$F_S = 2,61 \cdot 2,43 - 2,585 \quad [9.2.1-5]$$

$$\underline{\underline{F_S = 3,7573m^2}}$$

Rychlost páry v trubkách přehříváku II

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_p - M_v) \cdot v_p}{z_1 \cdot n \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (5 - 0,25) \cdot 0,067}{28 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,029^2} \quad [9.2.1-6]$$

$$\underline{\underline{w_p = 17,2m \cdot s^{-1}}}$$

Objemový průtok spalín

$$V_S = M_{pv} \cdot [O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min}]$$

$$V_S = 1,88 \cdot [3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49] \quad [9.2.1-7]$$

$$\underline{\underline{V_S = 7,834Nm^3 \cdot s^{-1}}}$$

Rychlost spalín

$$w_s = \frac{V_S}{F_S} \cdot \left( \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} \right)$$

$$w_s = \frac{7,834}{3,7573} \cdot \left( \frac{273,15 + 568,5}{273,15} \right) \quad [9.2.1-8]$$

$$\underline{\underline{w_s = 6,42m \cdot s^{-1}}}$$

**9.2.2 Výpočet přehříváku II**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Hodnoty pro střední teplotu 400°C

Měrná tepelná vodivost

$$\lambda_p = 0,0669W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Dynamická viskozita

$$\eta_p = 24,37 \mu Pa \cdot s^{-1}$$

Měrná tepelná kapacita

$$c_p = 2,398kJ \cdot kg \cdot K^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr_p = 0,986$$

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot \nu_p} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_p^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0669}{0,029} \cdot \left( \frac{17,2 \cdot 0,029}{24,37 \cdot 10^{-6} \cdot 0,067} \right)^{0,8} \cdot 0,986^{0,4} \quad [9.2.2-1]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = \alpha_2 = 1289,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro uspořádání trubek za sebou na straně spalín

Hodnoty pro střední teplotu 568,5°C

Součinitel tepelné vodivosti spalín

$\lambda_s = 7,15 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Kinematická viskozita spalín

$\nu_s = 84,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Prandtlovo číslo

$\text{Pr} = 0,6132$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0715}{0,038} \cdot \left( \frac{6,42 \cdot 0,038}{84,15 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,6132^{0,33} \quad [9.2.2-2]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = 57 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

korekční součinitel na počet řad svazku v podélném směru  $z_2 \geq 10$   $C_z = 1$ korekční součinitel na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D}$$

$$\sigma_1 = \frac{0,09}{0,038} \quad \sigma_2 = \frac{0,09}{0,038} \quad \text{pokud je } \sigma_2 \geq 2 \text{ je } C_s = 1 \quad [9.2.2-3]$$

$$\underline{\underline{\sigma_1 = 2,37}} \quad \underline{\underline{\sigma_2 = 2,37}}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,196 \cdot (568,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{446,4 + 273,15}{568,5 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{446,4 + 273,15}{568,5 + 273,15}} \quad [9.2.2-4]$$

$$\underline{\underline{\alpha_{sal} = 19,25W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

tlak spalin

$$p = 0,1Mpa ,$$

celkový parciální tlak

$$p_s = 0,0358Mpa$$

objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = 0,243$$

objemová koncentrace 3atomových plynů

$$r_s = 0,358Mpa$$

koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = 0,00158kg \cdot kg^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(568,5 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \quad [9.2.2-5]$$

$$\underline{\underline{k_p = 86,78}}$$

efektivní průměr částic popílku

$$d_{pk} = 20\mu m$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro svazky hladkých trubek

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,09 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) \quad [9.2.2-6]$$

$$\underline{\underline{s = 0,21m}}$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$t_z = t_{pstr} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{PP2}}{S} \cdot 10^3$$

$$t_z = 400 + \left( 0,006 + \frac{1}{1289,2} \right) \cdot \frac{1154,7}{168,47} \cdot 10^3 \quad [9.2.2-7]$$

$$\underline{\underline{t_z = 446,4^\circ\text{C}}}$$

součinitel zanesení pro PPII

$$\varepsilon = 0,006 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Výrobní teplosměnná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot n$$

$$S = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,4 \cdot 28 \cdot 21 \cdot 1 \quad [9.2.2-8]$$

$$\underline{\underline{S = 168,47 \text{ m}^2}}$$

Součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,243}{3,16 \cdot \sqrt{0,0358 \cdot 0,21}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{568,5 + 273,15}{1000} \right) \quad [9.2.2-9]$$

$$\underline{\underline{k_s = 28,67 \text{ MPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}}}$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (28,67 \cdot 0,358 + 86,78 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 0,21 \quad [9.2.2-10]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,218}}$$

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,218} \quad [9.2.2-11]$$

$$\underline{\underline{a = 0,196}}$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_1 = 0,9 \cdot 57 + 19,25$$

[9.2.2-12]

$$\underline{\underline{\alpha_1 = 70,55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel omývání plochy pro přehřívák volím

$$\omega = 0,9$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$$

$$k = \frac{0,6 \cdot 70,55}{1 + \frac{70,55}{1289,2}}$$

[9.2.2-13]

$$\underline{\underline{k = 40,13}}$$

součinitel tepelné efektivity, pro dřevité palivo

$$\psi = 0,6$$

Střední logaritmický spád

zapojení PPII je protiproud

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{174 - 163}{\ln \frac{174}{163}}$$

$$\underline{\underline{\Delta t_{stř} = 168,4^\circ \text{C}}}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{PP2}^{out}$$

$$\Delta t_1 = 624 - 450 = \underline{\underline{174^\circ \text{C}}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{PP2}^{in}$$

$$\Delta t_2 = 513 - 350 = \underline{\underline{163^\circ \text{C}}}$$

[9.2.2-14]

Velikost výhřevné plochy PPII

$$S_{PP2} = \frac{Q_{PP2}}{k \cdot \Delta t_{stř}} \cdot 10^3$$

$$S_{PP2} = \frac{1154,7}{40,13 \cdot 168,4} \cdot 10^3$$

[9.2.2-15]

$$\underline{\underline{S_{PP2} = 170,8 \text{ m}^2}}$$

Velikosti výhřevných ploch se od sebe liší pouze o (170,8m a 168,47m) 1,37%

### 9.2.3 Výpočet membránové stěny

Hodnoty pro střední teplotu 568,5°C

Součinitel tepelné vodivosti spalin

$$\lambda_s = 7,15 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu_s = 84,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,6132$$

Obvod spalinovodu

$$O = 2 \cdot (a + b) + i \cdot \pi \cdot D + 2 \cdot z_1 \cdot (l_e + D)$$

$$O = 2 \cdot (2,61 + 2,43) + 28 \cdot \pi \cdot 0,038 + 2 \cdot 28 \cdot (2,4 + 0,038) \quad [9.2.3-1]$$

$$\underline{\underline{O = 149,95 \text{ m}}}$$

Ekvivalentní průměr spalin

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{O}$$

$$d_e = \frac{4 \cdot 3,7573}{149,95} \quad [9.2.3-2]$$

$$\underline{\underline{d_e = 0,1 \text{ m}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4}$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0715}{0,1} \cdot \left( \frac{6,44 \cdot 0,1}{84,15 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,6132^{0,4} \quad [9.2.3-3]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = 17,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,169 \cdot (568,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{492,4 + 273,15}{568,5 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{492,4 + 273,15}{568,5 + 273,15}} \quad [9.2.3-4]$$

$$\underline{\underline{\alpha_{sal} = 18,03W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

tlak spalin

$$p = 0,1Mpa ,$$

celkový parciální tlak

$$p_s = 0,0358Mpa$$

objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = 0,243$$

objemová koncentrace 3-atomových plynů

$$r_s = 0,358Mpa$$

koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = 0,00158kg \cdot kg^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(568,5 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \quad [9.2.3-5]$$

$$\underline{\underline{k_p = 86,78}}$$

efektivní průměr částic popílku

$$d_{pk} = 20\mu m$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{a} + \frac{1}{h} + \frac{1}{s_1}}$$

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{2,61} + \frac{1}{1,89} + \frac{1}{0,09}} \quad [9.2.3-6]$$

$$\underline{\underline{s = 0,15m}}$$

Součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,243}{3,16 \cdot \sqrt{0,0358 \cdot 0,15}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{568,5 + 273,15}{1000} \right) \quad [9.2.3-7]$$

$$\underline{\underline{k_s = 34,05 MPa^{-1} \cdot m^{-1}}}$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (34,05 \cdot 0,358 + 86,78 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 0,15 \quad [9.2.3-8]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,185}}$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,185} \quad [9.2.3-9]$$

$$\underline{\underline{a = 0,169}}$$

Teplota povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{syt} + \varepsilon \cdot q$$

$$t_z = 260 + 0,003 \cdot 77473,6 \quad [9.2.3-10]$$

$$\underline{\underline{t_z = 492,4^\circ C}}$$

součinitel zanesení volím  $\varepsilon = 0,003 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$

Tepelné zatížení III. tahu 2. části

$$q = \frac{Q_1}{F_{ús}} \cdot 10^3$$

$$q = \frac{1393,75}{17,99} \cdot 10^3 \quad [9.2.3-11]$$

$$\underline{\underline{q = 77473,6 W \cdot m^{-2}}}$$

Předběžné teplo odevzdané spaliny výparníku

$$Q_1 = \Delta I_{sp} \cdot M_{pv}$$

$$Q_1 = 741,36 \cdot 1,88 \quad [9.2.3-12]$$

$$\underline{\underline{Q_1 = 1393,75 \text{ kW}}}$$

$$\Delta I_{sp} = I_1 - I_2$$

$$\Delta I_{sp} = 3895,15 - 3153,79$$

$$\underline{\underline{\Delta I_{sp} = 741,36 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Účinná sálavá plocha stěn kanálu

$$F_{ús} = 2 \cdot h \cdot (a + b) \cdot x_{st}$$

$$F_{ús} = 2 \cdot 1,89 \cdot (2,61 + 2,4) \cdot 0,95 \quad [9.2.3-13]$$

$$\underline{\underline{F_{ús} = 17,99 \text{ m}^2}}$$

úhlový součinitel po konzultaci volen

$$x_{st} = 0,95$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_s = 0,9 \cdot 17,3 + 18,03 \quad [9.2.3-14]$$

$$\underline{\underline{\alpha_s = 33,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel omývání plochy pro membránovou stěnu volím

$$\omega = 0,9$$

Součinitel prostupu tepla

pro výparníkové plochy

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s}$$

$$k = \frac{33,6}{1 + 0,003 \cdot 33,6} \quad [9.2.3-15]$$

$$\underline{\underline{k = 30,52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel zanesení pro membránové stěny

$$\varepsilon = 0,003 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Střední logaritmický spád

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{364 - 253}{\ln \frac{364}{253}}$$

$$\Delta t_{stř} = 305,14^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{syt}$$

$$\Delta t_1 = 624 - 260 = \underline{\underline{364^\circ\text{C}}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{syt}$$

$$\Delta t_2 = 513 - 260 = \underline{\underline{253^\circ\text{C}}}$$
[9.2.3-16]

Teplu odebrané membránovou stěnou spalínám

$$Q_{mem} = k \cdot S \cdot \Delta t_{stř} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{mem} = 30,52 \cdot 17,99 \cdot 305,14 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{\underline{Q_{mem} = 167,54 \text{ kW}}}$$
[9.2.3-17]

**9.2.4 Výpočet závěsných trubek**

vstupní teplota páry	$t_{zv}^{in} = 263,5^\circ\text{C}$
výstupní teplota páry	$t_{zv}^{out} = 267,5^\circ\text{C}$
tlak na vstupu	$p_{zv}^{in} = 4,53^\circ\text{C}$
tlak na výstupu	$p_{zv}^{out} = 4,51^\circ\text{C}$
entalpie páry na vstupu	$i_{zv}^{in} = 2824 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
entalpie páry na výstupu	$i_{zv}^{out} = 2837,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
měrný objem vstup	$v_{in} = 0,0451 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
měrný objem výstup	$v_{out} = 0,046 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Střední objem páry

$$v_p = \frac{v_{in} + v_{out}}{2}$$

$$v_p = \frac{0,0451 + 0,046}{2}$$

$$\underline{\underline{v_p = 0,04555 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}}$$
[9.2.4-1]

Střední teplota páry v závěsných trubkách

$$t_{Pstř} = \frac{t_{zv}^{in} + t_{zv}^{out}}{2}$$

$$t_{Pstř} = \frac{263,5 + 267,5}{2} \quad [9.2.4-2]$$

$$\underline{\underline{t_{Pstř} = 265,5^{\circ}C}}$$

Rychlost páry v závěsných trubkách

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_p - M_v) \cdot v_p}{i \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (5 - 0,25) \cdot 0,04455}{28 \cdot \pi \cdot 0,0254^2} \quad [9.2.4-3]$$

$$\underline{\underline{w_p = 14,92m \cdot s^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Hodnoty pro střední teplotu 265,5°C

Měrná tepelná vodivost

$\lambda_p = 0,05271W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Dynamická viskozita

$\eta_p = 18,19\mu Pa \cdot s^{-1}$

Měrná tepelná kapacita

$c_p = 2,33kJ \cdot kg \cdot K^{-1}$

Prandtlovo číslo

$Pr_p = 1,304$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0527}{0,0254} \cdot \left( \frac{14,92 \cdot 0,0254}{18,19 \cdot 10^{-6} \cdot 0,04455} \right)^{0,8} \cdot 1,304^{0,4} \quad [9.2.4-4]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = \alpha_2 = 1822,9W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Hodnota konvekce ze strany spalín se u výpočtu závěsných trubek uvažuje stejná jako u svazku, který je na nich zavěšen, tedy:

$$\underline{\underline{\alpha_k = 57W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,196 \cdot (568,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{331,9 + 273,15}{568,5 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{331,9 + 273,15}{568,5 + 273,15}} \quad [9.2.4-5]$$

$$\underline{\underline{\alpha_{sal} = 15,63W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

tlak spalin

$$p = 0,1Mpa ,$$

celkový parciální tlak

$$p_s = 0,0358Mpa$$

objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = 0,243$$

objemová koncentrace 3-atomových plynů

$$r_s = 0,358Mpa$$

koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = 0,00158kg \cdot kg^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(568,5 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \quad [9.2.4-6]$$

$$\underline{\underline{k_p = 86,78}}$$

efektivní průměr částic popílku

$$d_{pk} = 20\mu m$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy závěsných trubek je stejná jako u svazku, který je na nich zavěšen.

$$\underline{\underline{s = 0,21m}}$$

Součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,243}{3,16 \cdot \sqrt{0,0358 \cdot 0,21}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{568,5 + 273,15}{1000} \right) \quad [9.2.4-7]$$

$$\underline{\underline{k_s = 28,67 MPa^{-1} \cdot m^{-1}}}$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (28,67 \cdot 0,358 + 86,78 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 0,21 \quad [9.2.4-8]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,218}}$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,218} \quad [9.2.4-9]$$

$$\underline{\underline{a = 0,196}}$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$t_z = t_{Pstř} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_1}{S} \cdot 10^3$$

$$t_z = 265,5 + \left( 0,006 + \frac{1}{1822,9} \right) \cdot \frac{64,125}{6,32} \cdot 10^3 \quad [9.2.4-10]$$

$$\underline{\underline{t_z = 331,9^\circ C}}$$

součinitel zanesení pro závěsné trubky

$$\varepsilon = 0,006 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$$

Výrobní teplosměnná plocha závěsných trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot h \cdot i$$

$$S = \pi \cdot 0,038 \cdot 1,89 \cdot 28 \quad [9.2.4-11]$$

$$\underline{\underline{S = 6,32 m^2}}$$

Předběžné teplo odebrané závěsnými trubkami

$$Q_1 = (M_p - M_v) \cdot (i_2 - i_1)$$

$$Q_1 = (5 - 0,25) \cdot (2837,5 - 2824) \quad [9.2.4-12]$$

$$\underline{\underline{Q_1 = 64,125 \text{ kW}}}$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_1 = 0,9 \cdot 57 + 15,63 \quad [9.2.4-13]$$

$$\underline{\underline{\alpha_1 = 66,93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel omývání plochy pro závěsné trubky volím

$$\omega = 0,9$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1$$

$$k = 0,6 \cdot 66,93 \quad [9.2.4-14]$$

$$\underline{\underline{k = 40,16}}$$

součinitel tepelné efektivity, pro dřevité palivo

$$\psi = 0,6$$

Střední logaritmický spád

zapojení závěsných trubek je souproud

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{360,5 - 245,5}{\ln \frac{360,5}{245,5}}$$

$$\underline{\underline{\Delta t_{stř} = 299,33^\circ \text{C}}}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{zv}^{out}$$

$$\Delta t_1 = 624 - 263,5 = \underline{\underline{360,5^\circ \text{C}}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{zv}^{in}$$

$$\Delta t_2 = 513 - 267,5 = \underline{\underline{245,5^\circ \text{C}}}$$

[9.2.4-15]

Teplo odebrané (skutečné) závěsnými trubkami

$$Q_{zv} = k \cdot S \cdot \Delta t_{stř} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{zv} = 40,16 \cdot 6,32 \cdot 299,33 \cdot 10^{-3} \quad [9.2.4-16]$$

$$\underline{\underline{Q_{zv} = 75,97 \text{ kW}}}$$

Přepoččet výstupní entalpie páry závěsných trubek

$$i_{zv}^{out} = \frac{Q_{zv} + (M_p - M_v) \cdot i_1}{(M_p - M_v)}$$

$$i_{zv}^{out} = \frac{86,5 + (5 - 0,25) \cdot 2824}{(5 - 0,25)} \quad [9.2.4-17]$$

$$\underline{\underline{i_{zv}^{out} = 2839 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Této entalpii a tlaku odpovídá teplota 267,8°C což se od zvolené teploty 267,5°C liší minimálně což je přijatelné.

**9.2.5 Přepoččet teploty spalin na výstupu z 2. části III tahu**Celkové teplo

$$Q_C = Q_{zv} + Q_{mem} + Q_{PP2}$$

$$Q_C = 75,97 + 167,54 + 1154,7 \quad [9.2.5-1]$$

$$\underline{\underline{Q_C = 1398,21 \text{ kW}}}$$

Teplo spalin na vstupu

$$Q_{1in} = I_1 \cdot M_{pv}$$

$$Q_{1in} = 3895,15 \cdot 1,88 \quad [9.2.5-2]$$

$$\underline{\underline{Q_{1in} = 7322,88 \text{ kW}}}$$

Teplo spalin na výstupu

$$Q_{2out} = Q_{1in} - Q_C$$

$$Q_{2out} = 7322,88 - 1398,21 \quad [9.2.5-3]$$

$$\underline{\underline{Q_{2out} = 5924,67 \text{ kW}}}$$

Entalpie výstupních spalin

$$I_{2out} = \frac{Q_{2out}}{M_{pv}}$$

$$I_{2out} = \frac{5924,67}{1,88} \quad [9.2.5-4]$$

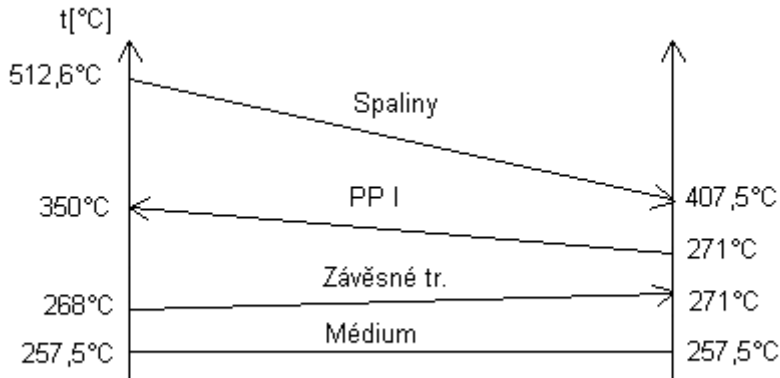
$$\underline{\underline{I_{2out} = 3151,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Odpovídající teplota spalin na výstupu z PP2 určená z I-t diagramu spalin je 512,6°C

Teplota se od zvolené liší pouze o 0,4°C což je přijatelné.

### 9.3 Výpočet 3. části III tahu

III tah 3.část tvoří membránové stěny, závěsné trubky a přehřívák I.



Obr. 11 Průběh teplot spalín a média v 3. části

#### 9.3.1 Přehřívák I

Vstupní teplota spalín

$$t_1 = 512,6^\circ\text{C}$$

Výstupní teplota spalín

$$t_2 = 407,5^\circ\text{C}$$

Střední teplota spalín

$$t_{stř} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{512,6 + 407,4}{2}$$

$$\underline{\underline{t_{stř} = 460^\circ\text{C}}}$$

[9.3.1-1]

entalpie spalín na vstupu

$$I_{SPP1} = 3151,4\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

entalpie spalín na výstupu

$$I_{SPP1} = 2466,1\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

vstupní teplota páry

$$t_{PP1}^{in} = 271^\circ\text{C}$$

výstupní teplota páry

$$t_{PP1}^{out} = 350^\circ\text{C}$$

entalpie páry na vstupu

$$i_{PP1}^{in} = 2850,3\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

entalpie páry na výstupu

$$i_{PP1}^{out} = 3083,9\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

měrný objem vstup

$$v_{in} = 0,0466\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

měrný objem výstup

$$v_{in} = 0,0599\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Střední objem páry

$$v_p = \frac{v_{in} + v_{out}}{2}$$

$$v_p = \frac{0,0599 + 0,0466}{2} \quad [9.3.1-2]$$

$$\underline{\underline{v_p = 0,05325 m^3 \cdot kg^{-1}}}$$

Střední teplota páry v přehříváku I

$$t_{Pstř} = \frac{t_{PP2}^{in} + t_{PP2}^{out}}{2}$$

$$t_{Pstř} = \frac{271 + 350}{2} \quad [9.3.1-2]$$

$$\underline{\underline{t_{Pstř} = 310,5^\circ C}}$$

**9.3.2 Geometrie III tahu**

přední stěna            a=2,61m  
boční stěna            b=2,43m

Závěsné zařízení přehříváku je konstruováno z trubek 38x6,3 , které podpírají přehřívák. Ten je konstruován jako jednohad z trubek 38x4,5.

vnější průměr trubek	$D = 38mm$
vnitřní průměr trubek	$d = 29mm$
uspořádání za sebou, podélná rozteč	$s_2 = 0,09m$
příčná rozteč	$s_1 = 0,09m$
počet trubek v řadě	$z_1 = 28$
počet řad	$z_2 = 27$
počet závěsných trubek	$i = 28$
počet hadů	$n = 1$
výška	$h = 2,43m$

Příčná plocha svazku a závěsných trubek

$$S_{tr} = D \cdot l_e \cdot z_1 + i \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$S_{tr} = 0,038 \cdot 2,4 \cdot 28 + 28 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} \quad [9.3.2-1]$$

$$\underline{\underline{S_{tr} = 2,585 m^2}}$$

Světlný průřez spalín

$$F_S = a \cdot b - S_{tr}$$

$$F_S = 2,61 \cdot 2,43 - 2,585 \quad [9.3.2-2]$$

$$\underline{\underline{F_S = 3,7573m^2}}$$

Rychlost páry v trubkách přehříváku I

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_p - M_v) \cdot v_p}{z_1 \cdot n \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (5 - 0,25) \cdot 0,05325}{28 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,029^2} \quad [9.3.2-3]$$

$$\underline{\underline{w_p = 13,7m \cdot s^{-1}}}$$

Objemový průtok spalín

$$V_S = M_{pv} \cdot [O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min}]$$

$$V_S = 1,88 \cdot [3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49] \quad [9.3.2-4]$$

$$\underline{\underline{V_S = 7,834Nm^3 \cdot s^{-1}}}$$

Rychlost spalín

$$w_s = \frac{V_S}{F_S} \cdot \left( \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} \right)$$

$$w_s = \frac{7,834}{3,7573} \cdot \left( \frac{273,15 + 460}{273,15} \right) \quad [9.3.2-5]$$

$$\underline{\underline{w_s = 5,6m \cdot s^{-1}}}$$

**9.3.3 Výpočet přehříváku I**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Hodnoty pro střední teplotu 310,5°C

Měrná tepelná vodivost

$$\lambda_p = 0,0525W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Dynamická viskozita

$$\eta_p = 20,32\mu Pa \cdot s^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr_p = 1,093$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot \nu_p} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_p^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0525}{0,029} \cdot \left( \frac{13,7 \cdot 0,029}{20,32 \cdot 10^{-6} \cdot 0,05325} \right)^{0,8} \cdot 1,093^{0,4} \quad [9.3.3-1]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = \alpha_2 = 1221,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro uspořádání trubek za sebou na straně spalin

Hodnoty pro střední teplotu 460°C

Součinitel tepelné vodivosti spalin

$$\lambda_s = 6,216 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu_s = 66,92 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,6256$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,06216}{0,038} \cdot \left( \frac{5,6 \cdot 0,038}{66,92 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,6256^{0,33} \quad [9.3.3-2]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = 52,98 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

korekční součinitel na počet řad svazku v podélném směru  $z_2 \geq 10$   $C_z = 1$

korekční součinitel na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D}$$

$$\sigma_1 = \frac{0,09}{0,038} \quad \sigma_2 = \frac{0,09}{0,038} \quad \text{pokud je } \sigma_2 \geq 2 \text{ je } C_s = 1 \quad [9.3.3-3]$$

$$\underline{\underline{\sigma_1 = 2,37}} \quad \underline{\underline{\sigma_2 = 2,37}}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,206 \cdot (460 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{345,4 + 273,15}{460 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{345,4 + 273,15}{460 + 273,15}} \quad [9.3.3-4]$$

$$\underline{\underline{\alpha_{sal} = 13,14 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

tlak spalin

$$p = 0,1 Mpa,$$

celkový parciální tlak

$$p_s = 0,0358 Mpa$$

objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = 0,243$$

objemová koncentrace 3-atomových plynů

$$r_s = 0,358 Mpa$$

koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = 0,00158 kg \cdot kg^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(460 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \quad [9.3.3-5]$$

$$\underline{\underline{k_p = 95,15}}$$

efektivní průměr částic popílku

$$d_{pk} = 20 \mu m$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro svazky hladkých trubek

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,09 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) \quad [9.3.3-6]$$

$$\underline{\underline{s = 0,21 m}}$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$t_z = t_{p_{stř}} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{PPI}}{S} \cdot 10^3$$

$$t_z = 310,5 + \left( 0,006 + \frac{1}{1221,3} \right) \cdot \frac{1109,6}{216,6} \cdot 10^3 \quad [9.3.3-7]$$

$$\underline{\underline{t_z = 345,4^\circ C}}$$

součinitel zanesení pro PPI

$$\varepsilon = 0,006 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$$

Výrobní teplosměnná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot n$$

$$S = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,4 \cdot 28 \cdot 27 \cdot 1 \quad [9.3.3-8]$$

$$\underline{\underline{S = 216,6 m^2}}$$

Součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,243}{3,16 \cdot \sqrt{0,0358 \cdot 0,21}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{460 + 273,15}{1000} \right) \quad [9.3.3-9]$$

$$\underline{\underline{k_s = 30,34 MPa^{-1} \cdot m^{-1}}}$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (30,34 \cdot 0,358 + 95,15 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 0,21 \quad [9.3.3-10]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,231}}$$

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,231} \quad [9.3.3-11]$$

$$\underline{\underline{a = 0,206}}$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_1 = 0,9 \cdot 52,98 + 13,14 \quad [9.3.3-12]$$

$$\underline{\underline{\alpha_1 = 60,83W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

součinitel omývání plochy pro přehřívák volím  $\omega = 0,9$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$$

$$k = \frac{0,6 \cdot 60,83}{1 + \frac{60,83}{1221,3}} \quad [9.3.3-13]$$

$$\underline{\underline{k = 34,77}}$$

součinitel tepelné efektivity, pro dřevité palivo  $\psi = 0,6$

Střední logaritmický spád

zapojení PPI je protiproud

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{162,6 - 136,5}{\ln \frac{162,6}{136,5}}$$

$$\underline{\underline{\Delta t_{stř} = 149,17^\circ C}}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{PP1}^{out}$$

$$\Delta t_1 = 512,6 - 350 = \underline{\underline{162,6^\circ C}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{PP1}^{in}$$

$$\Delta t_2 = 407,5 - 271 = \underline{\underline{136,5^\circ C}}$$

[9.3.3-14]

Velikost výhřevné plochy PPI

$$S_{PP1} = \frac{Q_{PP1}}{k \cdot \Delta t_{stř}} \cdot 10^3$$

$$S_{PP1} = \frac{1109,6}{34,77 \cdot 149,17} \cdot 10^3 \quad [9.3.3-15]$$

$$\underline{\underline{S_{PP1} = 213,96m^2}}$$

Velikosti výhřevných ploch se od sebe liší pouze o (216,6 a 213,96m) 1,22 %

### 9.3.4 Výpočet membránové stěny

Hodnoty pro střední teplotu 460°C

Součinitel tepelné vodivosti spalin

$$\lambda_s = 6,216 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu_s = 66,92 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,6256$$

Obvod spalinovodu

$$O = 2 \cdot (a + b) + i \cdot \pi \cdot D + 2 \cdot z_1 \cdot (l_e + D)$$

$$O = 2 \cdot (2,61 + 2,43) + 28 \cdot \pi \cdot 0,038 + 2 \cdot 28 \cdot (2,4 + 0,038) \quad [9.3.4-1]$$

$$\underline{\underline{O = 149,95 \text{ m}}}$$

Ekvivalentní průměr spalin

$$d_e = \frac{4 \cdot F_s}{O}$$

$$d_e = \frac{4 \cdot 3,7573}{149,95} \quad [9.3.4-2]$$

$$\underline{\underline{d_e = 0,1 \text{ m}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4}$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,06216}{0,1} \cdot \left( \frac{5,6 \cdot 0,1}{66,92 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,6256^{0,4} \quad [9.3.4-3]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = 16,29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,178 \cdot (460 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{427,1 + 273,15}{460 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{427,1 + 273,15}{460 + 273,15}} \quad [9.3.4-4]$$

$$\underline{\underline{\alpha_{sal} = 13,45W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

tlak spalin

$$p = 0,1Mpa ,$$

celkový parciální tlak

$$p_s = 0,0358Mpa$$

objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = 0,243$$

objemová koncentrace 3-atomových plynů

$$r_s = 0,358Mpa$$

koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = 0,00158kg \cdot kg^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(460 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \quad [9.3.4-5]$$

$$\underline{\underline{k_p = 95,15}}$$

efektivní průměr částic popílku

$$d_{pk} = 20\mu m$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{a} + \frac{1}{h} + \frac{1}{s_1}}$$

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{2,61} + \frac{1}{2,43} + \frac{1}{0,09}} \quad [9.3.4-6]$$

$$\underline{\underline{s = 0,151m}}$$

Součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,243}{3,16 \cdot \sqrt{0,0358 \cdot 0,151}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{460 + 273,15}{1000} \right) \quad [9.3.4-7]$$

$$\underline{\underline{k_s = 35,92 MPa^{-1} \cdot m^{-1}}}$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (35,92 \cdot 0,358 + 95,15 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 0,151 \quad [9.3.4-8]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,196}}$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,196} \quad [9.3.4-9]$$

$$\underline{\underline{a = 0,178}}$$

Teplota povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{syt} + \varepsilon \cdot q$$

$$t_z = 260 + 0,003 \cdot 55701 \quad [9.3.4-10]$$

$$\underline{\underline{t_z = 427,1^\circ C}}$$

součinitel zanesení volím  $\varepsilon = 0,003 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$

Tepelné zatížení III. tahu 3. části

$$q = \frac{Q_1}{F_{ús}} \cdot 10^3$$

$$q = \frac{1288,36}{23,13} \cdot 10^3 \quad [9.3.4-11]$$

$$\underline{\underline{q = 55701 W \cdot m^{-2}}}$$

Předběžné teplo odevzdané spaliny výparníku

$$Q_1 = \Delta I_{sp} \cdot M_{pv}$$

$$Q_1 = 685,3 \cdot 1,88$$

[9.3.4-12]

$$\underline{\underline{Q_1 = 1288,36 \text{ kW}}}$$

$$\Delta I_{sp} = I_1 - I_2$$

$$\Delta I_{sp} = 3151,4 - 2466,1$$

$$\underline{\underline{\Delta I_{sp} = 685,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Účinná sálavá plocha stěn kanálu

$$F_{ús} = 2 \cdot h \cdot (a + b) \cdot x_{st}$$

$$F_{ús} = 2 \cdot 2,43 \cdot (2,61 + 2,4) \cdot 0,95$$

[9.3.4-13]

$$\underline{\underline{F_{ús} = 23,13 \text{ m}^2}}$$

úhlový součinitel po konzultaci volen

$$x_{st} = 0,95$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_s = 0,9 \cdot 16,29 + 13,45$$

[9.3.4-14]

$$\underline{\underline{\alpha_s = 28,11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel omývání plochy pro membránovou stěnu volím

$$\omega = 0,9$$

Součinitel prostupu tepla

pro výparníkové plochy

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s}$$

$$k = \frac{28,11}{1 + 0,003 \cdot 28,11}$$

[9.3.4-15]

$$\underline{\underline{k = 25,92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel zanesení pro membránové stěny

$$\varepsilon = 0,003 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Střední logaritmický spád

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad \begin{array}{l} \Delta t_1 = t_1 - t_{syt} \\ \Delta t_1 = 512,6 - 260 = \underline{\underline{252,6^\circ C}} \\ \Delta t_2 = t_2 - t_{syt} \\ \Delta t_2 = 407,5 - 260 = \underline{\underline{147,5^\circ C}} \end{array} \quad [9.3.4-16]$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{252,6 - 147,5}{\ln \frac{252,6}{147,5}}$$

$$\underline{\underline{\Delta t_{stř} = 195,36^\circ C}}$$

Teplu odebrané membránovou stěnou spalínám

$$Q_{mem} = k \cdot S \cdot \Delta t_{stř} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_{mem} = 25,92 \cdot 23,13 \cdot 195,36 \cdot 10^{-3} \quad [9.3.4-17]$$

$$\underline{\underline{Q_{mem} = 117,12 kW}}$$

**9.3.5 Výpočet závěsných trubek**

vstupní teplota páry	$t_{zv}^{in} = 268^\circ C$
výstupní teplota páry	$t_{zv}^{out} = 271^\circ C$
tlak na vstupu	$p_{zv}^{in} = 4,51^\circ C$
tlak na výstupu	$p_{zv}^{out} = 4,5^\circ C$
entalpie páry na vstupu	$i_{zv}^{in} = 2840,9 kJ \cdot kg^{-1}$
entalpie páry na výstupu	$i_{zv}^{out} = 2850,3 kJ \cdot kg^{-1}$
měrný objem vstup	$v_{in} = 0,046 m^3 \cdot kg^{-1}$
měrný objem výstup	$v_{out} = 0,0466 m^3 \cdot kg^{-1}$

Střední objem páry

$$v_p = \frac{v_{in} + v_{out}}{2}$$

$$v_p = \frac{0,046 + 0,0466}{2} \quad [9.3.5-1]$$

$$\underline{\underline{v_p = 0,0463 m^3 \cdot kg^{-1}}}$$

Střední teplota páry v závěsných trubkách

$$t_{Pstř} = \frac{t_{zv}^{in} + t_{zv}^{out}}{2}$$

$$t_{Pstř} = \frac{268 + 271}{2} \quad [9.3.5-2]$$

$$\underline{\underline{t_{Pstř} = 269,5^{\circ}C}}$$

Rychlost páry v závěsných trubkách

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_p - M_v) \cdot v_p}{i \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (5 - 0,25) \cdot 0,0463}{28 \cdot \pi \cdot 0,0254^2} \quad [9.3.5-3]$$

$$\underline{\underline{w_p = 15,5m \cdot s^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Hodnoty pro střední teplotu 269,5 °C

Měrná tepelná vodivost

$\lambda_p = 0,0525W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Dynamická viskozita

$\eta_p = 18,38\mu Pa \cdot s^{-1}$

Prandtlovo číslo

$Pr_p = 1,267$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0525}{0,0254} \cdot \left( \frac{15,5 \cdot 0,0254}{18,38 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0463} \right)^{0,8} \cdot 1,267^{0,4} \quad [9.3.5-4]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = \alpha_2 = 1779,7W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Hodnota konvekce ze strany spalin se u výpočtu závěsných trubek uvažuje stejná jako u svazku, který je na nich zavěšen, tedy:

$$\underline{\underline{\alpha_k = 52,98W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,206 \cdot (460 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{305,6 + 273,15}{460 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{305,6 + 273,15}{460 + 273,15}} \quad [9.3.5-5]$$

$$\underline{\underline{\alpha_{sal} = 12,1W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

stupeň černosti povrchu stěn

$$a_{st} = 0,8$$

tlak spalín

$$p = 0,1Mpa ,$$

celkový parciální tlak

$$p_s = 0,0358Mpa$$

objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = 0,243$$

objemová koncentrace 3-atomových plynů

$$r_s = 0,358Mpa$$

koncentrace popílku ve spalínách

$$\mu_{pk} = 0,00158kg \cdot kg^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{stř} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p = \frac{5,7 \cdot 10^4}{\sqrt[3]{(460 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \quad [9.3.5-6]$$

$$\underline{\underline{k_p = 95,15}}$$

efektivní průměr částic popílku

$$d_{pk} = 20\mu m$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy závěsných trubek je stejná jako u svazku, který je na nich zavěšen.

$$\underline{\underline{s = 0,21m}}$$

Součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,243}{3,16 \cdot \sqrt{0,0358 \cdot 0,21}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{460 + 273,15}{1000} \right) \quad [9.3.5-7]$$

$$\underline{\underline{k_s = 30,34MPa^{-1} \cdot m^{-1}}}$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (30,34 \cdot 0,358 + 95,15 \cdot 0,00158) \cdot 0,1 \cdot 0,21 \quad [9.3.5-8]$$

$$\underline{\underline{k \cdot p \cdot s = 0,231}}$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,231} \quad [9.3.5-9]$$

$$\underline{\underline{a = 0,206}}$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalin

$$t_z = t_{pstr} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_1}{S} \cdot 10^3$$

$$t_z = 269,5 + \left( 0,006 + \frac{1}{1779,7} \right) \cdot \frac{44,65}{8,12} \cdot 10^3 \quad [9.3.5-10]$$

$$\underline{\underline{t_z = 305,6^\circ C}}$$

součinitel zanesení pro závěsné trubky

$$\varepsilon = 0,006 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$$

Výrobní teplosměnná plocha závěsných trubek

$$S = \pi \cdot D \cdot h \cdot i$$

$$S = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,43 \cdot 28 \quad [9.3.5-11]$$

$$\underline{\underline{S = 8,12 m^2}}$$

Předběžné teplo odebrané závěsnými trubkami

$$Q_1 = (M_p - M_v) \cdot (i_2 - i_1)$$

$$Q_1 = (5 - 0,25) \cdot (2850,3 - 2840,9) \quad [9.3.5-12]$$

$$\underline{\underline{Q_1 = 44,65 kW}}$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_1 = 0,9 \cdot 52,98 + 12,1 \quad [9.3.5-13]$$

$$\underline{\underline{\alpha_1 = 59,78 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**

součinitel omývání plochy pro závěsné trubky volím

$\omega = 0,9$

Součinitel prostupu tepla

$k = \psi \cdot \alpha_1$

$k = 0,6 \cdot 59,78$

[9.3.5-14]

$\underline{k = 35,87}$

součinitel tepelné efektivity, pro dřevité palivo

$\psi = 0,6$

Střední logaritmický spád

zapojení závěsných trubek je souproud

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{244,6 - 136,5}{\ln \frac{244,6}{136,5}}$$

$\underline{\Delta t_{stř} = 185,3^\circ C}$

$\Delta t_1 = t_1 - t_{zv}^{out}$

$\Delta t_1 = 512,6 - 268 = \underline{244,6^\circ C}$

$\Delta t_2 = t_2 - t_{zv}^{in}$

$\Delta t_2 = 407,5 - 271 = \underline{136,5^\circ C}$

[9.3.5-15]

Teplu odebrané (skutečné) závěsnými trubkami

$Q_{zv} = k \cdot S \cdot \Delta t_{stř} \cdot 10^{-3}$

$Q_{zv} = 35,87 \cdot 8,12 \cdot 185,3 \cdot 10^{-3}$

$\underline{Q_{zv} = 53,98 kW}$

[9.3.5-16]

Přepočítání výstupní entalpie páry závěsných trubek

$$i_{zv}^{out} = \frac{Q_{zv} + (M_p - M_v) \cdot i_1}{(M_p - M_v)}$$

$$i_{zv}^{out} = \frac{53,98 + (5 - 0,25) \cdot 2840,9}{(5 - 0,25)}$$

[9.3.5-17]

$\underline{i_{zv}^{out} = 2852,26 kJ \cdot kg^{-1}}$

Této entalpii a tlaku odpovídá teplota 271,5°C což se od zvolené teploty 271°C liší minimálně což je přijatelné.

### 9.3.6 Přepočet teploty spalin na výstupu z 3. části III tahu

#### Celkové teplo

$$\begin{aligned}
 Q_C &= Q_{zv} + Q_{mem} + Q_{PP3} \\
 Q_C &= 53,98 + 117,12 + 1109,6 & [9.3.6-1] \\
 \underline{\underline{Q_C}} &= \underline{\underline{1280,7 \text{ kW}}}
 \end{aligned}$$

#### Teplo spalin na vstupu

$$\begin{aligned}
 Q_{1in} &= I_1 \cdot M_{pv} \\
 Q_{1in} &= 3151,4 \cdot 1,88 & [9.3.6-2] \\
 \underline{\underline{Q_{1in}}} &= \underline{\underline{5924,6 \text{ kW}}}
 \end{aligned}$$

#### Teplo spalin na výstupu

$$\begin{aligned}
 Q_{2out} &= Q_{1in} - Q_C \\
 Q_{2out} &= 5924,6 - 1280,7 & [9.3.6-3] \\
 \underline{\underline{Q_{2out}}} &= \underline{\underline{4643,9 \text{ kW}}}
 \end{aligned}$$

#### Entalpie výstupních spalin

$$\begin{aligned}
 I_{2out} &= \frac{Q_{2out}}{M_{pv}} \\
 I_{2out} &= \frac{4643,9}{1,88} & [9.3.6-4] \\
 \underline{\underline{I_{2out}}} &= \underline{\underline{2470,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}
 \end{aligned}$$

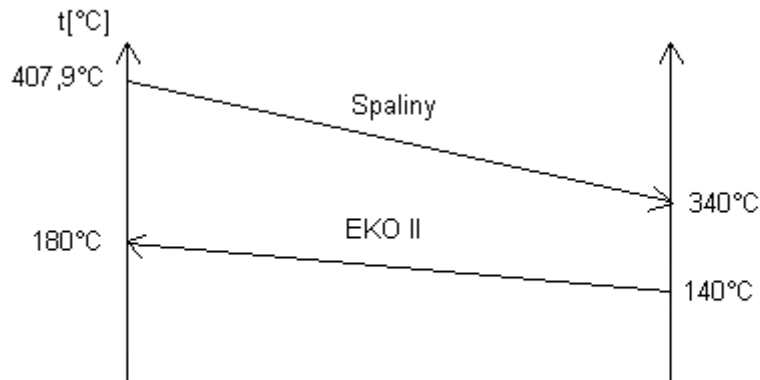
Odpovídající teplota spalin na výstupu z PP1 určená z I-t diagramu spalin je 407,9°C  
Teplota se od zvolené liší pouze o 0,4°C což je přijatelné.

## 10 VÝPOČET IV. a V. tahu

Ve IV. a V. tahu spalinovodu jsou řazeny ekonomizéry a ohříváky vzduchu. Kvůli vysokému teplotě přiváděného vzduchu do kotle 240°C bude ohřívák vzduchu rozdělen na několik částí. Vzhledem k tomu, že IV. tah kotle se skládá pouze plechové šachty v níž jsou na nechlazených závěsech zavěšeny svazky odpadá výpočet membránových stěn a závěsů.

### 10.1 Výpočet EKA II

Přes ekonomizér proudí spaliny pod 500 °C. Pro tuto teplotu spalin při výpočtu mohou zanedbat součinitel přestupu tepla sáláním.



Obr. 12 Průběh teplot spalín a média EKA II

Vstupní teplota spalín  $t_1 = 407,9^\circ\text{C}$   
 Výstupní teplota spalín  $t_2 = 340^\circ\text{C}$

Střední teplota spalín

$$t_{stř} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{407,9 + 340}{2}$$

$$\underline{\underline{t_{stř} = 373,95^\circ\text{C}}}$$

entalpie spalín na vstupu  $I_{EKA1} = 2470,18\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$   
 entalpie spalín na výstupu  $I_{EKA2} = 2041\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

**10.1.1 Geometrie IV. tahu**

přední stěna  $a=2,61\text{m}$   
 boční stěna  $b=2,43\text{m}$

Parametry vody:

vstupní teplota  $t_1 = 140^\circ\text{C}$   
 výstupní teplota  $t_2 = 180^\circ\text{C}$   
 tlak na vstupu  $p_{v1} = 4,65\text{MPa}$   
 tlak na výstupu  $p_{v2} = 4,55\text{MPa}$   
 objem vody na vstupu  $v_{in} = 0,00107\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**

objem vody na výstupu

$$v_{out} = 0,00112m^3 \cdot kg^{-1}$$

Střední objem vody

$$v_p = \frac{v_{in} + v_{out}}{2}$$

$$v_p = \frac{0,00107 + 0,00112}{2}$$

[10.1.1-1]

$$\underline{\underline{v_p = 0,001095m^3 \cdot kg^{-1}}}$$

Rozměry svazku EKA:

Volím uspořádání trubek za sebou kvůli abrazi popílkem v protiproudém zapojení. Ekonomizér je sestaven z trubek 31,8x5 mm. Na první dvě řady od ofukovače se navaří plechové krytky (pancéřování), které brání oděru trubky ofukovanou parou.

vnější průměr trubek	$D = 31,8mm$
vnitřní průměr trubek	$d = 21,8mm$
uspořádání za sebou, podélná rozteč	$s_2 = 0,08m$
příčná rozteč	$s_1 = 0,09m$
počet trubek v řadě	$z_1 = 28$
počet řad	$z_2 = 22$
výška	$h = 1,76m$

Světlný průřez spalin

$$F_S = a \cdot b - D \cdot l_e \cdot z_1$$

$$F_S = 2,61 \cdot 2,43 - 0,0318 \cdot 2,4 \cdot 28$$

[10.1.1-2]

$$\underline{\underline{F_S = 4,205m^2}}$$

Rychlost vody v trubkách EKA

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_p - M_v) \cdot v_p}{z_1 \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (5 - 0,25) \cdot 0,00195}{28 \cdot \pi \cdot 0,0218^2}$$

[10.1.1-3]

$$\underline{\underline{w_p = 0,5m \cdot s^{-1}}}$$

Objemový průtok spalin

$$V_S = M_{pv} \cdot [O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min}]$$

$$V_S = 1,88 \cdot [3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49] \quad [10.1.1-4]$$

$$\underline{\underline{V_S = 7,834 Nm^3 \cdot s^{-1}}}$$

Rychlost spalin

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \left( \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} \right)$$

$$w_S = \frac{7,834}{4,205} \cdot \left( \frac{273,15 + 373,95}{273,15} \right) \quad [10.1.1-5]$$

$$\underline{\underline{w_S = 4,41 m \cdot s^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro uspořádání trubek za sebou na straně spalin

Hodnoty pro střední teplotu 373,95 °C

Součinitel tepelné vodivosti spalin  $\lambda_s = 5,48 \cdot 10^{-2} W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ Kinematická viskozita spalin  $\nu_s = 54,19 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ Prandtlovo číslo  $Pr = 0,6427$ 

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0548}{0,0318} \cdot \left( \frac{4,41 \cdot 0,0318}{54,19 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,6427^{0,33} \quad [10.1.1-6]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = 49,25 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

korekční součinitel na počet řad svazku v podélném směru  $z_2 \geq 10$   $C_z = 1$ korekční součinitel na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D}$$

$$\sigma_1 = \frac{0,09}{0,0318} \quad \sigma_2 = \frac{0,08}{0,0318} \quad \text{pokud je } \sigma_2 \geq 2 \text{ je } C_s = 1 \quad [10.1.1-7]$$

$$\underline{\underline{\sigma_1 = 2,83}} \quad \underline{\underline{\sigma_2 = 2,515}}$$

Výrobní teplosměnná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2$$

$$S = \pi \cdot 0,0318 \cdot 2,4 \cdot 28 \cdot 22 \quad [10.1.1-8]$$

$$\underline{\underline{S = 147,7m^2}}$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_1 = 0,9 \cdot 49,25 + 0 \quad [10.1.1-9]$$

$$\underline{\underline{\alpha_1 = 44,33W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

součinitel omývání plochy pro přehřívák volím  $\omega = 0,9$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1$$

$$k = 0,6 \cdot 44,33 \quad [10.1.1-10]$$

$$\underline{\underline{k = 26,6W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

součinitel tepelné efektivity, pro dřevité palivo  $\psi = 0,6$

Střední logaritmický spád

zapojení ekonomizéru je protiproud

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{227,9 - 200}{\ln \frac{227,9}{200}}$$

$$\underline{\underline{\Delta t_{stř} = 213,65^\circ C}}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{eko}^{out}$$

$$\Delta t_1 = 407,9 - 180 = \underline{\underline{227,9^\circ C}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{nv}$$

$$\Delta t_2 = 340 - 140 = \underline{\underline{200^\circ C}}$$

[10.1.1-11]

Tepelný výkon EKA II

$$Q_{EKO} = (M_p + M_o - M_v) \cdot (i_2 - i_1)$$

$$Q_{EKO} = (5 + 0,05 - 0,25) \cdot (763 - 591) \quad [10.1.1-12]$$

$$\underline{\underline{Q_{EKO} = 825,6kW}}$$

Velikost výhřevné plochy EKA II

$$S_{EKA} = \frac{Q_{EK0II}}{k \cdot \Delta t_{stř}} \cdot 10^3$$

$$S_{EKA} = \frac{825,6}{26,6 \cdot 213,65} \cdot 10^3 \quad [10.1.1-13]$$

$$\underline{\underline{S_{EKA} = 145,27m^2}}$$

Velikosti výhřevných ploch se od sebe liší pouze o (147,7m a 145,27m) 1,64 % což je přijatelné.

**10.1.2 Přepočítání teploty spalin na výstupu EKA II ve IV. tahu**Teplo spalin na vstupu

$$Q_{1in} = I_1 \cdot M_{pv}$$

$$Q_{1in} = 2470,18 \cdot 1,88 \quad [10.1.2-1]$$

$$\underline{\underline{Q_{1in} = 4643,9kW}}$$

Teplo spalin na výstupu

$$Q_{2out} = Q_{1in} - Q_{EK0II}$$

$$Q_{2out} = 4643,9 - 825,6 \quad [10.1.2-2]$$

$$\underline{\underline{Q_{2out} = 3818,3kW}}$$

Entalpie výstupních spalin

$$I_{2out} = \frac{Q_{2out}}{M_{pv}}$$

$$I_{2out} = \frac{3818,3}{1,88} \quad [10.1.2-3]$$

$$\underline{\underline{I_{2out} = 2031,5kJ \cdot kg^{-1}}}$$

Odpovídající teplota spalin na výstupu z EKA 2 určená z I-t diagramu spalin je 338,5°C  
Teplota se od zvolené liší pouze o 1,5°C což je přijatelné.

**10.2 Výpočet ideálního okruhu vzduchu**Celkový potřebný objem vzduchu

$$\begin{aligned}
 V_V &= M_{pv} \cdot \alpha \cdot O_{VV \min} \\
 V_V &= 1,88 \cdot 1,3 \cdot 2,49 \\
 V_V &= 6,085 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{10.2-1}$$

Množství recirkulovaného vzduchu

$$\begin{aligned}
 V_2 = V_{rec} &= \frac{V_1 \cdot t_3 \cdot c_3 - V_1 \cdot t_1 \cdot c_1}{t_2 \cdot c_2 - t_3 \cdot c_3} \\
 V_2 = V_{rec} &= \frac{5,4765 \cdot 50 \cdot 1,322 - 5,4675 \cdot 25 \cdot 1,32}{240 \cdot 1,3376 - 50 \cdot 1,322} \\
 V_2 = V_{rec} &= 0,7122 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{10.2-2}$$

Potřebný objem vzduchu po 1° a 2° s recirkulací

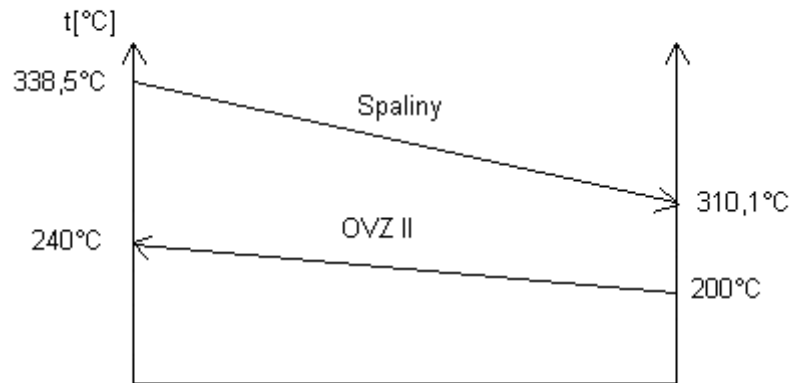
$$\begin{aligned}
 V_{12rec} &= 0,9 \cdot V_V + V_{rec} \\
 V_{12rec} &= 0,9 \cdot 6,085 + 0,7122 \\
 V_{12rec} &= 6,19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{10.2-3}$$

Potřebný objem vzduchu pro 2° s recirkulací

$$\begin{aligned}
 V_{2rec} &= 0,45 \cdot V_V + V_{rec} \\
 V_{2rec} &= 0,45 \cdot 6,085 + 0,7122 \\
 V_{2rec} &= 3,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{10.2-4}$$

### 10.3 Výpočet ohříváku vzduchu II (sekundární vzduch)

Vstupní teplota spalin	$t_1 = 338,5^\circ\text{C}$
Výstupní teplota spalin	$t_2 = 310,1^\circ\text{C}$
entalpie spalin na vstupu	$I_{ovz1} = 2031,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
entalpie spalin na výstupu	$I_{ovz2} = 1854,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**

Obr. 13 Průběh teplot spalín a média OVZ II

Střední teplota spalín

$$t_{stř} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{338,5 + 310,1}{2}$$

$$\underline{\underline{t_{stř} = 324,3^{\circ}C}}$$

**10.3.1 Geometrie IV. tahu**

přední stěna            a=2,61m  
boční stěna             b=2,43m

Parametry vzduchu:

vstupní teplota	$t_{vz1} = 200^{\circ}C$
výstupní teplota	$t_{vz2} = 240^{\circ}C$
entalpie vzduchu na vstupu do OVZII	$I_{vin} = 664kJ \cdot kg^{-1}$
entalpie vzduchu na výstupu z OVZII	$I_{vout} = 800,4kJ \cdot kg^{-1}$

Střední teplota vzduchu

$$t_{stř} = \frac{t_{vz1} + t_{vz2}}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{200 + 240}{2}$$

$$\underline{\underline{t_{stř} = 220^{\circ}C}}$$
[10.3.1-1]

Rozměry svazku OVZII

Volím uspořádání trubek za sebou kvůli abrazi popílkem. Ohřívák vzduchu je sestaven z trubek 44,5x3,2 mm jen první dvě a poslední dvě řady mají rozměry 44,5x4 mm. Toto řešení je zvoleno kvůli parním ofukovačům. Ohřívák vzduchu je řešen jako svazek horizontálních hladkých trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení. Vzduch prochází trubkami a spaliny je obtékají.

vnější průměr trubek	$D = 44,5mm$
vnitřní průměr trubek	$d = 38,1mm$
uspořádání za sebou, podélná rozteč	$s_2 = 0,08m$
příčná rozteč	$s_1 = 0,09m$
počet trubek v řadě	$z_1 = 28$
počet řad	$z_2 = 17$
výška	$h = 1,36m$

Tepelný výkon OVZ

$$Q_{OVZ} = M_{pv} \cdot (\beta_{OVZ}^1 \cdot I_{vout} - \beta_{OVZ}^2 \cdot I_{vin})$$

$$Q_{OVZ} = 1,88 \cdot (1,3 \cdot 800,4 - 1,3 \cdot 664) \quad [10.3.1-2]$$

$$\underline{Q_{OVZ} = 333,36kW}$$

$$\beta_{OVZ}^1 = \beta_{OVZ}^2 = 1,3$$

Ztráta OVZ II sáláním a vedením tepla do okolí

$$Q_z = Z_{OVZ} \cdot M_{pv} \cdot Q_{ired}$$

$$Q_z = 0,0002 \cdot 1,91 \cdot 8656,4 \quad [10.3.1-3]$$

$$\underline{Q_z = 3,25kW}$$

poměrná ztráta do okolí prostoru OVZ  $Z_{OVZ} = 0,0002$

Entalpie spalin na výstupu z OVZ

$$I_{OVZ2} = I_{OVZ1} - \frac{Q_{OVZ} + Q_z}{M_{pv}}$$

$$I_{OVZ2} = 2031,5 - \frac{333,36 + 3,25}{1,88} \quad [10.3.1-4]$$

$$\underline{I_{OVZ2} = 1852,45kJ \cdot kg^{-1}}$$

Entalpii spalin odpovídá teplota 310,1°C

Světlí průřez spalín

$$F_S = a \cdot b - D \cdot l_e \cdot z_1$$

$$F_S = 2,61 \cdot 2,43 - 0,0445 \cdot 2,4 \cdot 28 \quad [10.3.1-5]$$

$$\underline{\underline{F_S = 3,352m^2}}$$

Rychlost spalín

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \left( \frac{273,15 + t_{stř}^{SP}}{273,15} \right)$$

$$w_S = \frac{7,834}{3,352} \cdot \left( \frac{273,15 + 324,3}{273,15} \right) \quad [10.3.1-6]$$

$$\underline{\underline{w_S = 5,12m \cdot s^{-1}}}$$

Objemový průtok spalín

$$V_S = M_{pv} \cdot [O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min}]$$

$$V_S = 1,88 \cdot [3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49] \quad [10.3.1-7]$$

$$\underline{\underline{V_S = 7,834Nm^3 \cdot s^{-1}}}$$

Rychlost vzduchu v trubkách OVZ

$$w_V = \frac{V_{2rec}}{F_V} \cdot \left( \frac{273,15 + t_{stř}^V}{273,15} \right)$$

$$w_V = \frac{3,45}{0,542} \cdot \left( \frac{273,15 + 220}{273,15} \right) \quad [10.3.1-8]$$

$$\underline{\underline{w_V = 11,47m \cdot s^{-1}}}$$

Světlí průřez vzduchu

$$F_V = z_1 \cdot z_2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$F_V = 28 \cdot 17 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0381^2}{4} \quad [10.3.1-9]$$

$$\underline{\underline{F_V = 0,542m^2}}$$

**10.3.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí pro uspořádání trubek za sebou na straně spalín**

Hodnoty pro střední teplotu 324,3°C

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**


---

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s = 5,05 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{ m}^{-1} \cdot \text{ K}^{-1}$
Kinematická viskozita spalin	$\nu_s = 47,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{ s}^{-1}$
Prandtlovo číslo	$\text{Pr} = 0,6476$

$$\alpha_k^{SP} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33}$$

$$\alpha_k^{SP} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,999 \cdot \frac{0,0505}{0,0445} \cdot \left( \frac{5,12 \cdot 0,0445}{47,24 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,6476^{0,33} \quad [10.3.2-1]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k^{SP} = 48,69 \text{ W} \cdot \text{ m}^{-2} \cdot \text{ K}^{-1}}}$$

korekční součinitel na počet řad svazku v podélném směru  $z_2 \geq 10 \quad C_z = 1$

korekční součinitel na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D}$$

$$\sigma_1 = \frac{0,09}{0,0445} \quad \sigma_2 = \frac{0,08}{0,0445} \quad [10.3.2-2]$$

$$\underline{\underline{\sigma_1 = 2,02}} \quad \underline{\underline{\sigma_2 = 1,8}}$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2}$$

$$C_s = \frac{1}{\left[ 1 + (2 \cdot 2,02 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,8}{2} \right)^3 \right]^2}$$

$$\underline{\underline{C_s = 0,999}}$$

### 10.3.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí pro uspořádání trubek za sebou na straně vzduchu

Hodnoty pro střední teplotu 220°C

Součinitel tepelné vodivosti vzduchu	$\lambda_s = 4,016 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{ m}^{-1} \cdot \text{ K}^{-1}$
Kinematická viskozita vzduchu	$\nu_s = 37,48 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{ s}^{-1}$
Prandtlovo číslo	$\text{Pr} = 0,69$

---

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**

$$\alpha_k^V = 0,023 \cdot \frac{\lambda_V}{d} \cdot \left( \frac{w_V \cdot d_e}{\nu_V} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m$$

$$\alpha_k^V = 0,023 \cdot \frac{0,04016}{0,0381} \cdot \left( \frac{11,47 \cdot 0,0381}{37,48 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,69^{0,4} \cdot 0,899 \cdot 1 \cdot 1 \quad [10.3.3-1]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k^V = 44,51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Opravný koeficient  $C_t$  závisí na teplotě proudu a stěny

$$C_t = \left( \frac{T}{T_{st}} \right)^{0,5}$$

$$C_t = \left( \frac{220}{272,15} \right)^{0,5} \quad [10.3.3-2]$$

$$\underline{\underline{C_t = 0,899}}$$

Teplota stěny

$$T_{st} = \frac{t_{stř}^V + t_{stř}^S}{2}$$

$$T_{st} = \frac{220 + 324,3}{2} \quad [10.3.3-3]$$

$$\underline{\underline{T_{st} = 272,15^\circ\text{C}}}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_K^V \cdot \alpha_K^{SP}}{\alpha_K^V + \alpha_K^{SP}}$$

$$k = 0,85 \cdot \frac{44,51 \cdot 48,69}{44,51 + 48,69} \quad [10.3.3-4]$$

$$\underline{\underline{k = 19,77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel využití plochy

$$\xi = 0,85$$

Střední logaritmický spád

zapojení OVZ je protiproud

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{98,5 - 110,1}{\ln \frac{98,5}{110,1}}$$

$$\Delta t_{stř} = 104,19^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{vz2}$$

$$\Delta t_1 = 338,5 - 240 = \underline{\underline{98,5^\circ\text{C}}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{vz1}$$

$$\Delta t_2 = 310,1 - 200 = \underline{\underline{110,1^\circ\text{C}}}$$
[10.3.3-5]

Velikost výhřevné plochy OVZII

$$S_{PP1} = \frac{Q_{OVZ}}{k \cdot \Delta t_{stř}} \cdot 10^3$$

$$S_{PP1} = \frac{333,36}{19,77 \cdot 104,19} \cdot 10^3$$

$$S_{PP1} = \underline{\underline{161,9\text{m}^2}}$$
[10.3.3-6]

Výrobní teplosměnná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2$$

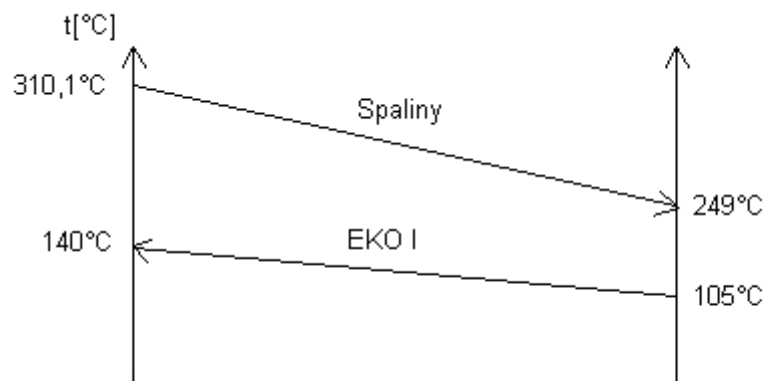
$$S = \pi \cdot 0,0445 \cdot 2,4 \cdot 28 \cdot 17$$

$$S = \underline{\underline{159,7\text{m}^2}}$$
[10.3.3-7]

Velikosti výhřevných ploch se od sebe liší pouze o (161,9 a 159,7m) 1,23%. Odchylka je přijatelná.

## 10.4 Výpočet EKA I

Vstupní teplota spalin  $t_1 = 310,1^\circ\text{C}$   
 Výstupní teplota spalin  $t_2 = 249^\circ\text{C}$



Obr. 14 Průběh teplot spalin a média EKA I

Střední teplota spalin

$$t_{stř} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{310,1 + 249}{2}$$

$$\underline{\underline{t_{stř} = 279,5^\circ C}}$$

entalpie spalin na vstupu

$$I_{EKA1} = 1854,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

entalpie spalin na výstupu

$$I_{EKA2} = 1475,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**10.4.1 Geometrie IV. tahu**

přední stěna            a=2,61m

boční stěna            b=2,43m

Parametry vody:

vstupní teplota

$$t_1 = 105^\circ C$$

výstupní teplota

$$t_2 = 140^\circ C$$

tlak na vstupu

$$p_{v1} = 4,75 \text{ MPa}$$

tlak na výstupu

$$p_{v2} = 4,65 \text{ MPa}$$

objem vody na vstupu

$$v_{in} = 0,00107 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

objem vody na výstupu

$$v_{out} = 0,00104 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Střední objem vody

$$v_p = \frac{v_{in} + v_{out}}{2}$$

$$v_p = \frac{0,00104 + 0,00107}{2}$$

[10.4.1-1]

$$\underline{\underline{v_p = 0,001055 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Rozměry svazku EKA:

Volím uspořádání trubek za sebou kvůli abrazi popílkem v protiproudém zapojení.

Ekonomizér je sestaven z trubek 31,8x5 mm. Na první dvě řady od ofukovače se navaří plechové krytky (pancéřování), které brání oděru trubky ofukovanou parou.

vnější průměr trubek

$$D = 31,8 \text{ mm}$$

vnitřní průměr trubek

$$d = 21,8 \text{ mm}$$

**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**


---

uspořádání za sebou, podélná rozteč	$s_2 = 0,08m$
příčná rozteč	$s_1 = 0,09m$
počet trubek v řadě	$z_1 = 28$
počet řad	$z_2 = 27$
výška	$h = 2,16m$

Světlný průřez spalin

$$F_S = a \cdot b - D \cdot l_e \cdot z_1$$

$$F_S = 2,61 \cdot 2,43 - 0,0318 \cdot 2,4 \cdot 28 \quad [10.4.1-2]$$

$$\underline{\underline{F_S = 4,205m^2}}$$

Rychlost vody v trubkách EKA

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_p - M_v) \cdot v_p}{z_1 \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (5 - 0,25) \cdot 0,001055}{28 \cdot \pi \cdot 0,0218^2} \quad [10.4.1-3]$$

$$\underline{\underline{w_p = 0,479m \cdot s^{-1}}}$$

Objemový průtok spalin

$$V_S = M_{pv} \cdot [O_{SV\min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\min}]$$

$$V_S = 1,88 \cdot [3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49] \quad [10.4.1-4]$$

$$\underline{\underline{V_S = 7,834Nm^3 \cdot s^{-1}}}$$

Rychlost spalin

$$w_s = \frac{V_S}{F_S} \cdot \left( \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} \right)$$

$$w_s = \frac{7,834}{4,205} \cdot \left( \frac{273,15 + 279,5}{273,15} \right) \quad [10.4.1-5]$$

$$\underline{\underline{w_s = 3,8m \cdot s^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro uspořádání trubek za sebou na straně spalin

Hodnoty pro střední teplotu 279,5 °C

Součinitel tepelné vodivosti spalin	$\lambda_s = 4,67 \cdot 10^{-2} W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Kinematická viskozita spalin	$\nu_s = 41,44 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$
Prandtlovo číslo	$Pr = 0,654$

---

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0467}{0,0318} \cdot \left( \frac{3,8 \cdot 0,0318}{41,44 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,654^{0,33} \quad [10.4.1-6]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k = 45,62 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

korekční součinitel na počet řad svazku v podélném směru  $z_2 \geq 10$   $C_z = 1$

korekční součinitel na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D}$$

$$\sigma_1 = \frac{0,09}{0,0318} \quad \sigma_2 = \frac{0,08}{0,0318} \quad \text{pokud je } \sigma_2 \geq 2 \text{ je } C_s = 1 \quad [10.4.1-7]$$

$$\underline{\underline{\sigma_1 = 2,83}} \quad \underline{\underline{\sigma_2 = 2,515}}$$

Výrobní teplosměnná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2$$

$$S = \pi \cdot 0,0318 \cdot 2,4 \cdot 28 \cdot 27 \quad [10.4.1-8]$$

$$\underline{\underline{S = 181,3 \text{ m}^2}}$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sal}$$

$$\alpha_1 = 0,9 \cdot 45,62 + 0 \quad [10.4.1-9]$$

$$\underline{\underline{\alpha_1 = 41,06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel omývání plochy pro přehřívák volím  $\omega = 0,9$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_1$$

$$k = 0,6 \cdot 41,06 \quad [10.4.1-10]$$

$$\underline{\underline{k = 24,64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

součinitel tepelné efektivity, pro dřevité palivo  $\psi = 0,6$

Střední logaritmický spád

zapojení ekonomizéru je protiproud

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{170,1 - 144}{\ln \frac{170,1}{144}}$$

$$\Delta t_{stř} = 156,7^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{eko}^{out}$$

$$\Delta t_1 = 310,1 - 140 = \underline{\underline{170,1^\circ\text{C}}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{nv}$$

$$\Delta t_2 = 249 - 105 = \underline{\underline{144^\circ\text{C}}}$$
[10.4.1-11]

Tepelný výkon EKA I

$$Q_{EKO} = (M_p + M_o - M_v) \cdot (i_2 - i_1)$$

$$Q_{EKO} = (5 + 0,05 - 0,25) \cdot (591 - 443,7)$$

$$\underline{\underline{Q_{EKO} = 707\text{ kW}}}$$
[10.4.1-12]

Velikost výhřevné plochy EKA

$$S_{EKA} = \frac{Q_{EKO1}}{k \cdot \Delta t_{stř}} \cdot 10^3$$

$$S_{EKA} = \frac{707}{24,64 \cdot 156,7} \cdot 10^3$$

$$\underline{\underline{S_{EKA} = 183,1\text{ m}^2}}$$
[10.4.1-13]

Velikosti výhřevných ploch se od sebe liší pouze o (183,1m a 181,3m) 0,98 % což je přijatelné.

**10.4.2 Přepočítání teploty spalin na výstupu EKA ve IV. tahu**Teplo spalin na vstupu

$$Q_{lin} = I_1 \cdot M_{pv}$$

$$Q_{lin} = 1854,4 \cdot 1,88$$

$$\underline{\underline{Q_{lin} = 3486,3\text{ kW}}}$$
[10.4.2-1]

Teplo spalin na výstupu

$$Q_{2out} = Q_{1in} - Q_{EKO1}$$

$$Q_{2out} = 3486,3 - 707 \quad [10.4.2-2]$$

$$\underline{\underline{Q_{2out} = 2779,3kW}}$$

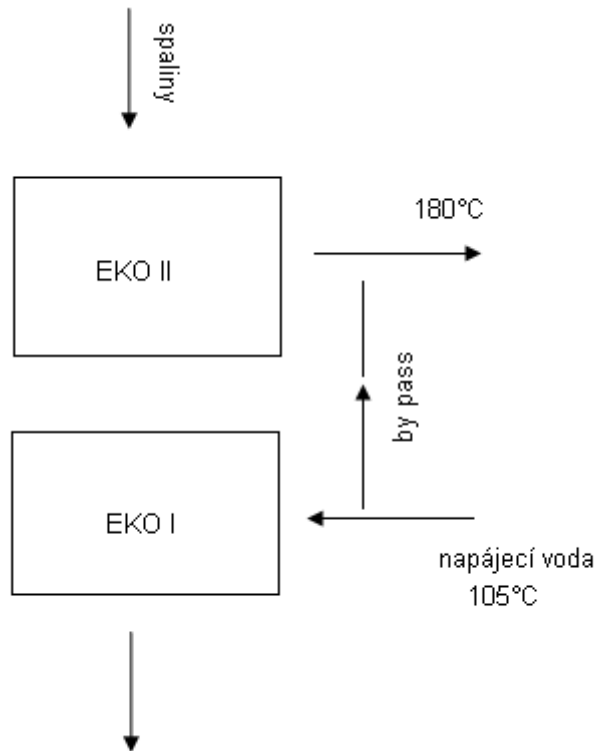
Entalpie výstupních spalin

$$I_{2out} = \frac{Q_{2out}}{M_{pv}}$$

$$I_{2out} = \frac{2778,3}{1,88} \quad [10.4.2-3]$$

$$\underline{\underline{I_{2out} = 1478,3kJ \cdot kg^{-1}}}$$

Odpovídající teplota spalin na výstupu z EKA 1 určená z I-t diagramu spalin je 249,5°C  
Teplota se od zvolené liší pouze o 0,5°C což je přijatelné.



Obr. 15 Schéma zapojení ekonomizéru

### 10.5 Výpočet ohříváku vzduchu I (primární vzduch)

Vstupní teplota spalin  $t_1 = 249,5^\circ\text{C}$

Výstupní teplota spalin  $t_2 = 140^\circ\text{C}$

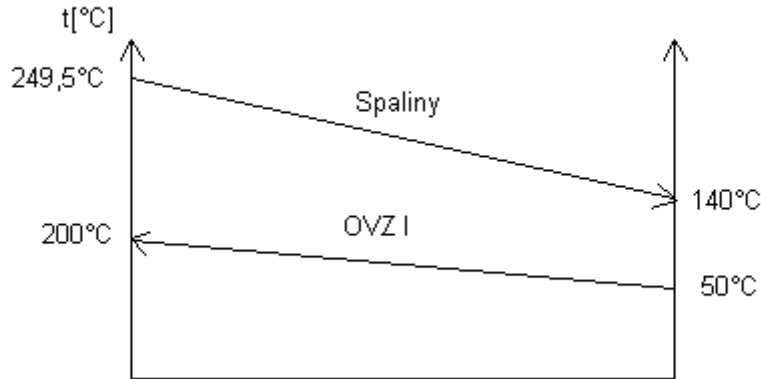
**Kotel na zpracování smrkové kůry – 18t/h**

entalpie spalin na vstupu

$$I_{OVZ1} = 1478,3kJ \cdot kg^{-1}$$

entalpie spalin na výstupu

$$I_{OVZ2} = 819,4kJ \cdot kg^{-1}$$



Obr. 16 Průběh teplot spalin a média OVZ I

Střední teplota spalin

$$t_{stř} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{249,5 + 140}{2}$$

$$\underline{\underline{t_{stř} = 194,75^{\circ}C}}$$

**10.5.1 Geometrie V. tahu**

přední stěna            a=2,61m

boční stěna            b=2,43m

Parametry vzduchu:

vstupní teplota

$$t_{vz1} = 50^{\circ}C$$

výstupní teplota

$$t_{vz2} = 200^{\circ}C$$

entalpie vzduchu na vstupu do OVZ

$$I_{vin} = 164,2kJ \cdot kg^{-1}$$

entalpie vzduchu na výstupu z OVZ

$$I_{vout} = 664kJ \cdot kg^{-1}$$

Střední teplota vzduchu

$$t_{stř} = \frac{t_{vz1} + t_{vz2}}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{200 + 50}{2} \quad [10.5.1-1]$$

$$\underline{\underline{t_{stř} = 125^{\circ}C}}$$

Rozměry svazku OVZ I

Volím uspořádání trubek za sebou kvůli abrazi popílkem. Ohřívák vzduchu je sestaven z trubek 44,5x3,2 mm jen první dvě a poslední dvě řady mají rozměry 44,5x4 mm. Toto řešení je zvoleno kvůli parním ofukovačům. Ohřívák vzduchu je řešen jako svazek horizontálních hladkých trubek uspořádaných za sebou v protiproudém zapojení. Vzduch prochází trubkami a spaliny je obtékají.

vnější průměr trubek	$D = 44,5mm$
vnitřní průměr trubek	$d = 38,1mm$
uspořádání za sebou, podélná rozteč	$s_2 = 0,08m$
příčná rozteč	$s_1 = 0,09m$
počet trubek v řadě	$z_1 = 28$
počet řad	$z_2 = 25$
výška	$h = 2m$

Tepelný výkon OVZ

$$Q_{OVZ} = M_{pv} \cdot (\beta_{OVZ}^1 \cdot I_{Vout} - \beta_{OVZ}^2 \cdot I_{Vin})$$

$$Q_{OVZ} = 1,88 \cdot (1,3 \cdot 664 - 1,3 \cdot 164,2) \quad [10.5.1-2]$$

$$\underline{\underline{Q_{OVZ} = 1221,5kW}}$$

$$\beta_{OVZ}^1 = \beta_{OVZ}^2 = 1,3$$

Ztráta OVZ sáláním a vedením tepla do okolí

$$Q_z = Z_{OVZ} \cdot M_{pv} \cdot Q_{ired}$$

$$Q_z = 0,0002 \cdot 1,91 \cdot 8656,4 \quad [10.5.1-3]$$

$$\underline{\underline{Q_z = 3,25kW}}$$

poměrná ztráta do okolí prostoru OVZ  $Z_{OVZ} = 0,0002$

Entalpie spalín na výstupu z OVZ1

$$I_{OVZ2} = I_{OVZ1} - \frac{Q_{OVZ} + Q_z}{M_{pv}}$$

$$I_{OVZ2} = 1478,3 - \frac{1221,5 + 3,25}{1,88} \quad [10.5.1-4]$$

$$\underline{\underline{I_{OVZ2} = 826,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Entalpii spalín odpovídá teplota 141,2°C

Světelný průřez spalín

$$F_S = a \cdot b - D \cdot l_e \cdot z_1$$

$$F_S = 2,61 \cdot 2,43 - 0,0445 \cdot 2,4 \cdot 28 \quad [10.5.1-5]$$

$$\underline{\underline{F_S = 3,352 \text{ m}^2}}$$

Rychlost spalín

$$w_S = \frac{V_S}{F_S} \cdot \left( \frac{273,15 + t_{stř}^{SP}}{273,15} \right)$$

$$w_S = \frac{7,834}{3,352} \cdot \left( \frac{273,15 + 194,75}{273,15} \right) \quad [10.5.1-6]$$

$$\underline{\underline{w_S = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Objemový průtok spalín

$$V_S = M_{pv} \cdot [O_{SV \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV \min}]$$

$$V_S = 1,88 \cdot [3,42 + (1,3 - 1) \cdot 2,49] \quad [10.5.1-7]$$

$$\underline{\underline{V_S = 7,834 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Rychlost vzduchu v trubkách OVZI

$$w_V = \frac{V_{12rec}}{F_V} \cdot \left( \frac{273,15 + t_{stř}^V}{273,15} \right)$$

$$w_V = \frac{6,19}{0,8} \cdot \left( \frac{273,15 + 125}{273,15} \right) \quad [10.5.1-8]$$

$$\underline{\underline{w_V = 11,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Světlí průřez vzduchu

$$F_V = z_1 \cdot z_2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$F_V = 28 \cdot 25 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0381^2}{4} \quad [10.5.1-9]$$

$$\underline{\underline{F_V = 0,8m^2}}$$

**10.5.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin**Součinitel přestupu tepla konvekcí pro uspořádání trubek za sebou

Hodnoty pro střední teplotu 194,75°C

Součinitel tepelné vodivosti spalin

$$\lambda_s = 3,96 \cdot 10^{-2} W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Kinematická viskozita spalin

$$\nu_s = 30,95 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 0,672$$

$$\alpha_k^{SP} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33}$$

$$\alpha_k^{SP} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,999 \cdot \frac{0,0396}{0,0445} \cdot \left( \frac{4 \cdot 0,0445}{30,95 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,672^{0,33} \quad [10.5.2-1]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k^{SP} = 43,33 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}}$$

korekční součinitel na počet řad svazku v podélném směru  $z_2 \geq 10$   $C_z = 1$ korekční součinitel na uspořádání svazku

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{D}$$

$$\sigma_1 = \frac{0,09}{0,0445} \quad \sigma_2 = \frac{0,08}{0,0445} \quad [10.5.2-3]$$

$$\underline{\underline{\sigma_1 = 2,02}} \quad \underline{\underline{\sigma_2 = 1,8}}$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2}$$

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,02 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,8}{2}\right)^3\right]^2}$$

$$\underline{\underline{C_s = 0,999}}$$

### 10.5.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí pro uspořádání trubek za sebou

Hodnoty pro střední teplotu 125°C

Součinitel tepelné vodivosti vzduchu

$$\lambda_s = 3,37 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Kinematická viskozita vzduchu

$$\nu_s = 26,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prandtlovo číslo

$$\text{Pr} = 0,69$$

$$\alpha_k^v = 0,023 \cdot \frac{\lambda_v}{d} \cdot \left(\frac{w_v \cdot d_e}{\nu_v}\right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m$$

$$\alpha_k^v = 0,023 \cdot \frac{0,0337}{0,0381} \cdot \left(\frac{11,3 \cdot 0,0381}{26,1 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,8} \cdot 0,69^{0,4} \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot 1 \quad [10.5.3-1]$$

$$\underline{\underline{\alpha_k^v = 36,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Opravný koeficient  $C_t$  závisí na teplotě proudu a stěny

$$C_t = \left(\frac{T}{T_{st}}\right)^{0,5}$$

$$C_t = \left(\frac{125}{159,9}\right)^{0,5} \quad [10.5.3-2]$$

$$\underline{\underline{C_t = 0,884}}$$

#### Teplota stěny

$$T_{st} = \frac{t_{stř}^v + t_{stř}^s}{2}$$

$$T_{st} = \frac{125 + 194,75}{2} \quad [10.5.3-3]$$

$$\underline{\underline{T_{st} = 159,9^\circ\text{C}}}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_K^V \cdot \alpha_K^{SP}}{\alpha_K^V + \alpha_K^{SP}}$$

$$k = 0,85 \cdot \frac{36,67 \cdot 43,33}{36,67 + 43,33} \quad [10.5.3-4]$$

$$k = 16,88 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

součinitel využití plochy

$$\xi = 0,85$$

Střední logaritmický spád

zapojení OVZ je protiproud

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{49,5 - 90}{\ln \frac{49,5}{90}}$$

$$\Delta t_{stř} = 67,74^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{vz2}$$

$$\Delta t_1 = 249,5 - 200 = \underline{\underline{49,5^\circ\text{C}}}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{vz1}$$

$$\Delta t_2 = 140 - 50 = \underline{\underline{90^\circ\text{C}}}$$
[10.5.3-5]

Velikost výhřevné plochy OVZI

$$S_{PP1} = \frac{Q_{OVZ}}{k \cdot \Delta t_{stř}} \cdot 10^3$$

$$S_{PP1} = \frac{1221,5}{16,88 \cdot 67,74} \cdot 10^3 \quad [10.5.3-6]$$

$$\underline{\underline{S_{PP1} = 1068,25 \text{ m}^2}}$$

Výrobní teplosměnná plocha 1 svazku

$$S = \pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1 \cdot z_2$$

$$S = \pi \cdot 0,0445 \cdot 2,4 \cdot 28 \cdot 25 \quad [10.5.3-7]$$

$$\underline{\underline{S = 234,86 \text{ m}^2}}$$

Počet pater OVZI

$$i = \frac{S_{PP1}}{S}$$

$$i = \frac{1068,25}{234,86} \Rightarrow \text{volím 4 patra} \quad [10.5.3-8]$$

$$\underline{\underline{i = 4,55}}$$

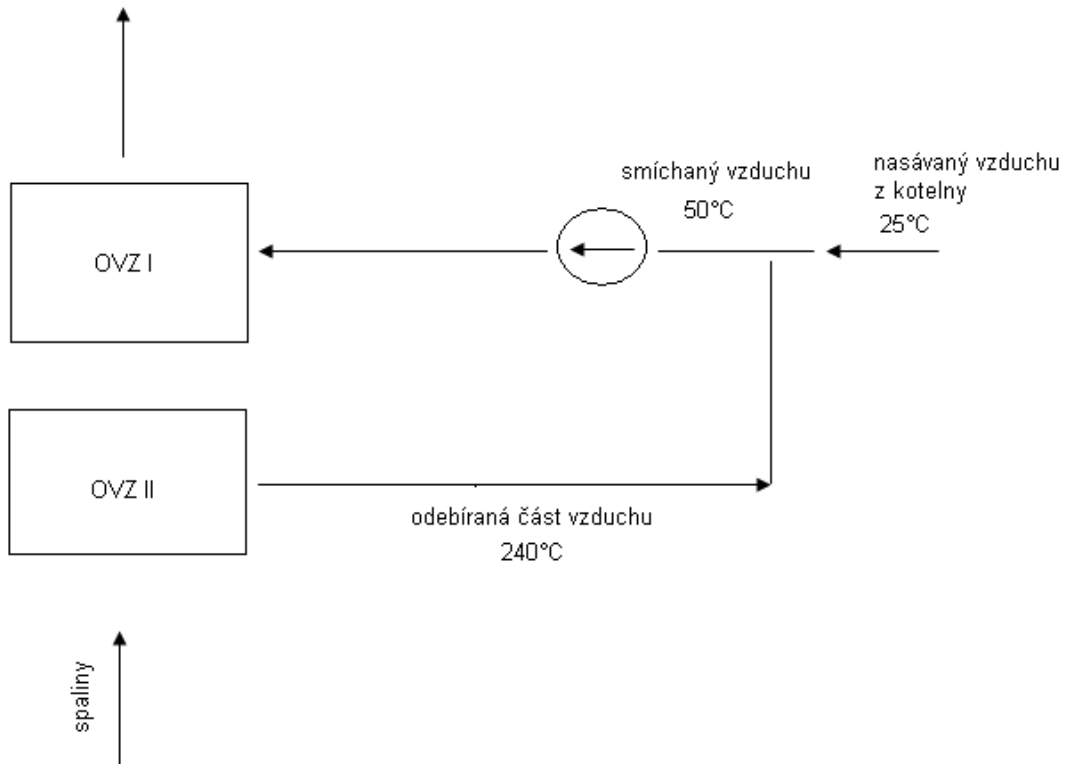
Poslední teplosměnná plocha OVZ1

$$z_2 = \frac{S_{PP1} - 4 \cdot S}{\pi \cdot D \cdot l_e \cdot z_1}$$

$$z_2 = \frac{1068,28 - 4 \cdot 234,86}{\pi \cdot 0,0445 \cdot 2,4 \cdot 28} \Rightarrow \text{zaokrouhlo na 14 řad} \quad [10.5.3-9]$$

$$\underline{\underline{z_2 = 13,71}}$$

OVZI bude rozdělen na 5 svazků z toho 4 po 25 řadách a jeden po 14 řadách. Při dodržení maximální výšky jednoho svazku 2m kvůli parním ofukovačům.



Obr. 17 Schéma zapojení ohříváků vzduchu

## 11 KONTROLY

### 11.1 Kontrola výkonu výparníku

Bilanční výkon výparníku

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{výp}} &= (M_p - M_v) \cdot (i_p - i_{wEKO}) + M_o \cdot (i_b - i_{wEKO}) \\
 Q_{\text{výp}} &= (5 - 0,25) \cdot (2797,5 - 763) + 0,05 \cdot (1125,6 - 763) \\
 Q_{\text{výp}} &= 9682 \text{ kW}
 \end{aligned}
 \tag{11.1-1}$$

Součtový výkon výparníku

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{vyp}} &= Q_o + Q_{\text{mříř}} + Q_{II} + Q_{\text{výš}} + Q_{\text{memIII}} + Q_{\text{memII}} + Q_{\text{memI}} \\
 Q_{\text{vyp}} &= 9667,4 + 459,64 + 1510,28 + 459,4 + 249,78 + 167,54 + 117,12 \\
 Q_{\text{vyp}} &= 9631,16 \text{ kW}
 \end{aligned}
 \tag{11.1-2}$$

Odchylka

$$\begin{aligned}
 \Delta Q_{\text{vyp}} &= \left( \frac{Q_{\text{výp}} - Q_{\text{vyp}}}{Q_{\text{výp}}} \right) \cdot 100 \\
 \Delta Q_{\text{vyp}} &= \left( \frac{9682 - 9621,16}{9682} \right) \cdot 100 \\
 \Delta Q_{\text{vyp}} &= 0,525\%
 \end{aligned}
 \tag{11.1-3}$$

### 11.2 Kontrola výkonu kotle

Bilanční výkon kotle

$$\begin{aligned}
 Q_v &= M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_o \cdot (i_b - i_{nv}) \\
 Q_v &= 5 \cdot (3397,76 - 443,7) + 0,05 \cdot (1125,6 - 443,7) \\
 Q_v &= 14804,4 \text{ kW}
 \end{aligned}
 \tag{11.2-1}$$

Součtový výkon kotle

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{vyr}} &= Q_{\text{vyp}} + Q_{PP3} + Q_{PP2} + Q_{PP1} + Q_{EKO2} + Q_{EKO1} + \sum Q_{\text{par}} \\
 Q_{\text{vyr}} &= 9631,16 + 1074,8 + 1154,7 + 1109,6 + 825,6 + 707 + (116,64 + 75,97 + 53,98) \\
 Q_{\text{vyr}} &= 14748,85 \text{ kW}
 \end{aligned}
 \tag{11.2-2}$$

### Odchylka

$$\Delta Q_{\text{vyr}} = \left( \frac{Q_v - Q_{\text{vyr}}}{Q_v} \right) \cdot 100$$

$$\Delta Q_{\text{vyr}} = \left( \frac{14804,4 - 14748,85}{14804,4} \right) \cdot 100 \quad [11.2-3]$$

$$\underline{\underline{\Delta Q_{\text{vyr}} = 0,375\%}}$$

Při kontrolním výpočtu by se odchylky měli pohybovat maximálně kolem 0,5% což bylo splněno.

## **12 Závěr**

Cílem diplomové práce bylo navrhnout roštový kotel s přirozenou cirkulací páry na spalování smrkové kůry. Na základě tepelných výpočtů a odborných konzultací je kotel navržen tak aby byl schopen dodávat páru v požadovaném množství a teplotě. Při navrhování podobných kotlů na spalování biomasy se setkáváme s proměnlivou vlhkostí paliva, které je do kotle přiváděno. V praxi to znamená, že u kotle bývá předimenzován ohřívák vody, který pak reguluje výstupní teplotu spalin. Dalším poměrně častým problémem je zanášení kotle, které negativně ovlivňuje chod kotle. K minimalizování tohoto problému jsem navrhnul všechny svazky v uspořádání za sebou a z hladkých trubek. Kotel je též opatřen parními ofukovači.

## **13 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

---

a	-	stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin
$a_{pl}$	-	stupeň černosti plamene
$\alpha$	-	přebytek vzduchu
$\alpha_o$	-	stupeň černosti ohniště
$\alpha_1$	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$	součinitel přestupu tepla ze spalin do stěny
$\alpha_2$	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$	součinitel přestupu tepla stěny do media
$\alpha_K$	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$	součinitel přestupu tepla konvekcí
$\alpha_K$	-	přebytek vzduchu za kotlem
$\alpha_N$	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$	monogramový součinitel
$\alpha_S$	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$	součinitel přestupu tepla sáláním
$A^r$	%	procento popelovin v původním stavu paliva
$B_O$	-	Boltzmannovo číslo
c	$kJ \cdot m^{-3} K^{-1}$	měrné teplo vlhkého vzduchu
$c_{H_2O}$	$kJ \cdot m^{-3} K^{-1}$	měrné teplo vodní páry
$c_P$	$kJ \cdot kg^{-1} K^{-1}$	měrné teplo paliva
$c_s$	$kJ \cdot m^{-3} K^{-1}$	měrné teplo suchého vzduchu
$c_{su}$	$kJ \cdot kg^{-1} K^{-1}$	měrné teplo sušiny paliva
$c_w$	$kJ \cdot kg^{-1} K^{-1}$	měrné teplo vody, lze brát
$\chi_1$	-	součinitel závislý na druhu paliva
$\chi_2$	-	je součinitel závislý na způsobu spalování
$C_d$	-	opravný koeficient na vnitřní průměr trubky
$C_i$	%	podíl hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků
$C_s$	%	podíl popela ve škváře
$C_S$		-oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči a na poměrné podélné rozteči.
$C_{\dot{u}}$	%	podíl popela v úletu
$C_Z$	-	oprava na počet podélných řad
$C_t, C_1, C_m$	-	opravní součinitelé
$(CO_2)_{max}$	%	maximální množství $CO_2$ ve spalinách
$\Delta\alpha_o$	-	zvětšení přisávání v ohništi
$\Delta i$	$kJ \cdot kg^{-1}$	rozdíl entalpií média.
$\Delta t_{ln}$	$^{\circ}C$	střední logaritmická teplota
d	$\mu m$	střední efektivní průměr částic popílku
$d_{vnitř}$	m	vnitřní průměr trubky
D	m	průměr trubek
$D_e$	m	ekvivalentní průměr
$\varepsilon$	-	součinitel znečištění výhřevné plochy
f	-	součinitel vlhkosti
f	$m^2$	

---

$F_{st}$	$m^2$	povrch ohniště
$F_{ús}$	$m^2$	účinná sálavá plocha stěn ohniště
$\varphi$	%	je relativní vlhkost vzduchu
$\varphi$	-	součinitel uchování tepla
$\bar{g}$	$kW \cdot m^{-2}$	střední tepelné zatížení stěn ohniště
$G_{O_2 \min}$	$kg \cdot kg^{-1}$	hmotové minimální množství spalovacího kyslíku
$G_{vz \min}$	$kg \cdot kg^{-1}$	hmotové minimální množství vlhkého spalovacího vzduchu
$G_{vz \min}^S$	$kg \cdot kg^{-1}$	hmotové minimální množství suchého spalovacího vzduchu na 1kg spáleného paliva
$i_{nv}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie napájecí vody
$i_p$	$kJ \cdot kg^{-1}$	fyzické teplo paliva
$i_{pp}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie přehřáté páry
$I_O$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie spalin na konci ohniště
$I_p$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie popílku
$I_{sp}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie spalin
$I_{sp \min}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	minimální množství spalin
$I_U$	$kJ \cdot kg^{-1}$	tepla uvolněného při spalování
$I_{vz \min}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie minimálního množství vzduchu
$I'_{vz \min}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie nasávaného studeného vzduchu
$I''_{vz \min}$	$kJ \cdot kg^{-1}$	entalpie minimálního množství horkého vzduchu
$\vartheta_a$	$^{\circ}C$	teoretická teplota
$\vartheta_O$	$^{\circ}C$	koncovou teplotu
$\xi$	-	součiniteli zanesení
$\xi$	-	součinitel využití
$\zeta$	-	součinitel využití plochy
$k$	$m^{-1}MPa^{-1}$	součinitel zeslabení sálání
$k$	$W \cdot m^{-2}K^{-1}$	součinitel prostupu tepla
$k_k$	$m^{-1}MPa^{-1}$	součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi
$k_p$	$m^{-1}MPa^{-1}$	součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi
$k_{SP}$	$m^{-1}MPa^{-1}$	součiniteli zeslabení sálání tříatomových plynů
$\lambda$	$W \cdot m^{-1}K^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu
$M$	-	součinitel respektující průběh teplot v ohništi
$M_{ek}$	$kg \cdot s^{-1}$	průtok vody ekonomisérem
$M_p$	$kg \cdot s^{-1}$	množství paliva přivedeného do kotle
$M_{pp}$	$kJ$	parní výkon kotle
$M_{pv}$	$kg \cdot s^{-1}$	množství paliva skutečně spáleného
$M_v$	$kg \cdot s^{-1}$	množství vstříku

---

$\mu$	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	koncentrace popílku ve spalinách
$n$	ks	počet trubek
$\eta_K$	%	tepelná účinnost kotle
$O_{\text{Ar}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	objem Ar ve spalinách se určí ze vztahu
$O_{\text{CO}_2}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	objem $\text{CO}_2$ ve spalinách se určí ze vztahu
$O_{\text{CO}}^{\text{N}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	obsah CO ve spalinách při nedokonalém spalování
$O_{\text{H}_2\text{O min}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	minimální objem vodní páry
$O_{\text{N}_2}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	objem $\text{N}_2$ ve spalinách se určí ze vztahu
$O_{\text{O}_2 \text{ min}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	minimální množství kyslíku ke spálení 1kg paliva
$O_{\text{SO}_2}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	objem $\text{SO}_2$ ve spalinách se určí ze vztahu
$O_{\text{sp}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	skutečné množství spalin
$O_{\text{sp min}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	minimální množství vlhkých spalin
$O_{\text{sp min}}^{\text{S}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	minimální množství suchých spalin
$O_{\text{sp min}}^{\text{SV}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	minimální množství vlhkých spalin při použití suchého vzduchu
$O_{\text{sp-C}}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	střední celkové měrné teplo spalin
$O_{\text{vz min}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	minimální množství vlhkého vzduchu ke spálení 1kg paliva
$O_{\text{vz min}}^{\text{S}}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg surového paliva o výhřevnosti $Q_i^{\text{r}}$
$p$	MPa	tlak v ohništi
$p''$	MPa	je absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu
$p_C$	MPa	je celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu
$p_{\text{SP}}$	MPa	je parciální tlak tříatomových plynů
$Pr$	-	Pradtlovo číslo při střední teplotě proudu
$\psi$	-	součinitel tepelné efektivity
$\Theta_O$	-	poměrná teplota spalin na výstupu z ohniště
$Q_{\text{cs}}, Q_{\text{ci}}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	průměrná hodnota výhřevnosti
$Q_i^{\text{daf}}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	výhřevnost surového paliva
$Q_i^{\text{r}}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	výhřevnost paliva,
$Q_{\text{P}}^{\text{P}}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	teplo přivedené do kotle
$Q_{\text{S}}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn
$Q_{\text{VZ}}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	teplo přivedené do kotle se vzduchem
$r_{\text{CO}_2}$	-	objemové části tříatomových plynů
$r_{\text{H}_2\text{O}}$	-	objemová část vodní páry ve spalinách
$r_{\text{SP}}$	-	součet objemových částí tříatomových plynů
$R$	$\text{m}^2$	plocha hořící vrstvy paliva na roštu
$\sigma_1$	-	poměrná příčná rozteč

$\sigma_2$	-	poměrná podélná rozteč
$\sigma_2'$	-	poměrná úhlopříčná rozteč
$s$	m	účinná tloušťka sálavé vrstvy
$s$	m	síla stěn trubek
$s_2$	m	podélná rozteč
$s_1$	m	příčná rozteč
$s_2$	m	podélná rozteč
$S$	m <sup>2</sup>	plocha výparných ploch
$t_{p,stř}$	°C	střední teplota páry
$t_{sp,stř}$	°C	střední teplota spalin
$T_a$	K	teplota nechlazeného plamene
$T_O$	K	absolutní teplota spalin na výstupu z ohniště
$T_z$	K	absolutní teplota zaprášeného povrchu stěn
$\nu$	m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>	součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu
$v$	m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup>	měrný objem
$V_{H_2O}$	%	objem vodní páry na 1m <sup>3</sup> suchého vzduchu
$V_O$	m <sup>3</sup>	aktivní objem ohniště
$V_{sp}$	m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup>	průtok spalin
$w$	m · s <sup>-1</sup>	rychlost páry
$w_{sp}$	m · s <sup>-1</sup>	rychlost proudění spalin
$w_t^r$	%	obsah vody v palivu
$x$	-	úhlový součinitel
$x_O$	-	poměrné výšce maximální hodnoty teploty plamene
$x_{st}$	-	uhlový součinitel trubkové stěny
$X_i$	%	podíl popela z celkového množství v palivu
$X_p$	%	procento popela v úletu
$X_s$	%	podíl popela ve škváře
$X_ú$	%	podíl popela v úletu
$z$	-	počet trubek v jedné řadě.
$Z_c$	%	ztráta mechanickým nedopalem
$Z_{co}$	%	ztráta chemickým nedopalem
$Z_{cs}$	%	ztráta ve škváře nebo v strusce
$Z_{cú}$	%	ztráta v úletu
$Z_k$	%	ztráta komínová
$Z_o$	%	ztráty ostatní
$Z_{so}$	%	ztráta sdílením tepla do okolí

## 14 SEZNAM OBRÁZK

	Str.
Obr. 1 I-t diagram, spalin	18
Obr. 2 Schéma spalovací komory	24
Obr. 3 Pilový diagram	38
Obr. 4 Průběh teplot spalin a média	39
Obr. 5 Průběh teplot spalin a média	45
Obr. 6 Schéma II. tahu	45
Obr. 7 Průběh teplot spalin a média	52
Obr. 8 Schéma výsyvky	52
Obr. 9 Průběh teplot spalin a média v 1. části	59
Obr. 10 Průběh teplot spalin a média v 2. části	76
Obr. 11 Průběh teplot spalin a média v 3. části	93
Obr. 12 Průběh teplot spalin a média EKA II	110
Obr. 13 Průběh teplot spalin a média OVZ II	116
Obr. 14 Průběh teplot spalin a média v EKA I	121
Obr. 15 Schéma zapojení ekonomizéru	126
Obr. 16 Průběh teplot spalin a média OVZ I	127
Obr. 17 Schéma zapojení ohříváků vzduchu	133

## **15 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Doc. Ing. Tomáš Dlouhý, Csc.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, ČVUT 2007
- [2] Doc. Ing. Florián Budaj, Csc.: Parní kotle – podklady pro tepelný výpočet, VUT 1992
- [3] STEAMTAB: ChemicalLogic Steam Tab Companion 1.0