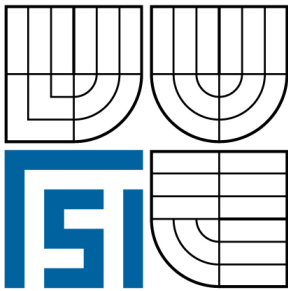


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## PŘEPOČET KOTLE PŘI DÍLČÍM VÝKONU

RECALCULATION BIOLER AT PARTIAL POWER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TOMÁŠ KRÍŽ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MAREK BALÁŠ

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2008/09

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Kříž Tomáš, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

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

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

### **Přepočítání kotle při dílčím výkonu**

v anglickém jazyce:

### **Recalculation boiler at partial power**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kotel byl původně projektován jako tavící na černé uhlí (zrušeno 1988, rekonstrukce na plyn). Stávající parní kotel 160 t/h, 13,64 MPa, 540°C s trubkovým ohřívákem vzduchu. Kotel neplní zákonem daný nový emisní limit NO<sub>x</sub>. Proved'te tepelný přepočítání kotle a navrhnete opatření pro snížení emisí NO<sub>x</sub>. Pro provedení výpočtu obdržíte potřebné konstrukční údaje výhřevných ploch a popis kotle.

Palivo: zemní plyn

Q<sub>ir</sub> = 34340 kJ/Nm<sup>3</sup>

CO<sub>2</sub> 0,32 %

N<sub>2</sub> 0,96

CH<sub>4</sub> 96,7

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 1,43

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 0,43

C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 0,13

C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> 0,03

Teplota napájecí vody

236°C

Cíle diplomové práce:

Navrhnete opatření pro snížení emisí NO<sub>x</sub> a proved'te tepelný přepočítání kotle pro dosažení nových emisních limitů NO<sub>x</sub>.

Seznam odborné literatury:

Budaj, F.: Parní kotle – podklady pro tepelný výpočet, VUT v Brně, 1992

Černý, V.-Janeba, B.-Teyssler, J.: Parní kotle. Technický průvodce 32, SNTL, 1983

Vedoucí diplomové práce: Ing. Marek Baláš

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 20.11.2008

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## ANOTACE

Diplomová práce se zabývá výpočtem parního kotle. Na začátku práce jsou provedeny stechiometrické výpočty. V druhé kapitole je provedena tepelná bilance kotle. V třetí a čtvrté kapitole jsou určeny rozměry ohniště a stanovena teplota spalin na konci ohniště. Pátá kapitola obsahuje bilanční výpočty jednotlivých výhřevných ploch kotle. V další části práce jsou provedeny podrobné výpočty jednotlivých ploch. Na závěr výpočtu kotle je provedena celková bilance. V poslední kapitole jsou navrženy metody pro snížení množství NO<sub>x</sub> obsažených ve spalinách.

## ANNOTATION

The topic of this thesis is the calculation of the steam-boiler. The beginning of the thesis deals with stoichiometric calculations. In the second chapter is performed the heat balance of the boiler. In the fourth and fifth chapter are defined dimensions of the fire and is established the temperature of a combustion gas in the outlet from the fire. The fifth chapter includes the balance calculations of the particular heating surfaces of the steam-boiler. As a conclusion of the calculations of the steam-boiler is performed the total balance. In the last chapter are proposed the methods for a reduction of the quantity of NO<sub>x</sub> contained in the combustion gas.

## KLÍČOVÁ SLOVA

parní kotel  
stechiometrické výpočty  
redukce množství emisí  
ohniště  
hořák

## KEY WORDS

steam-boiler  
stoichiometric calculation  
reduction of the quantity of NO<sub>x</sub>  
furnace  
burner

---

### **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KŘÍŽ, T. *Přepočet kotle při dílčím výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, 2009. 105 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Baláš.

### **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně bez cizí pomoci. Vycházel jsem při tom ze svých znalostí, odborných konzultací a doporučené literatury uvedené v seznamu.

V Tišnově dne 25. května 2007

Podpis

### **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Marku Balášovi a konzultantovi Ing. Petru Zemanovi za jejich cenné rady a podněty, které mi byly poskytnuty při řešení této diplomové práce.

**OBSAH**

ANOTACE.....	- 4 -
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE.....	- 5 -
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ.....	- 6 -
PODĚKOVÁNÍ.....	- 7 -
<b>1. Stručný popis kotle.....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>2. Stechiometrie .....</b>	<b>- 10 -</b>
2.1 Množství jednotlivých složek spalín .....	- 10 -
2.2 Skutečné množství spalín .....	- 11 -
2.3 Skutečné množství vodní páry .....	- 11 -
2.4 Skutečné množství vzduchu .....	- 11 -
2.5 Entalpie spalín .....	- 12 -
<b>3. Tepelná bilance kotle .....</b>	<b>- 15 -</b>
3.1 Ztráty kotle.....	- 15 -
3.2 Tepelná účinnost kotle .....	- 15 -
3.3 Výrobní teplo páry .....	- 15 -
3.4 Skutečné množství spáleného paliva .....	- 16 -
<b>4. Výpočet velikosti stěn spalovací komory .....</b>	<b>- 16 -</b>
<b>5. Tepelný výpočet ohniště.....</b>	<b>- 17 -</b>
5.1 Užitečné teplo uvolněné v ohništi.....	- 18 -
5.2 Teplota spalín na výstupu z ohniště.....	- 20 -
<b>6. Výpočet teplosměnných ploch ze strany pracovního média .....</b>	<b>- 20 -</b>
6.1 Návrh tlakových ztrát na jednotlivých plochách. ....	- 20 -
6.2 Přehřívák III.....	- 20 -
6.3 Přehřívák II .....	- 21 -
6.4 Přehřívák I .....	- 21 -
6.5 Stropní přehřívák .....	- 22 -
6.6 Výparník .....	- 22 -
6.7 Ekonomizér.....	- 23 -
6.8 Ohřívák vzduchu.....	- 23 -
6.9 Celkové potřebné teplo .....	- 23 -
6.10 Stručné shrnutí bilančních výpočtů: .....	- 24 -
<b>7. Výpočet oblasti PII.....</b>	<b>- 26 -</b>
7.1 Teplotní spád v oblasti PII.....	- 26 -
7.2 Deskový přehřívák.....	- 26 -
7.3 Membránová stěna v oblasti deskového přehříváku.....	- 33 -
7.4 Celkové teplo odebrané v oblasti PII.....	- 35 -
<b>8. Mříž mezi přehříváky .....</b>	<b>- 35 -</b>
8.1 Teplotní spád v mříži .....	- 35 -
8.2 Celkové teplo odebrané v této části tahu .....	- 38 -
<b>9. Výpočet oblasti PIII .....</b>	<b>- 39 -</b>
9.1 Teplotní spád v oblasti PIII.....	- 39 -
9.2 Přehřívák III -výstupní.....	- 39 -
9.3 Stropní přehřívák .....	- 45 -
9.4 Výpočet membránové stěny v oblasti PIII (vertikální směr).....	- 48 -
9.5 Výpočet membránové stěny v oblasti PIII (diagonální směr) .....	- 51 -
9.6 Celkové teplo odebrané v této části tahu .....	- 53 -

---

<b>10. Výpočet oblasti mříže.....</b>	<b>- 53 -</b>
10.1 Teplotní spád v oblasti mříže .....	- 53 -
10.2 Mříž mezi přehříváky (třířadá).....	- 53 -
10.3 Stropní přehřívák.....	- 57 -
10.4 Celkové teplo odebrané v této části tahu.....	- 60 -
<b>11. Výpočet oblasti PI.....</b>	<b>- 61 -</b>
11.1 Teplotní spád v oblasti PI.....	- 61 -
11.2 Přehřívák I.....	- 61 -
11.3 Stropní přehřívák.....	- 66 -
11.4 Celkové teplo odebrané v této části tahu.....	- 70 -
12.1 Teplotní spád v obratové komoře.....	- 70 -
12.2 Celkové teplo odebrané v této části tahu.....	- 74 -
<b>13. Kontrola výparníkového systému .....</b>	<b>- 75 -</b>
14.2 Teplotní spád v ekonomizéru .....	- 76 -
14.3 Celkové teplo odebrané v této části tahu.....	- 79 -
14.4 Ekonomizér (část 2) .....	- 80 -
14.5 Teplotní spád v ekonomizéru .....	- 80 -
14.6 Celkové teplo odebrané v této části tahu.....	- 83 -
<b>15. Trubkový ohřívák vzduchu .....</b>	<b>- 84 -</b>
15.1 Trubkový ohřívák vzduchu (část 1) .....	- 84 -
15.2 Teplotní spád v ohříváku vzduchu .....	- 84 -
15.3 Celkové teplo odebrané v této části tahu.....	- 89 -
15.4 Trubkový ohřívák vzduchu (část 2) .....	- 89 -
15.5 Teplotní spád v ohříváku vzduchu .....	- 89 -
15.6 Celkové teplo odebrané v této části tahu.....	- 94 -
<b>16. Kontrola tepelné bilance kotle .....</b>	<b>- 95 -</b>
<b>17. Technické opatření pro snížení emisí NOx ve spalinách .....</b>	<b>- 96 -</b>
<b>19. Seznam použitých zdrojů.....</b>	<b>- 102 -</b>
<b>20. Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>- 103 -</b>
<b>21. Seznam příloh .....</b>	<b>- 105 -</b>

---

## 1. Stručný popis kotle

Kotel je uspořádán jako dvoutahový, zavěšený se spodním přívodem paliva. Palivo je zemní plyn s výhřevností  $34340 \text{ kJ/Nm}^3$ . Hořáky jsou umístěny po dvou v přední a zadní stěně spalovací komory. Prostor ohniště je tvořen membránovými stěnami z hladkých trubek. První výhřevnou plochou deskový přehřívák. V přechodové části je umístěn výstupní a vstupní přehřívák páry. Teplota páry je regulována pomocí dvou vstřiku napájecí vody do parního potrubí. Výparný systém je tvořený membránovými stěnami okolo spalovací komory, okolo deskového a výstupního přehříváku, a třířadé výstupní mříže. Ohřívák vody je tvořen hladkými trubkami s vystřídáním uspořádáním. Ohřívák vody je umístěn v druhém tahu a vzhledem k velikosti byl rozdělen na více částí. Díky tomuto řešení je možno lépe provádět opravy. Poslední výhřevnou plochou kotle je trubkový ohřívák vzduchu.

## 2. Stechiometrie

Minimální množství kyslíku

$$O_{2\min} = 0.5 \cdot \frac{CO + H_2}{H_2} + 1.5 \cdot \frac{H_2S}{100} + \sum \left( x + \frac{y}{4} \right) \cdot \frac{C_x H_y}{100} - \frac{O_2}{100} = 0 + 0 + \left( 1 + \frac{4}{4} \right) \cdot \frac{96.7}{100} + \left( 2 + \frac{6}{4} \right) \cdot \frac{1.43}{100} + \left( 3 + \frac{8}{4} \right) \cdot \frac{0.43}{100} + \left( 4 + \frac{10}{4} \right) \cdot \frac{0.13}{100} + \left( 5 + \frac{12}{4} \right) \cdot \frac{0.03}{100} - 0 = 2.03785 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (2.0)$$

Minimální množství suchého vzduchu

$$O_{\text{vzd min}}^s = \frac{100}{21} \cdot O_{O_2\min} = \frac{100}{21} \cdot 2,03785 = 9,704 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (2.1)$$

Minimální množství vlhkého vzduchu

Při teplotě vzduchu  $30^\circ\text{C}$  a obsahu vody  $d_v = 10 \text{ g}$  na  $1 \text{ kg}$  suchého vzduchu je brán přepočítávací faktor na vlhký vzduch  $f_v = 1,0161$ .

$$O_{\text{vzd min}} = f_v \cdot O_{\text{vzd min}}^s = 1,0161 \cdot 9,704 = 9,86 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (2.2)$$

### 2.1 Množství jednotlivých složek spalin

Objem  $CO_2$

$$O_{CO_2}^s = 0,01 \cdot (CO + CO_2 + \sum x \cdot C_x H_y + 0,03 \cdot O_{\text{vzd min}}^{spl}) = 0,01 \cdot (0 + 0,32 + 96,7 + 2 \cdot 1,43 + 3 \cdot 0,43 + 4 \cdot 0,13 + 5 \cdot 0,03 + 0,03 \cdot 9,6) = 1,018 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (2.3)$$

Objem  $N_2$

$$O_{N_2}^s = 0,01 \cdot (N + 78,05 \cdot O_{\text{vzd min}}^s) = 0,01 \cdot (0,96 + 78,05 \cdot 9,704) = 7,584 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (2.4)$$

## Přepoččet kotle při dílčím výkonu

Objem Ar

$$O_{Ar}^s = 0,0092 \cdot O_{vzd\ min}^s = 0,0092 \cdot 9,704 = 0,089m^3 / m^3 \quad (2.5)$$

Objem vodní páry ve spalínách

$$O_{H_2O\ min}^s = 0,01 \cdot \left( \sum \frac{y}{2} \cdot C_x H_y + H_2 + H_2S \right) + (f - 1) \cdot O_{vzd\ min}^s =$$

$$0,01 \cdot \left( \frac{4}{2} \cdot 96,7 + \frac{6}{2} \cdot 1,43 + \frac{8}{2} \cdot 0,43 + \frac{10}{2} \cdot 0,13 + \frac{12}{2} \cdot 0,03 \right) + (1,0161 - 1) \cdot 9,704 = 2,158m^3 / m^3 \quad (2.6)$$

Minimální množství suchých spalín

$$O_{sp\ min}^s = O_{CO_2}^s + O_{N_2}^s + O_{Ar}^s = 1,018 + 7,58 + 0,089 = 8,69m^3 / m^3 \quad (2.7)$$

Minimální množství spalín

$$O_{sp\ min} = O_{sp\ min}^s + O_{H_2O\ min}^s = 8,69 + 2,158 = 10,85m^3 / m^3 \quad (2.8)$$

**2.2 Skutečné množství spalín**

$$O_{sp} = O_{sp\ min} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzd\ min} = 10,85 + (1,12 - 1) \cdot 9,86 = 12,03m^3 / m^3 \quad (2.9)$$

Pro topné plyny s výhřevností od  $12500\ kJ / m^3$  a výše se volí součinitel přebytku vzduchu v rozmezí 1,05 až 1,15, podle [1].

Voleno  $\alpha = 1,12$ **2.3 Skutečné množství vodní páry**

$$O_{H_2O} = O_{H_2O\ min}^s + (\alpha - 1) \cdot O_{vzd\ min}^s \cdot (f - 1) = 2,158 + (1,0161 - 1) \cdot (1,12 - 1) \cdot 9,704 = 2,177m^3 / m^3 \quad (2.10)$$

**2.4 Skutečné množství vzduchu**

$$O_{vzd} = \alpha \cdot O_{vzd\ min} = 1,12 \cdot 9,86 = 11,04m^3 / m^3 \quad (2.11)$$

Objem části tříatomových plynů

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,03} = 0,084 \quad (2.12)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O\ min}^s}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18 \quad (2.13)$$

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,084 + 0,18 = 0,264 \quad (2.14)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264 \quad (2.15)$$

U kotlů bez přetlaku v ohništi je  $p = 0,1$  podle [1].

**2.5 Entalpie spalin**

$$I_{sp} = I_{sp\min} + (\alpha - 1)I_{vzd\min} \quad [kJ / kg] \quad (2.16)$$

$$I_{sp\min} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad [kJ / kg] \quad (2.17)$$

$$I_{vzd\min} = c + O_{vzd\min} + t_{vzd} \quad [kJ / kg] \quad (2.18)$$

Vzorce 1.16 - 1.18 jsou použity pro výpočet tabulky 1.

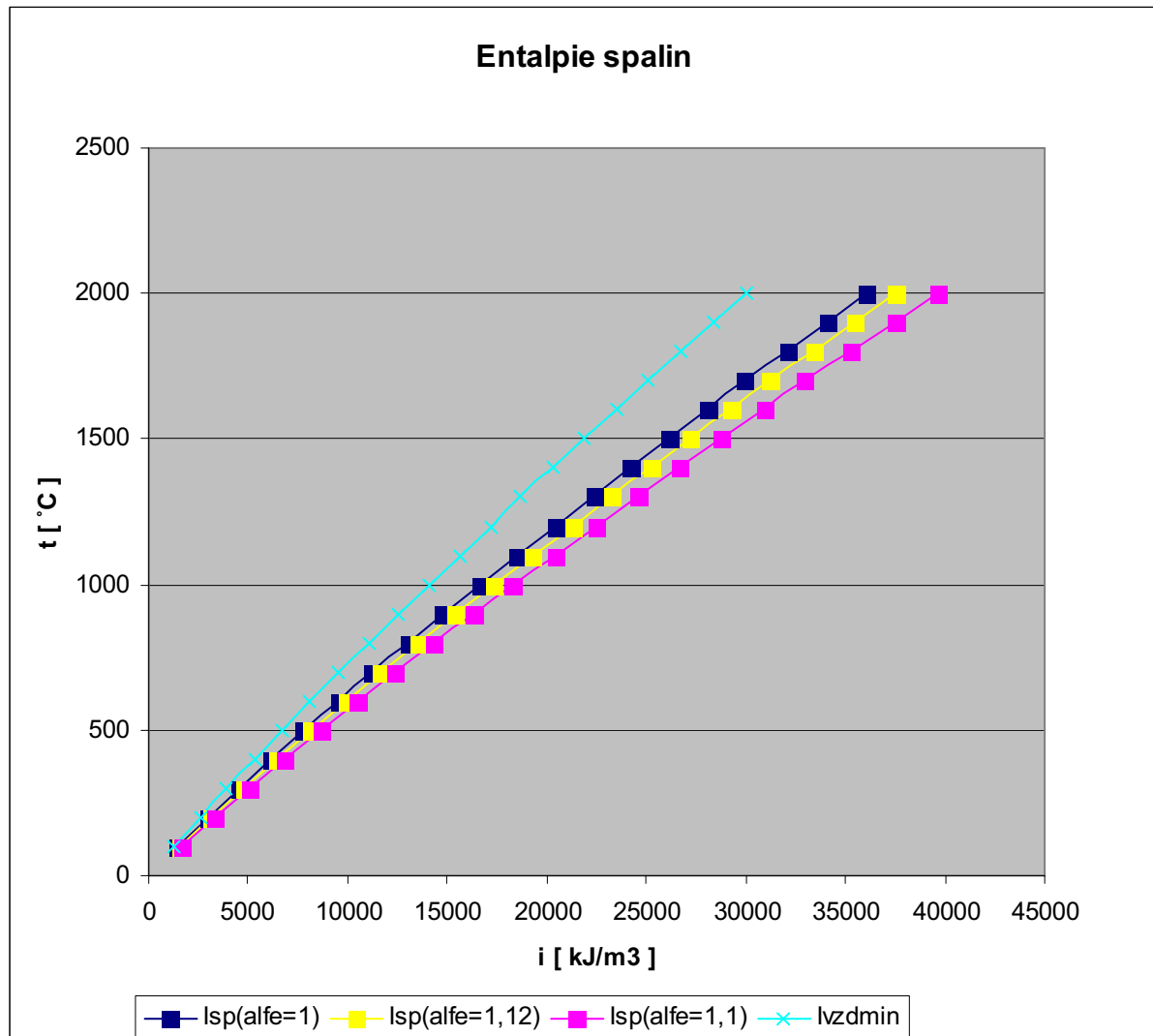
## Přepočet kotle při dílčím výkonu

Tab. 1 Entalpie spalin

$t$ [°C]	$i_{CO_2}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$i_{N_2}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$i_{H_2O}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$i_{Ar}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$c$ [kJ/m <sup>3</sup> K]	$I_{spmin}$ [kJ/kg]	$I_{vedmin}$ [kJ/kg]	$I_{sp}(\alpha=1,12)$ [kJ/kg]	$I_{sp}(\alpha=1)$ [kJ/kg]	$I_{sp}(\alpha=1,05)$ [kJ/kg]
100	170	130	150	93	1,334	1491,04616	1294,5199	1646,388551	1491,046	1555,138
200	357	260	304	186	1,342	3008,034744	2604,566381	3320,58271	3008,03474	3138,26306
300	559	392	463	278	1,352	4566,166116	3935,961714	5038,481522	4566,16612	4762,9642
400	772	527	626	372	1,365	6167,060635	5298,41	6802,869835	6167,06064	6431,98114
500	994	666	795	465	1,379	7820,315125	6690,940833	8623,228025	7820,31513	8154,86217
600	1225	804	969	557	1,393	9485,852906	8110,643	10459,13007	9485,85291	9891,38506
700	1462	948	1149	650	1,409	11216,0421	9571,102167	12364,57436	11216,0421	11694,5972
800	1705	1094	1334	743	1,423	12978,30035	11047,08781	14303,95089	12978,3003	13530,6547
900	1952	1242	1526	834	1,437	14774,73016	12550,24479	16280,75953	14774,7302	15402,2424
1000	2204	1392	1723	928	1,449	16602,47875	14061,165	18289,81855	16602,4787	17305,537
1100	2464	1547	1934	1020	1,462	18506,33261	15606,04938	20379,05853	18506,3326	19286,6351
1200	2724	1702	2145	1113	1,474	20410,27575	17164,51943	22470,01808	20410,2757	21268,5017
1300	2984	1856	2357	1205	1,482	22308,70464	18695,81814	24552,20281	22308,7046	23243,4955
1400	3244	2011	2568	1298	1,495	24212,64778	20310,57167	26649,91638	24212,6478	25228,1764
1500	3504	2166	2779	1390	1,504	26116,50164	21892,33143	28743,58141	26116,5016	27211,1182
1600	3772	2325	3008	1483	1,514	28097,77954	23507,08495	30918,62973	28097,7795	29273,1338
1700	4040	2468	3238	1576	1,521	29959,87833	25091,75593	32970,88904	29959,8783	31214,4661
1800	4308	2645	3467	1669	1,53	32077,66119	26724,94714	35284,65485	32077,6612	33413,9085
1900	4576	2805	3697	1762	1,537	34068,68133	28338,73026	37469,32897	34068,6813	35485,6178
2000	4844	2965	3926	1855	1,545	36057,54284	29985,50714	39655,8037	36057,5428	37556,8182

Pozn: Tabulka sestavena dle hodnot z [1]

Obr.1 I-t diagram spalín a vzduchu



Pozn: Diagram je sestaven dle hodnot vypočítaných v tabulce 1.

### 3. Tepelná bilance kotle

Teplo přivedené do kotle

$$Q_p^p = Q_i^r$$

#### 3.1 Ztráty kotle

-ztráta chemickým nedopalem pro plynové kotle  $z_{co} = 0,5\%$  voleno podle [1]

-ztráta sdílením tepla do okolí pro hliníkový nátěr oplechování  $z_{so} = 0,56\%$  voleno podle [1]

-ztráta komínová pro výstupní teplotu spalin  $t_k = 140^\circ\text{C}$  a teplotu vzduchu  $t_{vzd} = 30^\circ\text{C}$

-ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků  $z_c = 0\%$

$$z_k = \frac{I_{sp} - I_{vzd}}{Q_p^p} = \frac{2316,07 - 433,65}{34340} \cdot 100 = 5,48\% \quad (3.0)$$

$I_{sp} = 2316,07 \text{ kJ} / \text{kg}$  hodnota zjištěna z tab. 1 pro teplotu spalin

$$I_{vzd \min} = O_{vzd \min}^s \cdot c \cdot t_{25} = 9,704 \cdot 1,33 \cdot 30 = 387,19 \text{ kJ} / \text{kg} \quad (3.1)$$

$$I_{vzd} = \alpha \cdot I_{vzd \min} = 1,12 \cdot 387,19 = 433,65 \text{ kJ} / \text{kg} \quad (3.2)$$

#### 3.2 Tepelná účinnost kotle

$$\eta_k = 100 - \sum z = 100 - 6,54 = 93,46\% \quad (3.3)$$

#### 3.3 Výrobní teplo páry

Dle zadání kotel dodává  $M_{pp} = 160[t / h] \implies 44,44[\text{kg} / \text{s}]$

Entalpie výstupní páry odpovídá tlaku  $p = 13,64$  [MPa] a teplotě  $T = 540$  [ $^\circ\text{C}$ ]  $\rightarrow$

$i_p = 3438,122 \text{ kJ} / \text{kg}$  hodnota z [4].

Entalpie napájecí vody odpovídá tlaku  $p = 14,2$  [MPa] a teplotě  $T = 236$  [ $^\circ\text{C}$ ]  $\rightarrow$

$i_{nv} = 1020,416 \text{ kJ} / \text{kg}$  hodnota z [4].

Výrobní teplo páry

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{III2} - i_{nv}) = 44,4 \cdot (3438,122 - 1020,416) = 107453,63 \text{ kW} \quad (3.4)$$

Množství paliva přivedeného do kotle

$$M_p = \frac{Q_v}{\frac{Q_p^p \cdot \eta_k}{100}} = \frac{107453,63}{34340 \cdot \frac{93,48}{100}} = 3,35 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (3.5)$$

### 3.4 Skutečné množství spáleného paliva

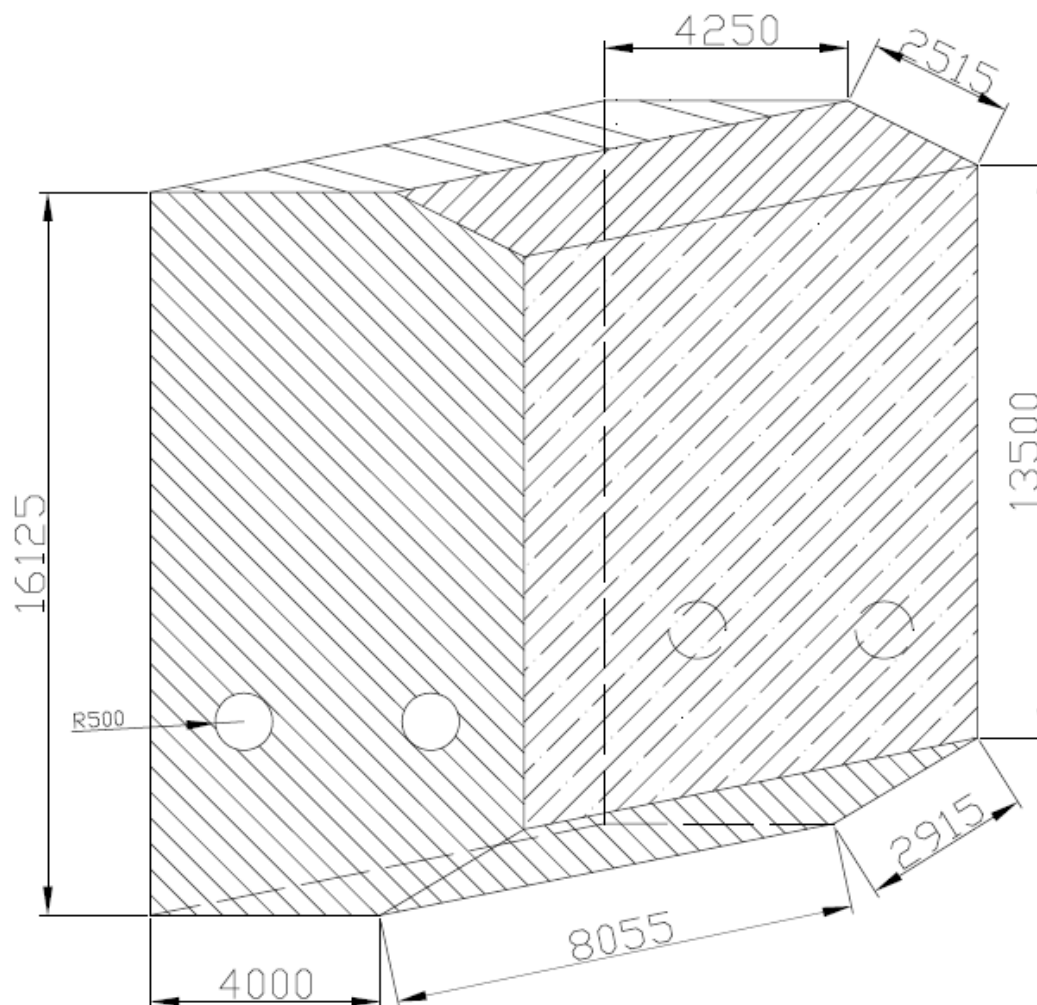
$$M_{pv} = M_p \cdot \left(1 - \frac{\xi_c}{100}\right) = 3,35 \cdot \left(1 - \frac{0}{100}\right) = 3,35 m^3 / s \quad (3.6)$$

## 4. Výpočet velikosti stěn spalovací komory

Pro uspořádání ohniště s membránovými stěnami s trubkami holými a hladkými:

-úhlový součinitel trubkové stěny pro  $x=1$  voleno podle [1]

-součinitel zanesení stěn ohniště  $\varepsilon = 0,65$  voleno podle [1]



Obr 2. Rozměry spalovací komory

## Přepočet kotle při dílčím výkonu

Plocha dna spalovací komory

$$S_{dno} = S_1 + S_2 = 4 \cdot 8,055 + 2,9 \cdot 8,055 = 55,7m^2 \quad (4.0)$$

Plocha stropu spalovací komory

$$S_{strop} = 2,51 \cdot 8,055 = 20,26m^2 \quad (4.1)$$

Plocha levé strany spalovací komory

$$S_L = 16,125 \cdot 8,055 = 129,89m^2 \quad (4.2)$$

Plocha pravé strany spalovací komory

$$S_P = 13,5 \cdot 8,055 = 108,74m^2 \quad (4.3)$$

Plocha přední strany spalovací komory

$$S_P = S_4 + S_5 + S_6 - 2 \cdot S_h = 16,125 \cdot 6,5 - \frac{2,5 + 1,5}{2} - \frac{2,25 + 1,125}{2} - 2 \cdot 0,785 = 100,1m^2 \quad (4.4)$$

Plocha hořáků

$$S_h = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,5^2 = 0,785m^2 \quad (4.5)$$

Plocha zadní strany spalovací komory

$$S_P = S_4 + S_5 + S_6 - 2 \cdot S_h = 16,125 \cdot 6,5 - \frac{2,5 + 1,5}{2} - \frac{2,25 + 1,125}{2} - 2 \cdot 0,785 = 100,1m^2 \quad (4.6)$$

Celkový povrch stěn ohniště

$$F_{st} = \sum S_i = 55,7 + 20,26 + 129,89 + 108,74 + 100,1 + 100,1 = 514,8m^2 \quad (4.7)$$

Účinná sálavá plocha stěn ohniště

$$F_{is} = \sum F_{st} \cdot x = 514,8 \cdot 1 = 514,8m^2 \quad (4.8)$$

Objem spalovací komory

$$V_0 = 16,125 \cdot 6,5 \cdot 8,055 - \frac{2,5 \cdot 8,055 \cdot 2,92}{2} - \frac{2,25 \cdot 2,52 \cdot 8,055}{2} = 792,11m^3 \quad (4.9)$$

**5. Tepelný výpočet ohniště**

Součinitel M pro spalování plynu a mazutu

$$M = 0,54 - 0,2x_o$$

$$M = 0,54 - 0,2 \cdot (6,5 / 16,125) = 0,46$$

Vzorec pro výpočet M dle [5]

$$(5.0)$$

Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{z_{so}}{\eta_k + z_{so}} = 1 - \frac{0,56}{93,46 + 0,56} = 0,994 \quad (5.1)$$

Součinitel tepelné efektivity ohniště

$$\psi = \varepsilon \cdot x = 1 \cdot 0,6 = 0,6 \quad (5.2)$$

$x = 0,6$  určeno dle [1]

Teplo přivedené do spalovací komory se vzduchem z OVZ

$$Q_{vz} = \alpha \cdot I_{vz190} = 1,12 \cdot 2471,43 = 2767,99 \text{ kJ / kg} \quad (5.3)$$

### 5.1 Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_U = Q_p \cdot \frac{100 - z_{co}}{100} + Q_{vz} = 34340 \cdot \frac{100 - 0,5}{100} + 2767,99 = 36936,3 \text{ kJ / kg} \quad (5.4)$$

Entalpii  $I_U = 36936,3 \text{ kJ / kg}$  odpovídá podle I-t diagramu spalín a vzduchu teoretická adiabatická teplota  $\vartheta_a = 1875,62^\circ\text{C}$ .

Teplota spalín na konci ohniště a odpovídající entalpie

$$\vartheta_{0voleno} = 1224^\circ\text{C} \text{ (voleno)} \rightarrow 22969,74 \text{ kJ / m}^3$$

Střední celkové měrné teplo spalín

$$\bar{O}_{sp} \cdot \bar{C} = \frac{I_u - I_0}{\vartheta_a - \vartheta_0} \quad (5.5)$$

$$\bar{O}_{sp} \cdot \bar{C} = \frac{36936,298 - 22969,742}{1875,6214 - 1224} = 21,433 \text{ kJ / kgK}$$

Boltzmannovo číslo

$$B_0 = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \bar{O}_{sp} \cdot \bar{C}}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \psi \cdot F_{st} \cdot \vartheta_a^3} \quad (5.6)$$

$$B_0 = \frac{0,994 \cdot 3,35 \cdot 21,433}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,6 \cdot 514,8 \cdot 1875,62^3} = 0,61$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_o}{F_{st}} \quad (5.7)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{792,11}{514,8} = 5,539 \text{ m}$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264 \text{ MPa} \quad (5.8)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomového plynu

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{T_o}{1000} \right) \quad (5.9)$$

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,1824}{3,16 \cdot \sqrt{0,0264 \cdot 5,539}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{1224 + 273,15}{1000} \right) = 3,492 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{NS} = k_{sp} \cdot r_{sp} = 3,492 \cdot 0,264 = 0,922 \frac{1}{m \cdot MPa} \quad (5.10)$$

Podíl obsahu uhlíku a vodíku v palivu

$$\frac{C^r}{H^r} = 0,12 \sum \frac{x}{y} \cdot C_x \cdot H_n \quad (5.11)$$

$$\frac{C^r}{H^r} = 0,12 \cdot \sum \frac{4}{2} \cdot 96,7 + \frac{6}{2} \cdot 1,43 + \frac{8}{2} \cdot 0,43 + \frac{10}{2} \cdot 0,13 + \frac{12}{2} \cdot 0,03 = 2,98529$$

Součinitel zeslabení sálání částicemi sazí

$$k_c = 0,3 \cdot (2 - \alpha) \left( 1,6 \cdot \frac{T_o}{1000} - 0,5 \right) \cdot \frac{C^r}{H^r} \quad (5.12)$$

$$k_c = 0,3 \cdot (2 - 1,12) \cdot \left( 1,6 \cdot \frac{1224 + 273,15}{1000} - 0,5 \right) \cdot 2,98529 = 1,49 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

Součinitel zeslabení sálání svítivé části plamene

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_c \quad (5.13)$$

$$k = 3,492 \cdot 0,0264 + 1,49 = 2,42 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

Stupeň černosti svítivé části plamene

$$a_{SV} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (5.14)$$

$$a_{SV} = 1 - e^{-2,42 \cdot 0,15 \cdot 5,539} = 0,737$$

Stupeň černosti nesvítivé části plamene

$$a_{NS} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (5.15)$$

$$a_{NS} = 1 - e^{-0,922 \cdot 0,15 \cdot 5,539} = 0,4$$

Efektivní stupeň černosti plamene

$$a_{pl} = m \cdot a_{SV} + (1 - m) \cdot a_{NS} \quad (5.16)$$

$$a_{pl} = 0,1 \cdot 0,737 + (1 - 0,1) \cdot 0,4 = 0,43$$

m - součinitel charakterizující podíl objemu ohniště zaplněného svítivou částí plamene, pro spalování plynu m = 0,1, podle [1].

## 5.2 Teplota spalin na výstupu z ohniště

Výpočet teploty spalin na konci ohniště

$$\vartheta_0 = \frac{\vartheta_a + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{B_o}\right)^{0,6}} - 273,15$$

$$\vartheta_0 = \frac{1875,62 + 273,15}{1 + 0,46 \cdot \left(\frac{0,56}{0,61}\right)^{0,6}} - 273,15 = 1223,62^\circ\text{C}$$
(5.17)

Teplotě  $\vartheta_0 = 1223,62^\circ\text{C}$  odpovídá podle I-t diagramu spalin a vzduchu entalpie

$$I_0 = 22969,742 \text{ kJ} / \text{m}^3.$$

Bilance:

$$\Delta t = \vartheta_{\text{voleno}} - \vartheta_0 = 1224 - 1223,62 = 0,38 \text{ }^\circ\text{C}$$
(5.18)

Vypočtený rozdíl  $\Delta t = 0,38^\circ\text{C}$  vyhovuje povolenému rozdílu  $\pm 20^\circ\text{C}$ .

## 6. Výpočet teplosměnných ploch ze strany pracovního média

### 6.1 Návrh tlakových ztrát na jednotlivých plochách.

Tlaková ztráta EKO :	$\Delta p_{\text{EKO}} = 0,1 \text{ [MPa]}$
Tlaková ztráta VYP:	$\Delta p_{\text{VYP}} = 0,0 \text{ [MPa]}$
Tlaková ztráta Stropního přehříváku:	$\Delta p_z = 0,06 \text{ [MPa]}$
Tlaková ztráta PI:	$\Delta p_{\text{PI}} = 0,1 \text{ [MPa]}$
Tlaková ztráta PII :	$\Delta p_{\text{PII}} = 0,1 \text{ [MPa]}$
Tlaková ztráta PIII :	$\Delta p_{\text{PIII}} = 0,1 \text{ [MPa]}$

### 6.2 Přehřívák III (dále již jen PIII)

**Parametry média na výstupu PIII:**  $p_{\text{III}2} = 13,64 \text{ Mpa}$

$$t_{\text{III}} = 540^\circ\text{C}$$

podle [4] pro  $p_{\text{III}2}$  a  $t_{\text{III}}$   $\rightarrow i_{\text{pIII}2} = 3438,122 \text{ kJ} / \text{kg}$

**Parametry média na vstupu do PIII:**  $p_{\text{III}1} = 13,74 \text{ Mpa}$

$$\Delta i = 191 \text{ kJ} / \text{kg} \text{ voleno dle konzultace}$$

$$i_{\text{III}1} = i_{\text{III}2} - 220 = 3438,12 - 191 = 3247,122 \text{ kJ} / \text{kg}$$
(6.0)

Entalpii  $i_{\text{III}1} = 3218,122 \text{ kJ} / \text{kg}$  a tlaku  $p_{\text{III}1} = 13,74 \text{ Mpa}$  odpovídá podle [4] teplota  $T = 472,08^\circ\text{C}$ .

Teplo spotřebované přehřívákem III

$$Q_{pIII} = M_{pp} \cdot \Delta i$$

$$Q_{pIII} = 44,44 \cdot (3438,12 - 3247,122) = 8488,88 \text{ kW} \quad (6.1)$$

### 6.3 Přehřívák II (dále již jen PII)

**Parametry média na výstupu z PII:**  $p_{II2} = 13,84 \text{ Mpa}$

Entalpie napájecí vody při tlaku  $p_{nv} = 14,24 \text{ Mpa}$  a teplotě  $T = 236 \text{ }^\circ\text{C}$  odpovídá podle [4] entalpii  $i_{nv} = 1020,42 \text{ kJ / kg}$ .

Regulační vstřík o velikosti 1,2 % z  $M_{pp}$

$$M_{vsII} = 0,012 \cdot M_{pp} = 0,012 \cdot 44,44 = 0,53 \text{ kg / s} \quad (6.2)$$

Hmotnostní průtok pracovního média v PII

$$M_{pII} = M_{pp} - M_{vsII} = 44,44 - 0,53 = 43,91 \text{ kg / s} \quad (6.3)$$

Entalpie výstupní pro PII

$$i_{II2} = \frac{M_{pp} \cdot i_{III1} - M_{vsI} \cdot i_{nv}}{M_{pII}} = \frac{44,44 \cdot 3247,12 - 0,53 \cdot 1020,42}{43,91} = 3274,17 \text{ kJ / kg} \quad (6.4)$$

Entalpii  $i_{II2}$  a tlaku  $p_{II2}$  odpovídá podle [4] teplota  $T = 481,32 \text{ }^\circ\text{C}$

**Parametry média na vstupu do PII:**  $p_{II1} = 13,84 \text{ Mpa}$

$\Delta i = 350 \text{ kJ / kg}$  voleno dle konzultace

Entalpie vstupní pro PII

$$i_{II1} = i_{II2} - 350 = 3274,17 - 350 = 2924,17 \text{ kJ / kg} \quad (6.5)$$

Entalpii  $i_{II1}$  a tlaku  $p_{II1}$  odpovídá podle [4] teplota  $T = 380,17 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Teplo spotřebované přehřívákem II

$$Q_{pII} = M_{pII} \cdot \Delta i$$

$$Q_{pII} = 43,91 \cdot (3274,17 - 2924,17) = 15368,89 \text{ kW} \quad (6.6)$$

### 6.4 Přehřívák I (dále již jen PI)

**Parametry média na výstupu z PI:**  $p_{I2} = 13,84 \text{ Mpa}$

Regulační vstřík o velikosti 1,5 % z  $M_{pp}$

$$M_{vsI} = 0,015 \cdot M_{pp} = 0,015 \cdot 44,44 = 0,67 \text{ kg / s} \quad (6.7)$$

Hmotnostní průtok pracovního média v PI

$$M_{pI} = M_{pII} - M_{vsII} = 43,91 - 0,67 = 43,24 \text{ kg / s} \quad (6.8)$$

Entalpie výstupní pro PI

$$i_{12} = \frac{M_{pII} \cdot i_{pIIvys} - M_{vsII} \cdot i_{nv}}{M_{pI}} \quad (6.9)$$

$$i_{12} = \frac{43,91 \cdot 2924,17 - 0,67 \cdot 1020,42}{43,24} = 2953,52 \text{ kJ / kg}$$

Entalpii  $i_{12} = 2953,52 \text{ kJ / kg}$  a tlaku  $p_{12} = 13,84 \text{ Mpa}$  odpovídá podle [4] teplota  $T = 386,91^\circ\text{C}$ .

**Parametry média na vstupu do PI:**  $p_{11} = 13,94 \text{ Mpa}$

$$i_{11} = 2657,84 \text{ kJ / kg}$$

Entalpii  $i_{11}$  a tlaku  $p_{11}$  odpovídá podle [4] teplota  $T = 338,04^\circ\text{C}$ .

Teplo spotřebované přehřívákem I

$$Q_{pI} = M_{pI} \cdot (i_{12} - i_{11}) \quad (6.10)$$

$$Q_{pI} = 43,24 \cdot (2953,52 - 2657,84) = 12786,31 \text{ kW}$$

## 6.5 Stropní přehřívák

**Parametry média na výstupu ze stropního přehříváku:**

$$p_{s2} = 13,94 \text{ Mpa}$$

$$i_{s2} = 2657,84 \text{ kJ / kg} \text{ podle [4]}$$

$$T = 338,04^\circ\text{C} \text{ podle [4]}$$

**Parametry média na vstupu do závěsných trubek:**

$$p_{s1} = 14 \text{ Mpa}$$

$$i_{11} = 2638,09 \text{ kJ / kg} \text{ podle [4]}$$

$$T = 336,67^\circ\text{C} \text{ podle [4]}$$

Teplo spotřebované stropním přehřívákem

$$Q_z = M_{p1} \cdot (i_{s2} - i_{s1}) \quad (6.11)$$

$$Q_z = 43,24 \cdot (2657,84 - 2638,09) = 853,96 \text{ kW}$$

## 6.6 Výparník

**Parametry média na výstupu z výparníku:**  $p_v = 14 \text{ Mpa}$

Tlaku  $p_v$  odpovídá teplota sytosti  $t_{sy} = 336,67^\circ\text{C}$  podle [4] a  $i'' = 2638,09 \text{ kJ / kg}$  podle [4]. Pro bilanční tepelný výpočet se použije teplota sytosti od které je nutné odečíst teplotu nedohřevu. Teplotní rozdíl nedohřevu bude kompenzován v parním bubnu.

Teplo spotřebované výparníkem

$$Q_{výp} = (M_{pp} - M_{vsII} - M_{vsI}) \cdot (i'' - i_{EKO2}) \quad (6.12)$$

$$Q_{výp} = (44,44 - 0,53 - 0,67) \cdot (2638,09 - 1365,01) = 55053,65 \text{ kW}$$

Teplo předané výparníku ve spalovací komoře

$$Q_{sk} = M_{pv} \cdot (I_U - I_0) = 3,35 \cdot (36936,298 - 22969,74) = 46761,9 kW \quad (6.13)$$

Teplo které je nutné předat výparníku ve druhém tahu

$$Q_{výpII} = Q_{výp} - Q_{sk} = 55053,65 - 46761,9 = 8291,75 kW \quad (6.14)$$

### 6.7 Ekonomizér (dále již jen EKO)

**Parametry média na výstupu z EKA:**  $p_{EKO2} = 14,2 \text{ Mpa}$

$$\Delta t = 32^\circ C$$

$$t_{EKO2} = t_{syt} - 32 = 336,67 - 32 = 304,67^\circ C \quad (6.15)$$

Tlaku  $p_{EKO2}$  a tlaku  $t_{EKO2}$  odpovídá podle [4] entalpie  $i_{EKO2} = 1365,01 \text{ kJ / kg}$ .

**Parametry média na vstupu EKA:**

Entalpie napájecí vody při tlaku  $p_{nv} = 14,2 \text{ Mpa}$  a teplotě  $T = 236^\circ C$  odpovídá podle [4]

entalpie  $i_{nv} = 1020,416 \text{ kJ / kg}$ .

Teplo spotřebované ekonomizérem

$$Q_{EKO} = (M_{pp} - M_{vsII} - M_{vsI}) \cdot (i_{EKO2} - i_{nv}) \quad (6.16)$$

$$Q_{EKO} = (44,44 - 1,33 - 2,22) \cdot (1365,01 - 1020,416) = 14901,92 kW$$

### 6.8 Ohřívák vzduchu

**Parametry média na vstupu do ohříváku vzduchu:**

$$t_1 = 30^\circ C$$

Hodnota vstupní entalpie zjištěna interpolací z tab.1  $i_1 = 387,19 \text{ kJ / m}^3$

**Parametry média na výstupu z ohříváku vzduchu:**

$$t_1 = 190^\circ C$$

Hodnota vstupní entalpie zjištěna interpolací z tab.1  $i_1 = 2471,42 \text{ kJ / m}^3$

Součinitel přebytku vzduchu  $\beta_{vz} = 1,15$  voleno

**Teplo spotřebované výparníkem**

$$Q_{OVZ} = \beta_{ovz} \cdot (I_2 - I_1) = 1,15 \cdot (2471,42 - 387,19) = 8025,4 kW \quad (6.17)$$

### 6.9 Celkové potřebné teplo

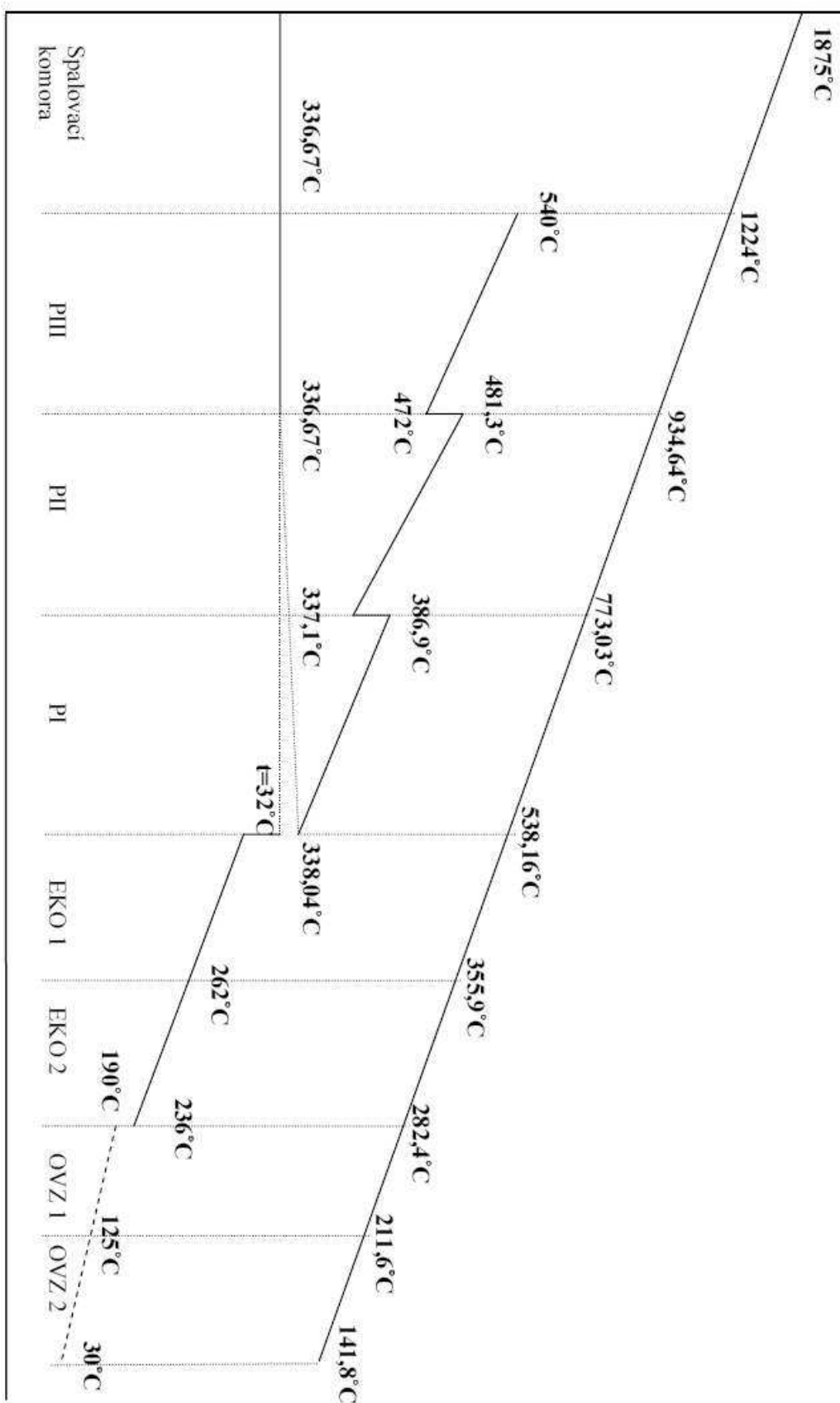
$$Q_C = Q_{pIII} + Q_{pII} + Q_{pI} + Q_z + Q_{výp} + Q_{EKO} = 107453,63 kW \quad (6.18)$$

**6.10 Stručné shrnutí bilančních výpočtů:**

Tab.2 Shrnutí bilančních výpočtů

		Tlak[Mpa]	Teplota	Entalpie [kJ/kg]	Průtok [kg/s]
PIII	výstup	13,64	540	3438,122418	44,4
	vstup	13,74	472,0806	3247,122418	44,4
PII	výstup	13,74	481,3187	3274,167438	43,9
	vstup	13,84	380,1704	2657,840947	43,9
PI	výstup	13,84	386,9137	2953,516127	43,2
	vstup	13,94	338,0589	2657,840947	43,2
Stropní přehřívák	výstup	13,94	338,04	2657,840947	43,2
	vstup	14	336,6694	2638,093448	43,2
Výparník	výstup	14	336,6694	2657,840947	43,2
	vstup	14	304,6694	1365,013086	43,2
EKO	výstup	14	304,6694	1365,013086	43,2
	vstup	14,2	236	1020,415768	43,2

Přepočet kotle při dílčím výkonu

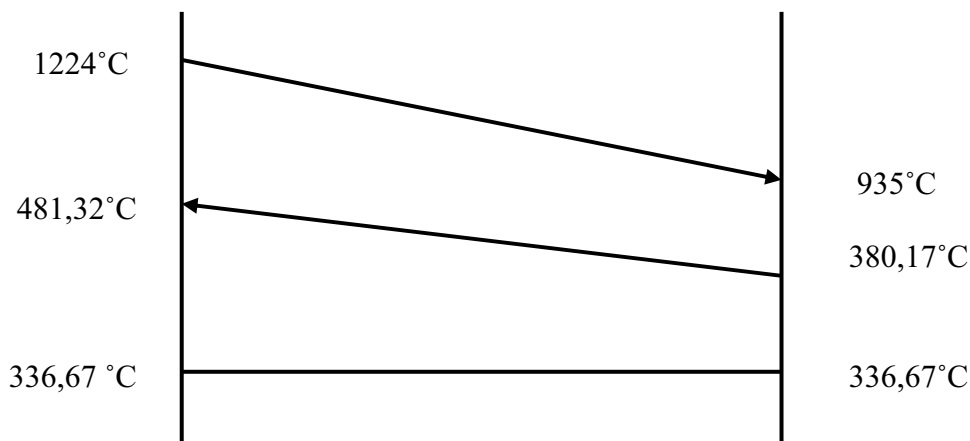


Obr.3 Pilový diagram

## 7. Výpočet oblasti PII

Výpočet je prováděn podle [2].

### 7.1 Teplotní spád v oblasti PII



Obr.4 Grafické zobrazení teplotního spádu podle zapojení výměníků v oblasti PII

### 7.2 Deskový přehřívák

Teplota spalin: vstupní  $t_{in} = 1224^{\circ}\text{C}$   
volím výstupní  $t_{out} = 935^{\circ}\text{C}$

Výstupní teplotě spalin odpovídá entalpie  $I_{sp2} = 16983,93\text{kJ} / \text{m}^3$  hodnota zjištěna interpolací z tab 1.

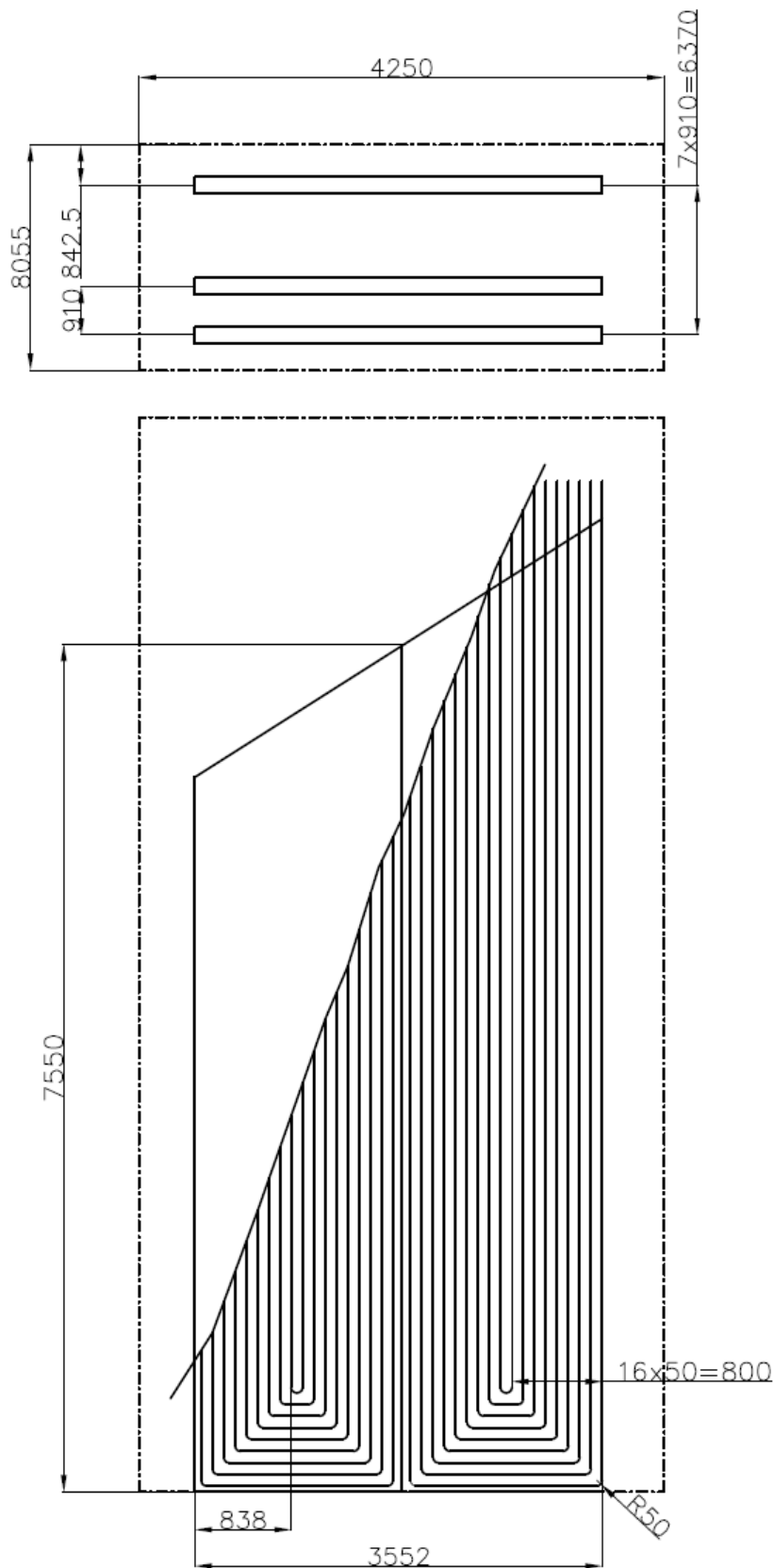
#### Bilanční teplo předané na této ploše

$$Q_b = \varphi \cdot (I_0 - I_{sp2}) = 0,994 \cdot (22969,74 - 16983,93) = 5950,16\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (7.0)$$

Rozměry deskového přehříváku

příčná rozteč	$s_1 = 0,05\text{m}$
podélná rozteč	$s_2 = 0,91\text{m}$
počet trubek	$z_2 = 17$
vnější průměr trubek	$D = 0,038\text{m}$
tloušťka stěny	$s = 0,0044$
vnitřní průměr trubek	$d = 0,0292\text{m}$
hloubka deskového prostoru	$a = 8,055\text{m}$
šířka vstupního prostoru	$b = 4,25\text{m}$
výška výstupního prostoru	$c = 7,65\text{m}$
střední výška deskového prostoru	$d = 7\text{m}$

Přepočet kotle při dílčím výkonu



Obr.5 Schéma deskového přehříváku

Podélná rozteč

$$\sigma_2 = s_2 / D = 0,038 / 0,05 = 1,316 \quad (7.1)$$

Příčná rozteč

$$\sigma_1 = s_1 / D = 0,91 / 0,038 = 23,947 \quad (7.2)$$

Počet desek

$$n_d = \frac{a}{s_1} - 1 = \frac{8,055}{0,91} - 1 = 7,85 \Rightarrow 8 \quad (7.3)$$

Celkový počet trubek

$$n_{tr} = n_d \cdot z_2 = 8 \cdot 17 = 136ks \quad (7.4)$$

Šířka desky

$$A = 16 \cdot s_2 + D = 16 \cdot 0,05 + 0,038 = 0,838m \quad (7.5)$$

Celková plocha jedné desky

$$S_d = A \cdot d \cdot 4 = 0,838 \cdot 7,55 \cdot 4 = 25,3076m^2 \quad (7.6)$$

Střední teplota páry v DP

$$t_p = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{481,33 + 380,17}{2} = 430,745^\circ C \quad (7.7)$$

Měrný objem páry pro střední tlak  $p=13,79\text{Mpa}$  a pro střední teplotu  $t_p=430,745^\circ C$  je $v_p = 0,01943m^3 / kg$ , hodnota z [4].

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pII} \cdot v_p}{n_{tr} \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 43,91 \cdot 0,01943}{136 \cdot \pi \cdot 0,0292^2} = 9,375m / s \quad (7.8)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry**

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot v_p} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (7.9)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,08141}{0,0292} \cdot \left( \frac{9,375 \cdot 0,0196}{2,78 \cdot 10^{-5} \cdot 0,01943} \right)^{0,8} \cdot 1,211^{0,4} = 2537,32W / m^2 K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu páry, hodnoty z [4]

$$\text{Pr} = 1,211$$

$$\lambda_p = 0,08141W / mK$$

$$\eta_p = 2,78 \cdot 10^{-5} m^2 / s$$

Světlý průřez kanálu (vstup)

$$F_1 = a \cdot b - (D \cdot n_D \cdot l \cdot 2 + 2 \cdot D \cdot (a + b)) \quad (7.10)$$

$$F_1 = 8,055 \cdot 4,25 - (0,038 \cdot 8 \cdot 1,8 \cdot 2 + 2 \cdot 0,0603 \cdot (4,25 + 8,055)) = 31,66 m^2$$

Světlý průřez kanálu (výstup)

$$F_2 = a \cdot c - D \cdot c \cdot n_d + D \cdot (2c + a) \quad (7.11)$$

$$F_2 = 8,055 \cdot 7,65 - 0,038 \cdot 7,65 \cdot 8 + 0,0603 \cdot (2 \cdot 7,65 + 8,055) = 57,89 m^2$$

Střední hodnota průřezu

$$F = \frac{2F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2} = \frac{2 \cdot 57,89 \cdot 31,66}{57,89 + 31,66} = 40,93 m^2 \quad (7.12)$$

Při rozdílném vstupním a výstupním průřezu o 25% se počítá střední hodnota průřezů.

Ekvivalentní průměr kanálu

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 40,93}{156,86} = 1,04 m \quad (7.13)$$

Střední teplota spalin

$$t_s = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{1224 + 935}{2} = 1079,5^\circ C \quad (7.14)$$

Rychlost proudění spalin v kanále

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot t_{str} + 273}{F} \quad (7.15)$$

$$w_s = \frac{3,35 \cdot 12,03 \cdot 1079,5 + 273}{40,93} = 4,87 m/s$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin****Příčné obtékání trubek**

$$\alpha_{kpr} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (7.16)$$

$$\alpha_{kpr} = 0,2 \cdot 0,935 \cdot 0,797 \cdot \frac{0,1292}{0,038} \cdot \left( \frac{4,87 \cdot 0,038}{1,64 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,5944^{0,33} = 41,14 W / m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalin v deskovém přehříváku, hodnoty z [4]

$$Pr = 0,5944$$

$$\lambda_s = 0,1292 W / mK$$

$$v_s = 1,64 \cdot 10^{-4} m^2 / s$$

Oprava na počet podélných řad

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

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (4 - 2) = 0,935 \quad (7.17)$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči a poměrné podélné rozteči

$$c_s = \left[ 1 + (2\sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} \quad (7.18)$$

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,31}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,7970$$

**Podélné obtékání trubek**

$$\alpha_{kpod} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d_e}{v_s} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_m \cdot c_l \quad (7.19)$$

$$\alpha_{kpod} = 0,023 \cdot \frac{0,1292}{1,04} \cdot \left( \frac{4,87 \cdot 1,04}{1,64 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,5944^{0,4} \cdot 1 = 9,05 W / m^2 \cdot K$$

Hodnoty opravných koeficientů

$c_t = 1$  pro ohřívání vody a páry, podle [1]

$c_m$  se nezavádí, podle [1]

$c_l$  se u deskových přehříváků nezavádí, podle [1]

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$S_{DP} = \frac{1,8}{\frac{1}{a} + \frac{1}{s_1} + \frac{1}{k}} = \frac{1,8}{\frac{1}{7,55} + \frac{1}{0,91} + \frac{1}{3,552}} = 1,19 m \quad (7.20)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách n

$$t_z = t_p + \Delta t = 430,745 + 25 = 455,745^\circ C \quad (7.21)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25^\circ C$  dle [1].

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$a_{st} = 0,8$  voleno podle [1], totožná hodnota použita i ve výpočtu následujících ploch.

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,247 \cdot (1079,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{455,745 + 273,15}{1079,5 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{455,745 + 273,15}{1079,5 + 273,15} \right)} = 60,58 W / m^2 K \quad (7.22)$$

Objem části tříatomových plynů

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,03} = 0,084 \quad (7.23)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s \min}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18 \quad (7.24)$$

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,084 + 0,18 = 0,264 \quad (7.25)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264 \text{ MPa} \quad (7.26)$$

Součinitel zeslabení sálaní nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S_{DP}}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(t_s + 273,15)}{1000} \right) \quad (7.27)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,0264 \cdot 1,19}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(1079,5 + 273,15)}{1000} \right) = 9,02 \frac{1}{m \cdot \text{MPa}}$$

Optická hustota spalin

$$k_{ps} = k_s \cdot r_s \cdot p \cdot S_{DP} = 9,02 \cdot 0,1 \cdot 0,264 \cdot 1,19 = 0,283 \quad (7.28)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{ps}} = 1 - e^{-0,283} = 0,247 \quad (7.29)$$

Velikost sálové plochy deskového přehříváku

$$S_{sal} = S_{DP} \cdot x = 0,88 \cdot 404,92 = 356,33 \text{ m}^2 \quad (7.30)$$

$x=0,88$  podle [1]

**Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin**

Příčné proudění

$$\alpha_{př} = \omega \cdot (\alpha_{kpř} + \alpha_s) \quad (7.31)$$

$$\alpha_{př} = 0,85 \cdot (41,14 + 60,58) = 86,46 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

$\omega = 0,85$  podle [2]

Podélné proudění

$$\alpha_{pod} = \omega \cdot (\alpha_{kpod} + \alpha_s) \quad (7.32)$$

$$\alpha_{pod} = 0,85 \cdot (9,02 + 60,58) = 59,2 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

$\omega = 0,85$  podle [2]

**Součinitel prostupu tepla**

Příčné proudění

$$k_{př} = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{př}} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$k_{př} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{86,46} + \frac{1}{2537,32}} = 71,07W / m^2K \quad (7.33)$$

Podélné proudění

$$k_{pod} = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{pod}} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$k_{pod} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{59,2} + \frac{1}{2537,32}} = 49,16W / m^2K \quad (7.34)$$

Plocha omývaná spaliny příčně

$$S_{př} = 0,82 \cdot S_{sál} = 0,82 \cdot 3,56 = 293,24m^2 \quad (7.35)$$

Plocha omývaná spaliny podélně

$$S_{pod} = 0,18 \cdot S_{sál} = 0,18 \cdot 356,331 = 63,09m^2 \quad (7.36)$$

**Výsledný součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{k_{pod} \cdot S_{pod} + k_{př} \cdot S_{př}}{S_{sál}}$$

$$k = \frac{49,16 \cdot 63,09 + 71,07 \cdot 293,25}{356,331} = 67,19W / m^2K \quad (7.37)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{742,68 - 554,83}{\ln \frac{742,68}{554,83}} = 648,75K \quad (7.38)$$

$$\Delta t_1 = 1224 - 481,32 = 742,68K \quad (7.39)$$

$$\Delta t_2 = 935 - 380,17 = 554,83K \quad (7.40)$$

**Tepelný výkon deskového přehříváku**

$$Q_{DP} = \frac{S_{sál} \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{356,331 \cdot 67,19 \cdot 648,75}{1000} = 15532,51kW \quad (7.41)$$

Odchylka bilance navrženého a vypočteného výkonu na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_{plI} - Q_{DP}}{Q_{plI}} \cdot 100 = \frac{15368,89 - 15532,51}{15368,89} \cdot 100 = -1,06\% \quad (7.42)$$

### 7.3 Membránová stěna v oblasti deskového přehříváku

Rozměry membránové stěny:

Vnější průměr trubek	D=0,0603m
Tloušťka stěny	s=0,0063m
Vnitřní průměr trubek	d=0,0474m
Podélná rozteč	$s_2=0,1$ m
Příčná rozteč	$s_1=0,08$ m
Výška membránové stěny	h=7,75m
Počet trubek	100
Počet podélných řad	$z_2=1$
Počet příčných řad	$z_1=206$
Rozměry prostoru	a=8,055m
	b=4,25m
	c=4,25m
	e=4,75m
	f=1,25m

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin

Podélné obtékání trubek

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (7.43)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,1292}{1,04} \cdot \left( \frac{4,87 \cdot 1,04}{1,64 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,5944^{0,4} \cdot 1 = 9,05 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalin, hodnoty z [4]

$$\text{Pr} = 0,5944$$

$$\lambda_s = 0,1292 \text{ W} / \text{mK}$$

$$\nu_s = 1,64 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_s = \alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,247 \cdot (1079,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{361,67 + 273,15}{1079,5 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{361,67 + 273,15}{1079,5 + 273,15} \right)} = 55,14 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K} \quad (7.44)$$

Objem části tříatomových plynů

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,3} = 0,084 \quad (7.45)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18 \quad (7.46)$$

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,084 + 0,18 = 0,264 \quad (7.47)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264 \text{ MPa} \quad (7.48)$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy u svazků z hladkých trubek (totožná s hlavní plochou)

Součinitel zeslabení sálání nesvítvými tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s_{DP}}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(t_s + 273,15)}{1000} \right) \quad (7.49)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,0264 \cdot 1,19}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(1079,5 + 273,15)}{1000} \right) = 9,02 \frac{1}{m \cdot \text{MPa}}$$

Optická hustota spalin

$$k_{ps} = k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s_{DP} = 9,02 \cdot 0,1 \cdot 0,264 \cdot 1,19 = 0,283 \quad (7.50)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,283} = 0,247 \quad (7.51)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{syt} + \Delta t = 336,67 + 25 = 361,67^\circ\text{C} \quad (7.52)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin**

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s = 9,05 + 55,14 = 64,19 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K} \quad (7.53)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \alpha \cdot \psi = 0,85 \cdot 64,19 = 54,57 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K} \quad (7.54)$$

$\psi = 0,85$  podle [1], ], totožná hodnota použita i ve výpočtu následujících ploch.

Plocha membránové stěny

$$S = b \cdot h_{stř} \cdot 2 + e \cdot a + a \cdot f \quad (7.55)$$

$$S = 4,25 \cdot 7,625 \cdot 2 + 4,75 \cdot 8,055 + 8,055 \cdot 1,25 = 113,14 \text{ m}^2$$

Střední logaritmičkový teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{887,33 - 598,33}{\ln \frac{878,33}{598,33}} = 734,19 \text{ K} \quad (7.56)$$

$$\Delta t_1 = 1224 - 336,67 = 887,3K \quad (7.57)$$

$$\Delta t_2 = 935 - 336,67 = 598,33K \quad (7.58)$$

**Tepelný výkon membránové stěny**

$$Q_m = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{113,14 \cdot 54,57 \cdot 734,19}{1000} = 4533kW \quad (7.59)$$

**6.4 Celkové teplo odebrané v oblasti PII**

$$Q_C = \frac{Q_{DP} + Q_m}{M_{pv}} = \frac{15532,51 + 4533,3}{3,35} = 5993,01kJ / m^3 \quad (7.60)$$

Bilanční odchylka na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{5950,16 - 5993,01}{5950,16} \cdot 100 = -0,72\% \quad (7.61)$$

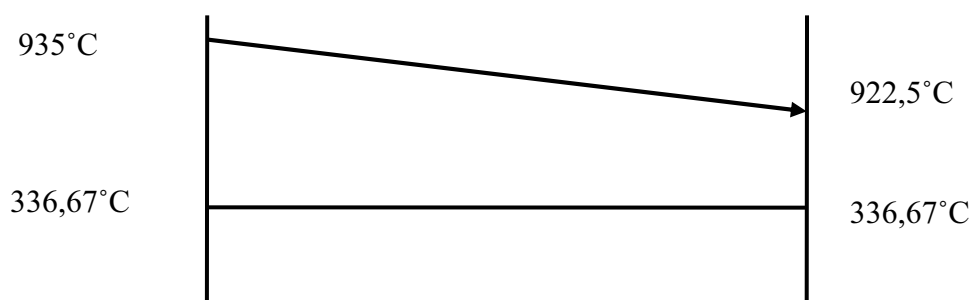
Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$

**Teplo výstupních spalin**

$$I_{sp1} = 22969,742kJ / m^3$$

$$I_{sp2} = I_0 - Q_C = 22969,742 - 5993,01 = 16976,73kJ / m^3 \quad (7.62)$$

Entalpii  $I_{sp2}$  odpovídá z I-t diagramu spalin a vzduchu teplota  $t_{out} = 934,64^\circ C$

**8. Mříž mezi přehříváky****8.1 Teplotní spád v mříži**

Obr.6 Grafické zobrazení teplotního spádu v mříži

Teplota spalin: vstupní  $t_{in} = 935^\circ C$   
volím výstupní  $t_{out} = 922,4^\circ C$

Výstupní teplotě spalin odpovídá entalpie  $I_{sp2} = 16730,79 \text{ kJ} / \text{m}^3$ , hodnota zjištěna interpolací z tab 1.

### Bilanční teplo předané na této ploše

$$Q_b = \varphi \cdot (I_{sp1} - I_{sp2}) = 0,994 \cdot (16976,73 - 16730,79) = 244,48 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (8.0)$$

### Rozměry mříže

Vnější průměr trubek	$D=0,0603\text{m}$
Tloušťka stěny	$s=0,0063\text{m}$
Vnitřní průměr trubek	$d=0,0477\text{m}$
Podélná rozteč	$s_2=0,825\text{m}$
Příčná rozteč	$s_1=0,33\text{m}$
Výška mříže	$h=7,65\text{m}$
Počet podélných řad	$z_2=1$
Počet příčných řad	$z_1=25$
Hloubka deskového prostoru	$a=8,055\text{m}$

### Podélná rozteč

$$\sigma_2 = s_2 / D = 0,825 / 0,063 = 13,68 \quad (8.1)$$

### Příčná rozteč

$$\sigma_1 = s_1 / D = 0,33 / 0,063 = 5,47 \quad (8.2)$$

### Světlý průřez kanálu

$$F = a \cdot h - D \cdot z_1 \cdot h = 8,055 \cdot 7,65 - 0,063 \cdot 25 \cdot 7,65 = 50,08 \text{ m}^2 \quad (8.3)$$

### Střední teplota spalin

$$t_s = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{935 + 922,4}{2} = 928,7^\circ\text{C} \quad (8.4)$$

### Rychlost proudění spalin v kanálu

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot t_{str} + 273}{F} \quad (8.5)$$

$$w_s = \frac{3,35 \cdot 12,03 \cdot 928,7 + 273}{50,08} = 3,54 \text{ m} / \text{s}$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin

#### Příčné obtékání trubek

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{\nu_s} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (8.6)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,8975 \cdot \frac{0,10762}{0,063} \cdot \left( \frac{3,54 \cdot 0,063}{1,619 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,609^{0,33} = 29,02 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalin v mříži, hodnoty z [4]

$$Pr = 0,609$$

$$\lambda_s = 0,10762 W / mK$$

$$\nu_s = 1,619 \cdot 10^{-4} m^2 / s$$

Oprava na počet podélných řad

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

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (1 - 2) = 0,8975 \quad (8.7)$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči a poměrné podélné rozteči

$$\sigma_2 \geq 2 \Rightarrow c_s = 1$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,093 \cdot (928,7 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{361,67 + 273,15}{928,7 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{361,7 + 273,15}{928,7 + 273,15} \right)} = 15,86 W / m^2 K \quad (8.8)$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S} = 3,6 \cdot \frac{3,72}{125,14} = 0,107 m \quad (8.9)$$

$$V = a \cdot h \cdot D = 8,055 \cdot 7,65 \cdot 0,0603 = 3,72 m^3 \quad (8.10)$$

$$S = 2 \cdot a \cdot h + 2 \cdot D \cdot h + 2 \cdot D \cdot a$$

$$S = 2 \cdot 8,055 \cdot 7,65 + 2 \cdot 0,0603 \cdot 7,65 + 2 \cdot 0,0603 \cdot 8,055 = 125,14 m^2 \quad (8.11)$$

Objem části tříatomových plynů

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,03} = 0,084 \quad (8.12)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s \min}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18 \quad (8.13)$$

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,084 + 0,18 = 0,264 \quad (8.14)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264 MPa \quad (8.15)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(t_s + 273,15)}{1000} \right) \quad (8.16)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,0264 \cdot 0,107}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(928,75 + 273,15)}{1000} \right) = 34,74 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

Optická hustota spalin

$$k_{ps} = k_s \cdot r_{sp} \cdot p \cdot s = 34,74 \cdot 0,1 \cdot 0,264 \cdot 0,107 = 0,093 \quad (8.17)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{ps}} = 1 - e^{-0,093} = 0,093 \quad (8.18)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{syt} + \Delta t = 336,67 + 25 = 361,67^\circ C \quad (8.19)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin**

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s = 29,02 + 15,86 = 44,88 W / m^2 K \quad (8.20)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \alpha \cdot \psi = 0,85 \cdot 44,88 = 38,15 W / m^2 K \quad (8.21)$$

Plocha stěny

$$S = \pi \cdot D \cdot h \cdot z_1 = 3,14 \cdot 0,0603 \cdot 7,65 \cdot 25 = 36,21 m^2 \quad (8.22)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{598,33 - 585,73}{\ln \frac{598,33}{585,73}} = 592,67 K \quad (8.23)$$

$$\Delta t_1 = 935 - 336,67 = 598,33 K \quad (8.24)$$

$$\Delta t_2 = 922,4 - 336,67 = 585,73 K \quad (8.25)$$

**Tepelný výkon mříže**

$$Q_{mříže} = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{36,21 \cdot 38,15 \cdot 592,67}{1000} = 818,78 kW \quad (8.26)$$

**8.2 Celkové teplo odebrané v této části tahu**

$$Q_C = \frac{Q_{mříže}}{M_{pv}} = \frac{818,78}{3,35} = 244,55 kJ / m^3 \quad (8.27)$$

Bilanční odchylka na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{244,48 - 244,55}{244,48} \cdot 100 = -0,027\% \quad (8.28)$$

Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$ .

### Teplo výstupních spalin

$$I_{sp1} = 16976,73 \text{ kJ} / \text{m}^3$$

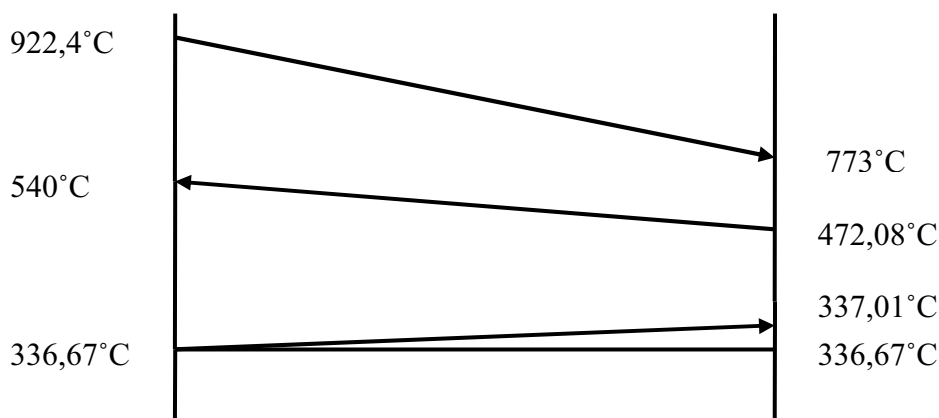
$$I_{sp2} = I_{sp1} - Q_C = 16976,73 - 244,55 = 16732,19 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (8.29)$$

Entalpii  $I_{sp2}$  odpovídá teplota  $t_{out} = 922,47^\circ\text{C}$ . Hodnota zjištěna interpolací z tab. 1.

## 9. Výpočet oblasti PIII

Výpočet je prováděn podle [1].

### 9.1 Teplotní spád v oblasti PIII



Obr.7 Grafické zobrazení teplotního spádu podle zapojení výměníků v oblasti PIII

### 9.2 Přehřívák III -výstupní

Teplota spalin: vstupní  $t_{in} = 922,4^\circ\text{C}$

volím výstupní  $t_{out} = 773^\circ\text{C}$

Výstupní teplotě spalin odpovídá entalpie  $I_{sp2} = 13780,32 \text{ kJ} / \text{m}^3$ , hodnota zjištěna interpolací z tab 1.

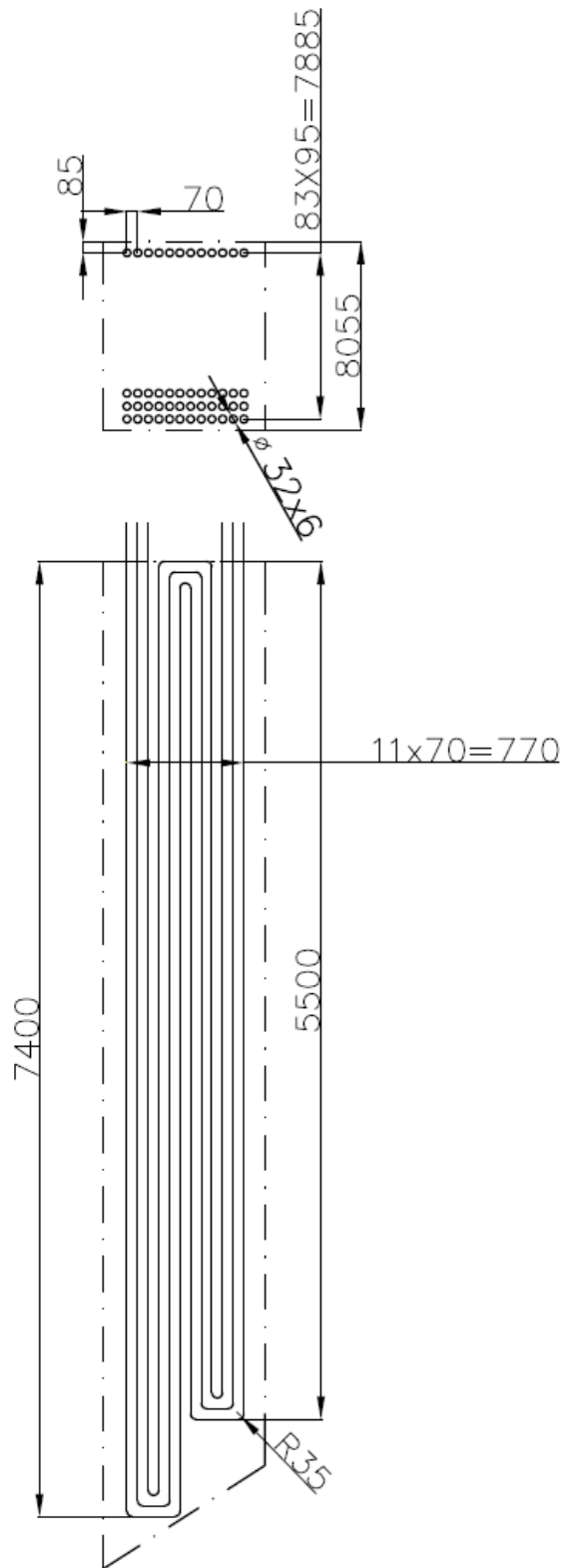
### Bilanční teplo předané na této ploše

$$Q_b = \varphi \cdot (I_{sp1} - I_{sp2}) = 0,994 \cdot (16732,19 - 13780,32) = 2934,28 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (9.0)$$

Rozměry přehříváku:

Vnější průměr trubek	$D=0,032\text{m}$
Tloušťka stěny	$s=0,006\text{m}$
Vnitřní průměr trubek	$d=0,02\text{m}$
Podélná rozteč	$s_2=0,7\text{m}$
Příčná rozteč	$s_1=0,095\text{m}$
Počet podélných řad	$z_2=4$
Počet příčných řad	$z_1=84$
Počet hadů	$x=3$
Střední délka hadů	$l=6,45\text{m}$

Přepočet kotle při dílčím výkonu



Obr.8 Schéma PIII

Příčná rozteč

$$\sigma_1 = s_1 / D = 0,095 / 0,032 = 2,97 \quad (9.1)$$

Podélná rozteč

$$\sigma_2 = s_2 / D = 0,07 / 0,032 = 2,19 \quad (9.2)$$

Světlý průřez kanálu

$$F = a \cdot h_{stř} - (a \cdot D + z_1 \cdot D \cdot l_{stř} + a \cdot D) \quad (9.3)$$

$$F = 8,055 \cdot 6,15 - (8,055 \cdot 0,038 + 84 \cdot 0,032 \cdot 6,45 + 8,055 \cdot 0,603) = 31,41 m^2$$

Ekvivalentní průměr kanálu

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 31,2}{1146,6} = 0,11 m \quad (9.4)$$

Střední teplota páry v PII

$$t_p = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{540 + 472,08}{2} = 506,04^\circ C \quad (9.5)$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = z_1 \cdot x \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 84 \cdot 3 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{4} \right) = 0,079 m^2 \quad (9.6)$$

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pIII} \cdot v_p}{F_p} = \frac{43,9 \cdot 0,0234}{0,079} = 13,15 m / s \quad (9.7)$$

Měrný objem páry pro střední tlak  $p=13,69$  Mpa a pro střední teplotu  $t_p=506,04^\circ C$  je

$$v_p = 0,0234 m^3 / kg, \text{ hodnota z [4].}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry**

Podélné proudění

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_m \cdot c_l \quad (9.8)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,08374}{0,02} \cdot \left( \frac{12,99 \cdot 0,0196}{3,03 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 1,014^{0,4} \cdot 1 = 135,7 W / m^2 K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu páry, hodnoty z [4]

$$Pr = 1,014$$

$$\lambda_p = 0,08374 W / mK$$

$$v_p = 3,03 \cdot 10^{-5} m^2 / s$$

Hodnoty opravných koeficientů

$c_t = 1$  pro ohřívání vody a páry podle [1]

$c_m$  se nezavádí podle [1]

$c_l$  se zavádí v případě  $l/d \leq 50$ ,  $\frac{l}{d} = \frac{6,45}{0,02} = 322,5 \Rightarrow c_l$  se nezavádí (9.9)

Střední teplota spalin

$$t_s = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{922,4 + 773}{2} = 847,7^\circ C \quad (9.10)$$

Rychlost proudění spalin v kanálu

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot t_{str} + 273}{F \cdot 273} \quad (9.11)$$

$$w_s = \frac{3,35 \cdot 12,03}{31,4} \cdot \frac{847,7 + 273}{273} = 5,26 m/s$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin**

Příčné obtékání trubek

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (9.12)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,9225 \cdot \frac{0,10023}{0,032} \cdot \left( \frac{5,26 \cdot 0,032}{1,445 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,618^{0,33} = 48,55 W / m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalin, hodnoty z [4]

$$Pr = 0,618$$

$$\lambda_s = 0,10023 W / mK$$

$$v_s = 1,445 \cdot 10^{-4} m^2 / s$$

Oprava na počet podélných řad

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

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (3 - 2) = 0,9225 \quad (9.13)$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči a poměrné podélné rozteči

$$\sigma_2 \geq 2 \Rightarrow c_s = 1$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)} \quad (9.14)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,134 \cdot (847,7 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{531,04 + 273,15}{847,7 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{531,04 + 273,15}{847,7 + 273,15} \right)} = 23,87 W / m^2 K$$

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left( \frac{4}{3,14} \cdot \frac{0,095 \cdot 0,07}{0,032^2} - 1 \right) = 0,209 m \quad (9.15)$$

**Objem části tříatomových plynů**

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,03} = 0,084 \quad (9.16)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18 \quad (9.17)$$

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,084 + 0,18 = 0,264 \quad (9.18)$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,2684 = 0,0264 MPa \quad (9.19)$$

**Součinitel zeslabení sálení nesvitivými tříatomovými plyny**

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(t_s + 273,15)}{1000} \right) \quad (9.20)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,0264 \cdot 0,209}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(847,7 + 273,15)}{1000} \right) = 26 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

**Optická hustota spalin**

$$k_{ps} = k_s \cdot r_{sp} \cdot p \cdot s = 26 \cdot 0,1 \cdot 0,264 \cdot 0,204 = 0,144 \quad (9.21)$$

**Stupeň černosti proudu spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,144} = 0,134 \quad (9.22)$$

**Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách**

$$t_z = t_p + \Delta t = 501,04 + 25 = 531,04^\circ C \quad (9.23)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s = 48,55 + 23,87 = 72,42 W / m^2 K \quad (9.24)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha \cdot \psi}{1 + \frac{\alpha}{\alpha_2}} = \frac{72,42 \cdot 0,85}{1 + \frac{72,42}{136,96}} = 40,27 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (9.25)$$

## Celková plocha PIII

$$S = \omega \cdot (\pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot l_{stř} \cdot x) = 0,95 \cdot (0,032 \cdot 4 \cdot 84 \cdot 6,45 \cdot 3) = 620,62 \text{ m}^2 \quad (9.26)$$

$\omega = 0,95$  součinitel omývání plochy [1]

## Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{382,4 - 300,9}{\ln \frac{382,4}{300,9}} = 340,42 \text{ K} \quad (9.27)$$

$$\Delta t_1 = 922,4 - 540 = 382,4 \text{ K} \quad (9.28)$$

$$\Delta t_2 = 773 - 472,08 = 300,9 \text{ K} \quad (9.29)$$

**Tepelný výkon přehříváku III**

$$Q = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{620,62 \cdot 40,27 \cdot 340,42}{1000} = 8506,8 \text{ kW} \quad (9.30)$$

Odchylka bilance navrženého a vypočteného výkonu na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_{pl} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{8488,89 - 8506,8}{8488,89} \cdot 100 = -0,21\% \quad (9.31)$$

Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$

**9.3 Stropní přehřívák**

Entalpii vstupní páry pro tlak  $p = 14 \text{ MPa}$  a teplotu  $t_{in} = 336,67^\circ \text{C}$  odpovídá z [4] hodnota

$$i_{in} = 2638,09 \text{ kJ / kg}$$

Voleno: Entalpii výstupní páry pro  $p = 13,985 \text{ MPa}$  a teplotu  $t_{out} = 337,01^\circ \text{C}$  odpovídá z [4]

$$\text{hodnota } i_{out} = 2643,2 \text{ kJ / kg}$$

Rozměry závěsných trubek:

Vnější průměr trubek	$D = 0,038 \text{ m}$
Tloušťka stěny	$s = 0,005 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubek	$d = 0,03 \text{ m}$
Podélná rozteč	$s_2 = 0,1 \text{ m}$ [5]
Příčná rozteč	$s_1 = 0,06 \text{ m}$
Délka trubek	$h = 2,25 \text{ m}$
Počet podélných řad	$z_2 = 1$
Počet příčných řad	$z_1 = 132$

Průřez pro páru

$$F_p = z_1 \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 132 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,028^2}{4} \right) = 0,081 m^2 \quad (9.32)$$

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pl} \cdot v_p}{F_p} = \frac{43,2 \cdot 0,0115}{0,081} = 6,14 m/s \quad (9.33)$$

Měrný objem páry pro střední tlak  $p=13,9925$  Mpa a pro střední teplotu  $t_p=336,84^\circ C$  je  $v_p=0,0115 m^3 / kg$ , podle [4].

### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

Podélné obtékání trubek

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (9.34)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,468}{0,028} \cdot \left( \frac{6,14 \cdot 0,028}{5,59 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 1,08^{0,4} = 244,42 W / m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu páry, hodnoty z [4]

$$Pr = 1,08$$

$$\lambda_p = 0,468 W / mK$$

$$v_p = 5,59 \cdot 10^{-5} m^2 / s$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin

Podélné obtékání trubek

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d_e}{v_s} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_m \cdot c_l \quad (9.35)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,10023}{0,11} \cdot \left( \frac{5,26 \cdot 0,11}{1,445 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,618^{0,4} = 13,16 W / m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalin, hodnoty z [4]

$$Pr = 0,618$$

$$\lambda_s = 0,10023 W / mK$$

$$v_s = 1,445 \cdot 10^{-4} m^2 / s$$

Hodnoty opravných koeficientů

$c_t = 1$  pro ohřívání vody a páry podle [1]

$c_m$  se nezavádí podle [1]

$c_l$  se zavádí v případě  $l/d \leq 50$ ,  $\frac{l}{d} = \frac{2,25}{0,03} = 75 \Rightarrow c_l$  se nezavádí (9.36)

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,134 \cdot (847,7 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{361,84 + 273,15}{847,7 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{361,84 + 273,15}{847,7 + 273,15} \right)} = 19,43 W / m^2 K$$

(9.37)

Efektivní tloušťka sálové vrstvy je totožná s hlavní plochou.

Objem části tříatomových plynů

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,03} = 0,084$$

(9.38)

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s \min}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18$$

(9.39)

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,084 + 0,18 = 0,264$$

(9.40)

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264 MPa$$

(9.41)

Součinitel zeslabení sálení nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(t_s + 273,15)}{1000} \right)$$

(9.42)

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,0264 \cdot 0,209}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(847,7 + 273,15)}{1000} \right) = 26 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

Optická hustota spalin

$$k_{ps} = k_s \cdot r_{sp} \cdot p \cdot s = 26 \cdot 0,1 \cdot 0,264 \cdot 0,204 = 0,144$$

(9.43)

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,144} = 0,134$$

(9.44)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p + \Delta t = 336,84 + 25 = 361,84^\circ\text{C} \quad (9.45)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin**

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s = 13,16 + 19,43 = 32,59 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K} \quad (9.46)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha \cdot \psi}{1 + \frac{\alpha}{\alpha_2}} = \frac{32,59 \cdot 0,85}{1 + \frac{32,59}{244,42}} = 24,44 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K} \quad (9.47)$$

Plocha stropního přehříváku

$$S = a \cdot h = 8,055 \cdot 2,25 = 18,12 \text{ m}^2 \quad (9.48)$$

Střední logaritmický teplotní spád pro souproudé proudění

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{585,39 - 436,33}{\ln \frac{585,39}{436,33}} = 507,78 \text{ K} \quad (9.49)$$

$$\Delta t_1 = 922,4 - 337,01 = 585,39 \text{ K} \quad (9.50)$$

$$\Delta t_2 = 773 - 336,67 = 436,33 \text{ K} \quad (9.51)$$

**Tepelný výkon stropního přehříváku**

$$Q_s = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{18,12 \cdot 24,44 \cdot 507,78}{1000} = 224,94 \text{ kW} \quad (9.52)$$

**Přepočet výstupní entalpie stropního přehříváku**

$$i_{out} = \frac{Q_s + M_{pl} \cdot i_{in}}{M_{pl}} = \frac{224,94 + 43,2 \cdot 2638,09}{43,2} = 2643,216 \text{ kJ} / \text{kg} \quad (9.53)$$

Této entalpii odpovídá teplota  $t_{out} = 337,023^\circ\text{C}$ , rozdíl mezi volenou a vypočítanou teplotou je  $\Delta t = -0,013^\circ\text{C}$ .

#### 9.4 Výpočet membránové stěny v oblasti PIII (vertikální směr)

Rozměry membránové stěny

Vnější průměr trubek	D=0,0603m
Tloušťka stěny	s=0,0063m
Vnitřní průměr trubek	d=0,0477m
Podélná rozteč	$s_2=0,08\text{m}$
Příčná rozteč	$s_1=0,01\text{m}$
Počet podélných řad	$z_2=28$
Počet příčných řad	$z_1=1$

Podélná rozteč

$$\sigma_2 = s_2 / D = 0,8 / 0,0603 = 1,33 \quad (9.54)$$

Příčná rozteč

$$\sigma_1 = s_1 / D = 0,01 / 0,0603 = 0,17 \quad (9.55)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalín**

Příčné obtékání trubek

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (9.56)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,10023}{0,0603} \cdot \left( \frac{5,26 \cdot 0,0603}{1,44 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,618^{0,33} = 42,16 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalín, hodnoty z [4]

$$\text{Pr} = 0,618$$

$$\lambda_s = 0,10023 \text{ W} / \text{mK}$$

$$v_s = 1,445 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

Oprava na počet podélných řad

$$z_2 > 10 \Rightarrow c_z = 1$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči a poměrné podélné rozteči

$$\sigma_1 \leq 1,5 \Rightarrow c_s = 1$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)} \quad (9.57)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,134 \cdot (847,7 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{361,84 + 273,15}{847,7 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{361,84 + 273,15}{847,7 + 273,15} \right)} = 19,42 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy je totožná s hlavní plochou.

Objem části tříatomových plynů

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,03} = 0,084 \quad (9.58)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18 \quad (9.59)$$

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,084 + 0,18 = 0,264 \quad (9.60)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264 \text{ MPa} \quad (9.61)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(t_s + 273,15)}{1000} \right) \quad (9.62)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,0264 \cdot 0,209}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(847,7 + 273,15)}{1000} \right) = 26 \frac{1}{m \cdot \text{MPa}}$$

Optická hustota spalin

$$k_{ps} = k_s \cdot r_{sp} \cdot p \cdot s = 26 \cdot 0,1 \cdot 0,264 \cdot 0,209 = 0,144 \quad (9.63)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,144} = 0,134 \quad (9.64)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách

$$t_z = t_{syt} + \Delta t = 336,67 + 25 = 361,67^\circ\text{C} \quad (9.65)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin**

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s = 42,16 + 19,42 = 61,6 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K} \quad (9.66)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \alpha \cdot \psi = 0,85 \cdot 61,6 = 52,34 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K} \quad (9.67)$$

Plocha membránové stěny

$$S = h \cdot c \cdot 2 = 6,15 \cdot 2,25 = 27,675 \text{ m}^2 \quad (9.68)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{585,73 - 436,33}{\ln \frac{585,73}{436,33}} = 507,94 \text{ K} \quad (9.69)$$

$$\Delta t_1 = 922 - 336,67 = 585,73 \text{ K} \quad (9.70)$$

$$\Delta t_2 = 773 - 336,67 = 436,33 \text{ K} \quad (9.71)$$

**Tepelný výkon membránové stěny**

$$Q_{ml} = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{27,675 \cdot 52,34 \cdot 507,94}{1000} = 735,81 \text{ kW} \quad (9.72)$$

**9.5 Výpočet membránové stěny v oblasti PIII (diagonální směr)**

Rozměry membránové stěny

Vnější průměr trubek	D=0,0603m
Tloušťka stěny	s=0,0063m
Vnitřní průměr trubek	d=0,0477m
Podélná rozteč	s <sub>2</sub> =0,1m
Příčná rozteč	s <sub>1</sub> =0,132m
Počet podélných řad	z <sub>2</sub> =1
Počet příčných řad	z <sub>1</sub> =63
Délka ležatých trubek	h=3,65m

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin**

Podélné obtékání trubek

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d_e}{v_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot c_t \cdot c_m \cdot c_l \quad (9.73)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,10023}{0,11} \cdot \left( \frac{5,26 \cdot 0,11}{1,445 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,618^{0,4} = 13,16 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalin, hodnoty z [4]

$$\text{Pr} = 0,618$$

$$\lambda_s = 0,10023 \text{ W} / \text{mK}$$

$$v_s = 1,445 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,134 \cdot (847,7 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{361,84 + 273,15}{847,7 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{361,84 + 273,15}{847,7 + 273,15} \right)} = 19,42 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K} \quad (9.74)$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy je totožná s hlavní plochou.

Objem části tříatomových plynů

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,03} = 0,084 \quad (9.75)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18 \quad (9.76)$$

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,084 + 0,18 = 0,264 \quad (9.77)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264 \text{ MPa} \quad (9.78)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(t_s + 273,15)}{1000} \right) \quad (9.79)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,0264 \cdot 0,209}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(847,7 + 273,15)}{1000} \right) = 26 \frac{1}{m \cdot \text{MPa}}$$

Optická hustota spalin

$$k_{ps} = k_s \cdot r_{sp} \cdot p \cdot s = 26 \cdot 0,1 \cdot 0,264 \cdot 0,204 = 0,144 \quad (9.80)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,144} = 0,134 \quad (9.81)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{syt} + \Delta t = 336,67 + 25 = 361,67^\circ\text{C} \quad (9.82)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin**

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s = 13,16 + 19,42 = 32,59 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K} \quad (9.83)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \alpha \cdot \psi = 0,85 \cdot 32,59 = 27,7 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K} \quad (9.84)$$

Plocha membránové stěny

$$S = a \cdot c = 8,055 \cdot 3,65 = 29,4 \text{ m}^2 \quad (9.85)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{585,73 - 436,33}{\ln \frac{585,73}{436,33}} = 507,94 \text{ K} \quad (9.86)$$

$$\Delta t_1 = 922 - 336,67 = 585,73 \text{ K} \quad (9.87)$$

$$\Delta t_2 = 773 - 333,67 = 436,33 \text{ K} \quad (9.88)$$

**Tepelný výkon membránové stěny**

$$Q_{mII} = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{29,4 \cdot 27,7 \cdot 507,94}{1000} = 413,64 \text{ kW} \quad (9.89)$$

**9.6 Celkové teplo odebrané v této části tahu**

$$Q_C = \frac{Q + Q_{mI} + Q_{mII} + Q_z}{M_{pv}} = \frac{8506,8 + 735,81 + 413,64 + 224,94}{3,35} = 2951,25 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (9.90)$$

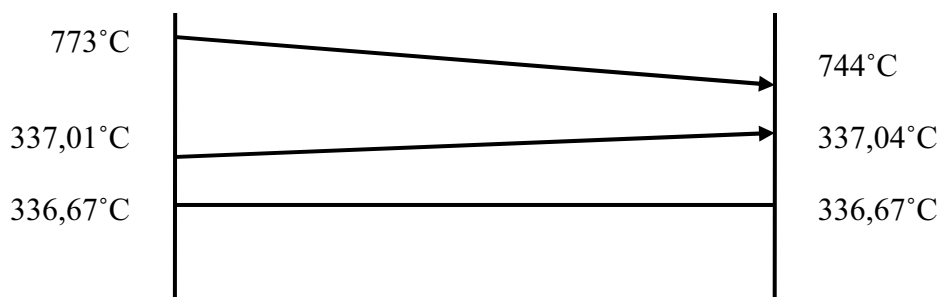
Bilanční odchylka na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{2934,28 - 2951,25}{2934,28} \cdot 100 = -0,58\% \quad (9.91)$$

Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$ .**Teplo výstupních spalin**

$$I_{sp1} = 16732,19 \text{ kJ} / \text{m}^3$$

$$I_{sp2} = I_{sp1} - Q_C = 16732,19 - 2951,25 = 13780,93 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (9.92)$$

Entalpii  $I_{sp2}$  odpovídá teplota  $t_{out} = 773,03^\circ\text{C}$ . Hodnota zjištěna interpolací z tab. 1.**10. Výpočet oblasti mříže****10.1 Teplotní spád v oblasti mříže**

Obr.9 Grafické zobrazení teplotního spádu v oblasti mříže

**10.2 Mříž mezi přehříváky (třířadá)**

Výpočet je prováděn podle [1].

Teplota spalin: vstupní  $t_{in} = 773^\circ\text{C}$ volím výstupní  $t_{out} = 744^\circ\text{C}$ Výstupní teplotě spalin odpovídá entalpie  $I_{sp2} = 13219,12 \text{ kJ} / \text{m}^3$ , hodnota zjištěna interpolací z tab 1.

**Bilanční teplo předané na této ploše**

$$Q_b = \varphi \cdot (I_{sp1} - I_{sp2}) = 0,994 \cdot (13780,93 - 13219,12) = 559,68 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (10.0)$$

Rozměry mříže (vystřídané uspořádání)

Vnější průměr trubek	D=0,0603m
Tloušťka stěny	s=0,0063m
Vnitřní průměr trubek	d=0,0477m
Podélná rozteč	s <sub>2</sub> =0,25m
Příčná rozteč	s <sub>1</sub> =0,32m
Výška membránové stěny	h=4,25m
Počet podélných řad	z <sub>2</sub> =3
Počet příčných řad	z <sub>1</sub> =21



Obr.10 Schéma mříže

Podélná rozteč

$$\sigma_2 = s_2 / D = 0,25 / 0,0603 = 4,15 \quad (10.1)$$

Příčná rozteč

$$\sigma_1 = s_1 / D = 0,32 / 0,0603 = 5,31 \quad (10.2)$$

Střední teplota spalin

$$t_s = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{773 + 744}{2} = 758,5^\circ\text{C} \quad (10.3)$$

Rychlost proudění spalin v kanále

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot t_{str} + 273}{F \cdot 273} \quad (10.4)$$

$$w_s = \frac{3,35 \cdot 12,03}{27,68} \cdot \frac{758,5 + 273}{273} = 5,5 \text{ m} / \text{s}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalín**

Vystřídané uspořádání trubek

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (10.5)$$

$$\alpha_k = 0,889 \cdot 0,343 \cdot \frac{0,09208}{0,0603} \cdot \left( \frac{5,5 \cdot 0,0603}{1,25 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,6} \cdot 0,63^{0,33} = 45,03 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalín, hodnoty z [4]

$$\text{Pr} = 0,63$$

$$\lambda_s = 0,09208 \text{ W} / \text{mK}$$

$$v_s = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

Oprava na počet podélných řad

$$c_z = 4 \cdot z_2^{0,02} - 3,2 = 4 \cdot 3^{0,02} - 3,2 = 0,889 \quad (10.6)$$

Oprava na uspořádání svazku podle poměrné příčné rozteče a podle  $\varphi_\sigma$ 

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 5,31^2 + 4,15^2} = 4,92 \quad (10.7)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2 - 1} = \frac{5,31 - 1}{4,92 - 1} = 1,1 \quad (10.8)$$

Pro hodnoty  $0,1 < \varphi_\sigma \leq 1,7$ 

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1,1^{0,1} = 0,343 \quad (10.9)$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,32 \cdot (758,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{361,67 + 273,15}{758,5 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{361,67 + 273,15}{758,5 + 273,15} \right)} = 38,8 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K} \quad (10.10)$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,25 \cdot 0,32}{0,0603^2} - 1 \right) = 1,47m \quad (10.11)$$

Objem části tříatomových plynů

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,03} = 0,084 \quad (10.12)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s \text{ min}}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18 \quad (10.13)$$

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,084 + 0,18 = 0,264 \quad (10.14)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264MPa \quad (10.15)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítvivými tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(t_s + 273,15)}{1000} \right) \quad (10.16)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,0264 \cdot 1,47}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(758,5 + 273,15)}{1000} \right) = 10 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

Optická hustota spalin

$$kps = k_s \cdot r_{sp} \cdot p \cdot s = 10 \cdot 0,1 \cdot 0,264 \cdot 1,47 = 0,387 \quad (10.17)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,387} = 0,32 \quad (10.18)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{syt} + \Delta t = 336,67 + 25 = 361,67^\circ C \quad (10.19)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin**

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s = 45,03 + 38,8 = 83,84W / m^2 K \quad (10.20)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \alpha \cdot \psi = 0,85 \cdot 83,84 = 71,26W / m^2 K \quad (10.21)$$

Celková plocha mříže

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot h = \pi \cdot 0,0603 \cdot 4,25 \cdot 3 \cdot 25 = 60,35m^2 \quad (10.22)$$

Střední logaritmičkový teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{436,33 - 407,33}{\ln \frac{436,33}{407,33}} = 422,14^\circ C \quad (10.23)$$

$$\Delta t_1 = 773 - 336,67 = 436,33K \quad (10.24)$$

$$\Delta t_2 = 744 - 336,67 = 407,33^\circ C \quad (10.25)$$

### Tepelný výkon mříže

$$Q_{mříže} = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{60,35 \cdot 70,26 \cdot 422,14}{1000} = 1815,54kW \quad (10.26)$$

### 10.3 Stropní přehřívák

Entalpie vstupní páry pro tlak  $p = 13,985\text{MPa}$  a teplotu  $t_{in} = 337,01^\circ\text{C}$  odpovídá z [4] hodnota  $i_{in} = 2643,2\text{kJ} / \text{kg}$ .

Voleno:

Entalpie výstupní páry pro tlak  $p = 13,97\text{MPa}$  a teplotu  $t_{out} = 337,04^\circ\text{C}$  odpovídá z [4] hodnota  $i_{out} = 2644,83\text{kJ} / \text{kg}$ .

Rozměry stropního přehříváku

Vnější průměr trubek	$D=0,038\text{m}$
Tloušťka stěny	$s=0,005\text{m}$
Vnitřní průměr trubek	$d=0,028\text{m}$
Podélná rozteč	$s_2=0,1\text{m}$
Příčná rozteč	$s_1=0,06\text{m}$
Počet podélných řad	$z_2=1$
Počet příčných řad	$z_1=132$
Délka trubek	$h=0,55\text{m}$

Světlý průřez kanálu

$$F = a \cdot h - D \cdot z_1 \cdot h - z_1 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (10.27)$$

$$F = 8,055 \cdot 4,25 - 0,0603 \cdot 25 \cdot 4,25 - 132 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} = 27,68\text{m}^2$$

Obvod kanálu

$$O = 2 \cdot (a + h) + 2 \cdot z_1 \cdot h + D \cdot z_1 \cdot \pi \quad (10.28)$$

$$O = 2 \cdot (8,055 + 4,25) + 2 \cdot 25 \cdot 4,25 + 0,038 \cdot 132 \cdot 3,14 = 252,86\text{m}$$

Ekvivalentní průměr kanálu

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 27,68}{252,86} = 0,44 \quad (10.29)$$

Průřez pro páru

$$F_p = z_1 \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 132 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,028^2}{4} \right) = 0,081 m^2 \quad (10.30)$$

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pl} \cdot v_p}{F_p} = \frac{43,2 \cdot 0,0116}{0,081} = 6,17 m/s \quad (10.31)$$

Měrný objem páry pro střední tlak  $p = 13,9775 \text{ MPa}$  a pro střední teplotu  $t_p = 337,025^\circ \text{C}$  je  $v_p = 0,0116 m^3 / kg$ , hodnota z [4].

### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

Podélné obtékání trubek

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{v_p} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (10.32)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,469}{0,028} \cdot \left( \frac{6,17 \cdot 0,028}{5,57 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 1,08^{0,4} = 246,94 W / m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu páry, hodnoty z [4]

$$\text{Pr} = 1,08$$

$$\lambda = 0,469 W / m^2 K$$

$$v_s = 5,57 \cdot 10^{-5} m^2 / s$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin

Podélné obtékání trubek

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d_e}{v_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (10.33)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,09208}{0,44} \cdot \left( \frac{5,47 \cdot 0,44}{1,25 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,63^{0,4} = 10,68 W / m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti spalin pro střední teplotu, hodnoty z [4]

$$\text{Pr} = 0,63$$

$$\lambda_s = 0,09208 W / mK$$

$$v_s = 1,25 \cdot 10^{-4} m^2 / s$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,32 \cdot (758,5 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{362,025 + 273,15}{758,5 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{362,025 + 273,15}{758,5 + 273,15} \right)} = 38,8 W / m^2 K$$
(10.34)

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy je totožná s hlavní plochou.

**Objem části tříatomových plynů**

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,03} = 0,084$$
(10.35)

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s \min}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18$$
(10.36)

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,084 + 0,18 = 0,264$$
(10.37)

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264 MPa$$
(10.38)

**Součinitel zeslabení sálaní nesevítivými tříatomovými plyny**

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(t_s + 273,15)}{1000} \right)$$
(10.39)

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,0264 \cdot 1,47}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(758,5 + 273,15)}{1000} \right) = 10 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

**Optická hustota spalín**

$$kps = k_s \cdot r_{sp} \cdot p \cdot s = 10 \cdot 0,1 \cdot 0,264 \cdot 1,47 = 0,387$$
(10.40)

**Stupeň černosti proudu spalín**

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,387} = 0,32$$
(10.41)

**Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách**

$$t_z = t_p + \Delta t = 337,02 + 25 = 362,02^\circ C$$
(10.42)

**Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín**

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s = 10,68 + 38,8 = 49,5 W / m^2 K$$
(10.43)

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha \cdot \psi}{1 + \frac{\alpha}{\alpha_2}} = \frac{49,5 \cdot 0,85}{1 + \frac{49,5}{246,97}} = 35,05 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad (10.44)$$

Plocha stropního přehříváku

$$S = a \cdot h = 8,055 \cdot 0,55 = 4,43 \text{ m}^2 \quad (10.45)$$

Střední logaritmický teplotní spád pro souproudé proudění

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{435,96 - 406,99}{\ln \frac{435,96}{406,99}} = 421,78 \text{ K} \quad (10.46)$$

$$\Delta t_1 = 773 - 337,04 = 435,96 \text{ K} \quad (10.47)$$

$$\Delta t_2 = 744 - 337,01 = 406,99 \text{ K} \quad (10.48)$$

**Tepelný výkon stropního přehříváku**

$$Q_s = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{4,43 \cdot 35,05 \cdot 421,78}{1000} = 65,50 \text{ kW} \quad (10.49)$$

**Přepočet výstupní entalpie stropního přehříváku**

$$i_{out} = \frac{Q_s + M_{pl} \cdot i_m}{M_{pl}} = \frac{65,5 + 43,2 \cdot 2643,2}{1000} = 2644,72 \text{ kJ / kg} \quad (10.50)$$

Této entalpii odpovídá teplota  $t_{out} = 337,042^\circ\text{C}$ , rozdíl mezi volenou a vypočítanou teplotou je  $\Delta t = 0,0022^\circ\text{C}$ .

**10.4 Celkové teplo odebrané v této části tahu**

$$Q_C = \frac{Q_{mříže} + Q_s}{M_{pv}} = \frac{1815,54 + 65,5}{3,35} = 561,82 \text{ kJ / m}^3 \quad (10.51)$$

Bilanční odchylka na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{559,68 - 561,82}{559,68} \cdot 100 = -0,38\% \quad (10.52)$$

Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$ .**Teplo výstupních spalín**

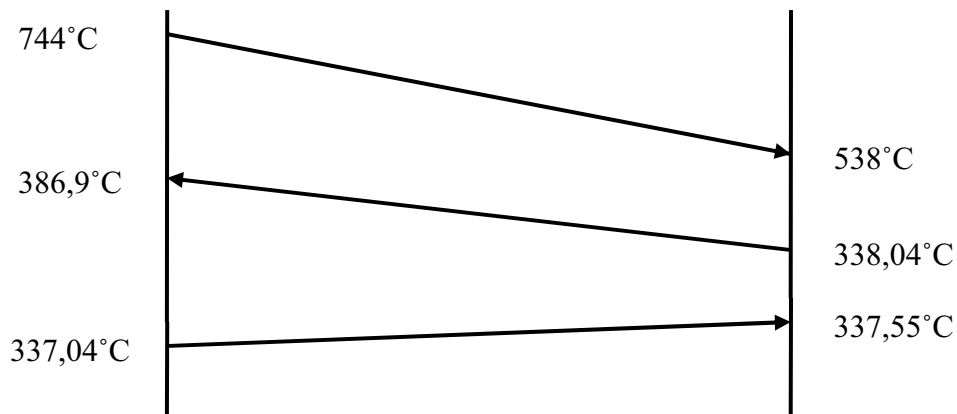
$$I_{sp1} = 13780,93 \text{ kJ / m}^3$$

$$I_{sp2} = I_{sp1} - Q_C = 13780,93 - 561,82 = 13219,12 \text{ kJ / m}^3 \quad (10.53)$$

Entalpii  $I_{sp2}$  odpovídá teplota  $t_{out} = 744,06^\circ\text{C}$ . Hodnota zjištěna interpolací z tab. 1.

## 11. Výpočet oblasti PI

### 11.1 Teplotní spád v oblasti PI



Obr.11 Grafické zobrazení teplotního spádu podle zapojení výměníků v oblasti PI

### 11.2 Přehřívák I

Výpočet je prováděn podle [1].

Teplota spalin: vstupní  $t_{in} = 744^{\circ}\text{C}$

volím výstupní  $t_{out} = 538^{\circ}\text{C}$

Výstupní teplotě spalin odpovídá entalpie  $I_{sp2} = 9320,87\text{kJ} / \text{m}^3$ , hodnota zjištěna interpolací z tab 1.

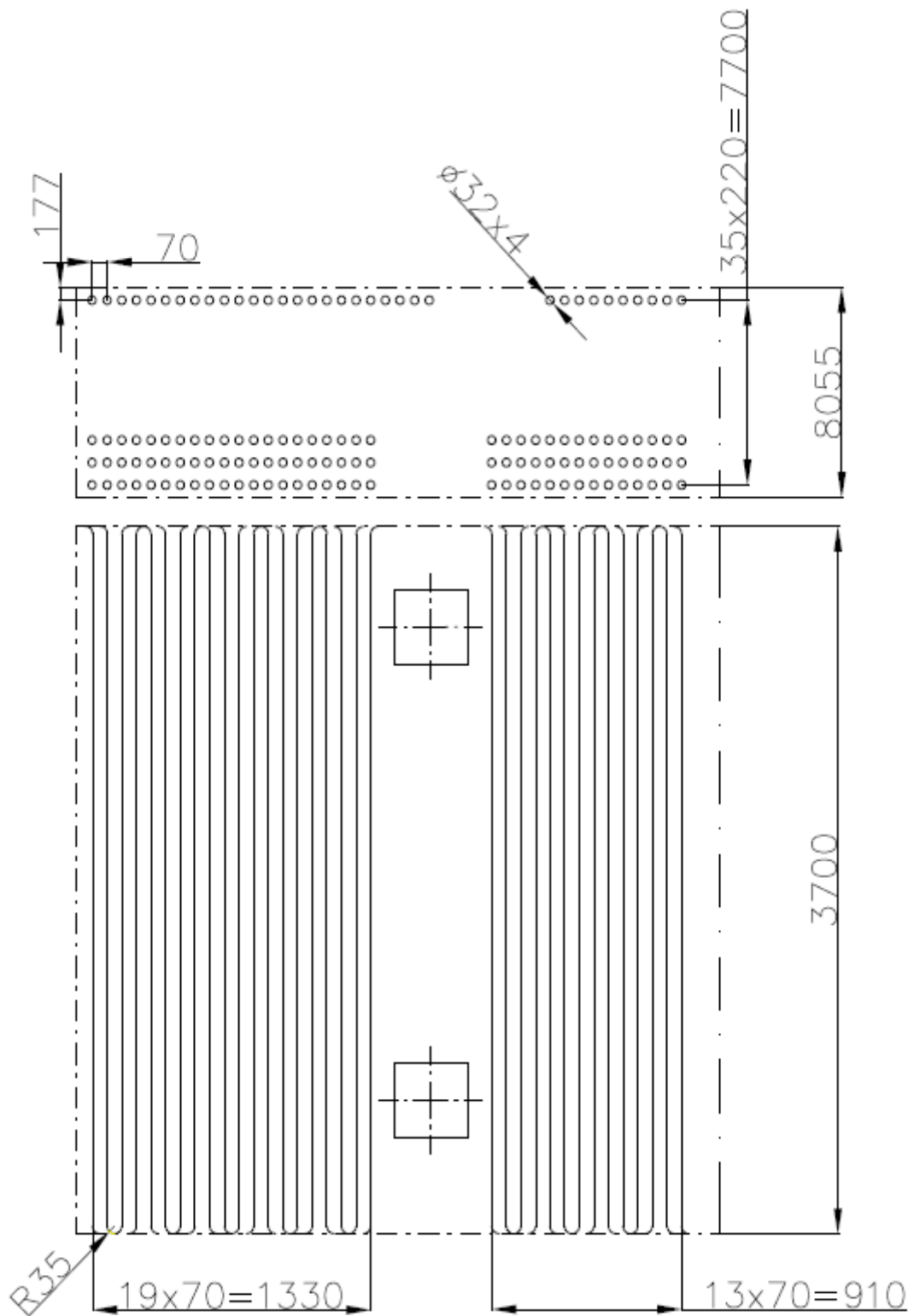
#### Bilanční teplo předané na této ploše

$$Q_b = \varphi \cdot (I_{sp1} - I_{sp2}) = 0,994 \cdot (13219,12 - 9320,87) = 3875,028\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (11.0)$$

#### Rozměry přehříváku

Vnější průměr trubek	$D=0,032\text{m}$
Tloušťka stěny	$s=0,004\text{m}$
Vnitřní průměr trubek	$d=0,024\text{m}$
Podélná rozteč	$s_2=0,07\text{m}$
Příčná rozteč	$s_1=0,22\text{m}$
Počet podélných řad	$z_2=34$
Počet příčných řad	$z_1=36$
Počet hadů	$x=2$
Délka hada	$l=3,7\text{m}$

## Přepočet kotle při dílčím výkonu



Obr.12 Schéma PI

## Přepočít kotle při dílčím výkonu

Podélná rozteč

$$\sigma_2 = s_2 / D = 0,07 / 0,032 = 2,1875 \quad (11.1)$$

Příčná rozteč

$$\sigma_1 = s_1 / D = 0,22 / 0,032 = 6,875 \quad (11.2)$$

Střední teplota páry

$$t_p = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{386,9 + 337,98}{2} = 362,45^\circ C \quad (11.3)$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = z_1 \cdot x \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 34 \cdot 2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 0,024^2}{4} \right) = 0,0325 m^2 \quad (11.4)$$

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pl} \cdot v_p}{F_p} = \frac{40,9 \cdot 0,0146}{0,0325} = 19,45 m/s \quad (11.5)$$

Měrný objem páry pro střední tlak  $p = 13,89 \text{ Mpa}$  a pro střední teplotu  $t_p = 362,45^\circ C$  je

$$v_p = 0,0146 m^3 / kg, \text{ hodnota z [4].}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry**

Příčné proudění

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_m \cdot c_t \cdot c_l \quad (11.6)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,185}{0,024} \cdot \left( \frac{19,45 \cdot 0,024}{3,87 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot 1 = 368,4 W / m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu páry, hodnoty z [4]

$$Pr = 1,358$$

$$\lambda_p = 0,185 W / mK$$

$$v_p = 3,88 \cdot 10^{-5} m^2 / s$$

Hodnoty opravných koeficientů

$$c_t = 1 \text{ pro ohřívání vody a páry podle [1]}$$

$$c_m \text{ se nezavádí podle [1]}$$

$$c_l \text{ se zavádí v případě } l/d \leq 50, \frac{l}{d} = \frac{3,7}{0,024} = 154,17 \Rightarrow c_l \text{ se nezavádí} \quad (11.7)$$

Střední teplota spalin

$$t_s = \frac{t_m + t_{out}}{2} = \frac{744 + 538}{2} = 641^\circ C \quad (11.8)$$

Rychlost proudění spalin v kanálu

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot t_{str} + 273}{F} \quad (11.9)$$

$$w_s = \frac{3,35 \cdot 12,03 \cdot 641 + 273}{27,81} = 4,85 m/s$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin**

Příčné obtékání trubek

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (11.10)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,08114}{0,032} \cdot \left( \frac{4,85 \cdot 0,032}{1,02 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,638^{0,33} = 50,99 W / m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalin, hodnoty z [4]

$$Pr = 0,638$$

$$\lambda_s = 0,08114 W / mK$$

$$v_s = 1,02 \cdot 10^{-4} m^2 / s$$

Oprava na počet podélných řad

$$z_2 > 10 \Rightarrow c_z = 1$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči a poměrné podélné rozteči

$$\sigma_2 \geq 2 \Rightarrow c_s = 1$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,224 \cdot (641 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{387,48 + 273,15}{641 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{387,45 + 273,15}{641 + 273,15} \right)} = 21,8 W / m^2 K \quad (11.11)$$

## Přepoččet kotle při dílčím výkonu

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,22 \cdot 0,07}{0,032^2} - 1 \right) = 0,523m \quad (11.12)$$

Objem části tříatomových plynů

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,03} = 0,084 \quad (11.13)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s \min}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18 \quad (11.14)$$

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,084 + 0,18 = 0,264 \quad (11.15)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264MPa \quad (11.16)$$

Součinitel zeslabení sálaní nesvítvivými tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(t_s + 273,15)}{1000} \right) \quad (11.17)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,0264 \cdot 0,523}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(641 + 273,15)}{1000} \right) = 18,4 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

Optická hustota spalin

$$kps = k_s \cdot r_{sp} \cdot p \cdot s = 18,4 \cdot 0,1 \cdot 0,264 \cdot 0,523 = 0,253 \quad (11.18)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,253} = 0,224 \quad (11.19)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p + \Delta t = 362,48 + 25 = 387,48^\circ C \quad (11.20)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin**

Příčné obtékání

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s = 50,99 + 21,8 = 72,8W / m^2 K \quad (11.21)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha \cdot \psi}{1 + \frac{\alpha}{\alpha_2}} = \frac{72,8 \cdot 0,85}{1 + \frac{72,8}{368,4}} = 51,7W / m^2 K \quad (11.22)$$

Celková plocha PI

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot l \cdot x = 3,14 \cdot 0,032 \cdot 34 \cdot 36 \cdot 3,7 \cdot 2 = 910,11m^2 \quad (11.23)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{357,08 - 199,94}{\ln \frac{357,08}{199,94}} = 271,27 K \quad (11.24)$$

$$\Delta t_1 = 744 - 386,91 = 357,08 K \quad (11.25)$$

$$\Delta t_2 = 538 - 338,06 = 199,94 K \quad (11.26)$$

**Tepelný výkon PI**

$$Q = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{963,64 \cdot 51,7 \cdot 271,27}{1000} = 12756,22 kW \quad (11.27)$$

Odchylka bilance navrženého a vypočteného výkonu na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_{pl} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{12786,31 - 12756,22}{12786,31} \cdot 100 = 0,24\% \quad (11.28)$$

Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$ **11.3 Stropní přehřívák**

Entalpie vstupní páry pro tlak  $p = 13,97 \text{ MPa}$  a teplotu  $t_{in} = 337,04^\circ \text{C}$  odpovídá z [4] hodnota  $i_{in} = 2644,83 \text{ kJ} / \text{kg}$ .

Voleno:

Entalpie výstupní páry pro tlak  $p = 13,955 \text{ MPa}$  a teplotu  $t_{out} = 337,55^\circ \text{C}$  odpovídá z [4] hodnota  $i_{out} = 2651,55 \text{ kJ} / \text{kg}$ .

Rozměry stropního přehříváku

Vnější průměr trubek	$D = 0,038 \text{ m}$
Tloušťka stěny	$s = 0,005 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubek	$d = 0,028 \text{ m}$
Podélná rozteč	$s_2 = 0,1 \text{ m}$
Příčná rozteč	$s_1 = 0,06 \text{ m}$
Počet podélných řad	$z_2 = 1$
Počet příčných řad	$z_1 = 132$
Délka trubek	$h = 5,1 \text{ m}$

Světlý průřez kanálu

$$F = a \cdot b - D \cdot z_1 \cdot h - z_1 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (11.29)$$

$$F = 8,055 \cdot 4 - 0,032 \cdot 36 \cdot 3,7 - 132 \cdot \frac{\pi \cdot 0,038^2}{4} = 27,81 \text{ m}^2$$

Obvod kanálu

$$O = a \cdot h + 2 \cdot z_1 \cdot (l + D) + \pi \cdot D \cdot z_1 \quad (11.30)$$

$$O = 8,055 \cdot 4 + 2 \cdot 36 \cdot (3,7 + 0,032) + 3,14 \cdot 0,038 \cdot 132 = 316,72m$$

Ekvivalentní průměr kanálu

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 27,81}{316,72} = 0,351m \quad (11.31)$$

Průřez pro páru

$$F_p = z_1 \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 132 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,028^2}{4} \right) = 0,081m^2 \quad (11.32)$$

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pl} \cdot v_p}{F_p} = \frac{43,2 \cdot 0,0117}{0,081} = 6,21m/s \quad (11.33)$$

Měrný objem páry pro střední tlak  $p = 13,963\text{Mpa}$  a pro střední teplotu  $t_p = 337,295^\circ\text{C}$  je

$$v_p = 0,0117m^3/kg, \text{ hodnota z [4].}$$

Střední teplota páry

$$t_p = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{337,04 + 337,55}{2} = 337,295^\circ\text{C} \quad (11.34)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry**

Podélné obtékání trubek

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{v_p} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (11.35)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,47}{0,028} \cdot \left( \frac{6,21 \cdot 0,028}{5,53 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 1,08^{0,4} = 250,23W/m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu páry, hodnoty z [4]

$$\text{Pr} = 1,08$$

$$\lambda_p = 0,47W/mK$$

$$v_p = 5,53 \cdot 10^{-5}m^2/s$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin**

Podélné obtékání trubek

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d_e} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d_e}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (11.36)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,08114}{0,351} \cdot \left( \frac{4,85 \cdot 0,351}{1,02 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,638^{0,4} = 10,55 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalin, hodnoty z [4]

$$\text{Pr} = 0,638$$

$$\lambda_s = 0,08114 \text{ W} / \text{mK}$$

$$\nu_s = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,224 \cdot (641 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{362,295 + 273,15}{641 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{362,295 + 273,15}{641 + 273,15} \right)} = 21 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K} \quad (11.37)$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy je totožná s hlavní plochou

Objem části tříatomových plynů

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,03} = 0,084 \quad (11.38)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18 \quad (11.39)$$

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,084 + 0,18 = 0,264 \quad (11.40)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264 \text{ MPa} \quad (11.41)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(t_s + 273,15)}{1000} \right) \quad (11.42)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,0264 \cdot 0,523}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(641 + 273,15)}{1000} \right) = 18,36 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

Optická hustota spalin

$$kps = k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s = 18,36 \cdot 0,1 \cdot 0,2684 \cdot 0,523 = 0,253 \quad (11.43)$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,253} = 0,224 \quad (11.44)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách na straně spalin

$$t_z = t_p + \Delta t = 337,295 + 25 = 362,295^\circ C \quad (11.45)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin**

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s = 10,55 + 21 = 31,56 W / m^2 K \quad (11.46)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha \cdot \psi}{1 + \frac{\alpha}{\alpha_2}} = \frac{31,56 \cdot 0,85}{1 + \frac{31,56}{250,23}} = 23,82 W / m^2 K \quad (11.47)$$

Plocha stropního přehříváku

$$S = a \cdot h = 8,055 \cdot 5,1 = 41,08 m^2 \quad (11.48)$$

Střední logaritmický teplotní spád pro souproude proudění

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{406,45 - 200,96}{\ln \frac{406,45}{200,96}} = 292,07 K \quad (11.49)$$

$$\Delta t_1 = 744 - 337,55 = 406,45 K \quad (11.50)$$

$$\Delta t_2 = 538 - 337,04 = 200,96 K \quad (11.51)$$

**Tepelný výkon stropního přehříváku**

$$Q_{st} = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{41,08 \cdot 23,82 \cdot 292,07}{1000} = 285,84 kW \quad (11.52)$$

**Přepočet výstupní entalpie stropního přehříváku**

$$i_2 = \frac{Q_{st} + M_{pl} \cdot i_1}{M_{pl}} = \frac{285,84 + 43,2 \cdot 2644,83}{43,2} = 2651,44 kJ / kg \quad (11.53)$$

Této entalpii odpovídá teplota  $t_{out} = 337,556^\circ C$ , rozdíl mezi volenou a vypočítanou teplotou je  $\Delta t = 0,006^\circ C$ .

**11.4 Celkové teplo odebrané v této části tahu**

$$Q_C = \frac{Q_{pl} + Q_{zl}}{M_{pv}} = \frac{12756,22 + 285,84}{3,35} = 3895,32 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (11.54)$$

Bilanční odchylka na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{3875,028 - 3895,32}{3875,028} \cdot 100 = -0,52\% \quad (11.55)$$

Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$ .

**Teplo výstupních spalin**

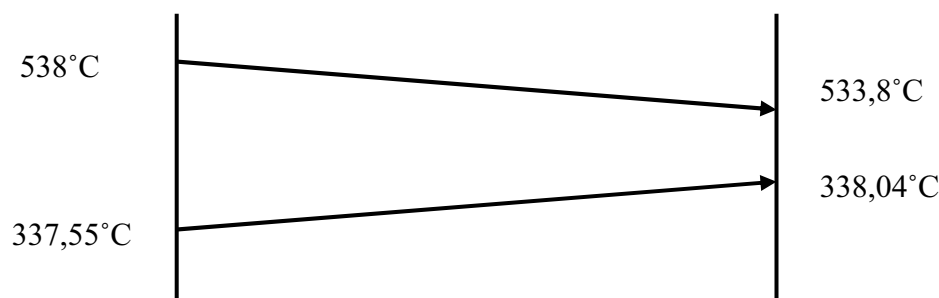
$$I_{sp1} = 13219,12 \text{ kJ} / \text{m}^3$$

$$I_{sp2} = I_{sp1} - Q_C = 13219,12 - 3895,32 = 9323,8 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (11.56)$$

Entalpii  $I_{sp2}$  odpovídá teplota  $t_{out} = 538,16^\circ\text{C}$ . Hodnota zjištěna interpolací z tab. 1.

**12. Obratová komora**

Výpočet je prováděn podle [1].

**12.1 Teplotní spád v obratové komoře**

Obr.13 Grafické zobrazení teplotního spádu v obratové komoře

Teplota spalin vstupní  $t_{in} = 538^\circ\text{C}$   
volím výstupní  $t_{out} = 533,8^\circ\text{C}$

Výstupní teplotě spalin odpovídá entalpie  $I_{sp2} = 9243,76 \text{ kJ} / \text{m}^3$ , hodnota zjištěna interpolací z tab 1.

**Bilanční teplo předané na této ploše**

$$Q_b = \varphi \cdot (I_{sp1} - I_{sp2}) = 0,994 \cdot (9323,8 - 9243,76) = 79,55 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (12.0)$$

Entalpie vstupní páry pro tlak  $p = 13,955 \text{ MPa}$  a teplotu  $t_{in} = 337,55^\circ\text{C}$  odpovídá z [4] hodnota  $i_{in} = 2651,55 \text{ kJ} / \text{kg}$ .

Voleno:

Entalpie výstupní páry pro tlak  $p = 13,94 \text{ MPa}$  a teplotu  $t_{out} = 338,04^\circ\text{C}$  odpovídá z [4] hodnota  $i_{out} = 2657,84 \text{ kJ} / \text{kg}$ .

Rozměry stropního přehříváku:

Vnější průměr trubek	$D = 0,038 \text{ m}$
Tloušťka stěny	$s = 0,005 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubek	$d = 0,028 \text{ m}$
Podélná rozteč	$s_2 = 0,1 \text{ m}$
Příčná rozteč	$s_1 = 0,06 \text{ m}$
Počet podélných řad	$z_2 = 1$
Počet příčných řad	$z_1 = 132$
Výška membránové stěny	$h = 7 \text{ m}$
Hloubka prostoru	$a = 8,055 \text{ m}$
Výstupní šířka	$b = 4,15 \text{ m}$

Světlý průřez pro spaliny (vstup)

$$F_1 = a \cdot h - D \cdot a = 8,055 \cdot 4 - 0,038 \cdot 8,055 = 31,91 \text{ m}^2 \quad (12.1)$$

Světlý průřez pro spaliny (výstup)

$$F_2 = a \cdot d - D \cdot a = 8,055 \cdot 3,75 - 0,038 \cdot 8,055 = 29,9 \text{ m}^2 \quad (12.2)$$

Střední hodnota světlého průřezu kanálu

$$F = \frac{F_1 + F_2}{2} = \frac{31,91 + 29,9}{2} = 30,91 \text{ m}^2 \quad (12.3)$$

Střední teplota páry

$$t_p = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{337,55 + 338,04}{2} = 337,795^\circ\text{C} \quad (12.4)$$

Průřez pro páru

$$F_p = z_1 \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 132 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,028^2}{4} \right) = 0,081 \text{ m}^2 \quad (12.5)$$

Rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pl} \cdot v_p}{F_p} = \frac{43,2 \cdot 0,0118}{0,081} = 6,27 \text{ m} / \text{s} \quad (12.6)$$

Měrný objem páry pro střední tlak  $p = 13,9475 \text{ MPa}$  a pro střední teplotu  $t_p = 337,795^\circ\text{C}$  je

$v_p = 0,0118 \text{ m}^3 / \text{kg}$ , hodnota z [4].

Látkové vlastnosti pro střední teplotu páry, hodnoty z [4]

$$\text{Pr} = 1,08$$

$$\lambda_p = 0,0474 \text{ W / mK}$$

$$\nu_p = 5 \cdot 48^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

Podélné proudění

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (12.7)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,474}{0,028} \cdot \left( \frac{3,267 \cdot 0,028}{5,48 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 1,08^{0,4} = 256,13 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

Střední teplota spalin

$$t_s = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{538 + 533,8}{2} = 535,9^\circ \text{C} \quad (12.8)$$

Rychlost proudění spalin v kanále

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot t_{str} + 273}{F \cdot 273} \quad (12.9)$$

$$w_s = \frac{3,35 \cdot 12,03 \cdot 535,9 + 273}{30,91 \cdot 273} = 3,86 \text{ m / s}$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (t_s + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{t_z + 273,15}{t_s + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 2,46 \cdot (535,9 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{362,795 + 273,15}{535,9 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{362,795 + 273,15}{535,9 + 273,15} \right)} = 31,47 \text{ W / m}^2 \text{K} \quad (12.10)$$

$$S = 136,56 \text{ m}^2$$

$$V = 93,49 \text{ m}^3$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S} = 3,6 \cdot \frac{93,49}{136,56} = 2,46 \text{ m} \quad (12.11)$$

Objem části tříatomových plynů

$$r_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}^s + O_{SO_2}^s}{O_{sp}} = \frac{1,018 + 0}{12,03} = 0,084 \quad (12.12)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^s \min}{O_{sp}} = \frac{2,158}{12,03} = 0,18 \quad (12.13)$$

$$r_{sp} = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,086 + 0,18 = 0,264 \quad (12.14)$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_s = p \cdot r_s = 0,1 \cdot 0,264 = 0,0264 \text{ MPa} \quad (12.15)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítvivými tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(t_s + 273,15)}{1000} \right) \quad (12.16)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,026 \cdot 2,46}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \frac{(535,9 + 273,15)}{1000} \right) = 8,57 \frac{1}{m \cdot \text{MPa}}$$

Optická hustota spalín

$$k_{ps} = k_s \cdot r_{sp} \cdot p \cdot s = 8,57 \cdot 0,1 \cdot 0,264 \cdot 2,46 = 0,56 \quad (12.17)$$

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k_{ps}} = 1 - e^{-0,56} = 0,43 \quad (12.18)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p + \Delta t = 337,795 + 25 = 362,795^\circ \text{C} \quad (12.19)$$

**Celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalín**

$$\alpha = \alpha_s = 31,47 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K} \quad (12.20)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha \cdot \psi}{1 + \frac{\alpha}{\alpha_2}} = \frac{31,47 \cdot 0,85}{1 + \frac{31,47}{256,13}} = 23,82 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K} \quad (12.21)$$

Plocha stropního přehříváku

$$S = a \cdot h = 8,055 \cdot 7 = 56,385 \text{ m}^2 \quad (12.22)$$

Střední logaritmický teplotní spád pro souproude proudění

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{199,96 - 196,25}{\ln \frac{199,96}{196,25}} = 198,32 \text{ K} \quad (12.23)$$

$$\Delta t_1 = 538 - 338,04 = 199,96 \text{ K} \quad (12.24)$$

$$\Delta t_2 = 533,8 - 337,55 = 196,25 \text{ K} \quad (12.25)$$

Tepelný výkon stropního přehříváku

$$Q_{zll} = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{56,385 \cdot 23,82 \cdot 198,32}{1000} = 266,45 \text{ kW} \quad (12.26)$$

**Přepočet výstupní entalpie**

$$i_2 = \frac{Q_{zll} + M_{pl} \cdot i_1}{M_{pll}} = \frac{266,45 + 43,2 \cdot 2651,54}{1000} = 2657,71 \text{ kJ / kg} \quad (12.27)$$

Této entalpii odpovídá teplota  $t_{out} = 338,0459 \text{ }^\circ\text{C}$ , rozdíl mezi volenou a vypočítanou teplotou je  $\Delta t = 0,0059 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 12.2 Celkové teplo odebrané v této části tahu

$$Q_C = \frac{Q_{zll}}{M_{pv}} = \frac{266,45}{3,35} = 79,58 \text{ kJ / m}^3 \quad (12.28)$$

Bilanční odchylka na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{73,55 - 79,58}{73,55} \cdot 100 = -0,032\% \quad (12.29)$$

Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$ .

**Teplo výstupních spalin**

$$I_{sp1} = 9323,8 \text{ kJ / m}^3$$

$$I_{sp2} = I_{sp1} - Q_C = 9323,8 - 79,58 = 9244,21 \text{ kJ / m}^3 \quad (12.30)$$

Entalpii  $I_{sp2}$  odpovídá z I-t diagramu spalin a vzduchu teplota  $t_{out} = 533,82 \text{ }^\circ\text{C}$

**13. Kontrola výparníkového systému**

Teplo předané ve spalovací komoře	13966,56	kJ/m <sup>3</sup>
Teplo předané membránové stěně v oblasti PIII	1353,86	kJ/m <sup>3</sup>
Teplo předané mříži	244,55	kJ/m <sup>3</sup>
Teplo předané membránové stěně v oblasti PII	343,31	kJ/m <sup>3</sup>
Teplo předané výstupní mříži	545,25	kJ/m <sup>3</sup>

---

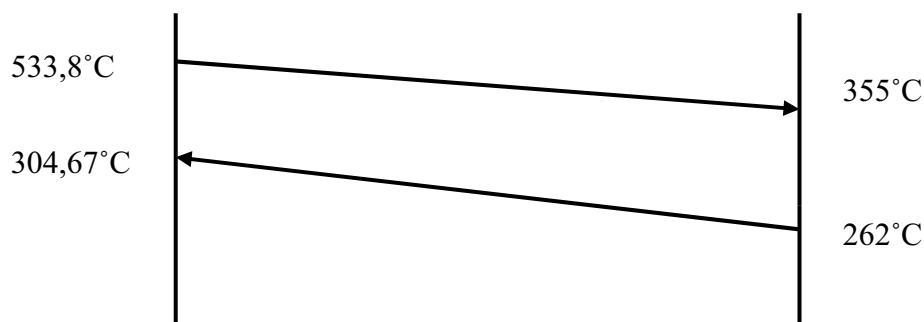
Suma výparníkového systému	16450,52	kJ/m <sup>3</sup>
----------------------------	----------	-------------------

$$\Delta = \frac{16443,084 - 16450,52}{16443,084} \cdot 100 = -0,045\% \quad (13.0)$$

Výparník vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 0,5\%$ .

**14. Ekonomizér**

Výpočet je prováděn podle [1].

**14.1 Ekonomizér (část 1)****14.2 Teplotní spád v ekonomizéru**

Obr.14 Grafické zobrazení teplotního spádu v oblasti ekonomizéru

Teplota spalin            vstupní  $t_{in} = 533,8^{\circ}\text{C}$   
                                   volím výstupní  $t_{out} = 355^{\circ}\text{C}$

Výstupní teplotě spalin odpovídá entalpie  $I_{sp2} = 6008,89\text{kJ} / \text{m}^3$ , hodnota zjištěna interpolací z tab 1.

Teplota média            vstupní  $t_{in} = 262^{\circ}\text{C}$   
                                   výstupní  $t_{out} = 304,67^{\circ}\text{C}$

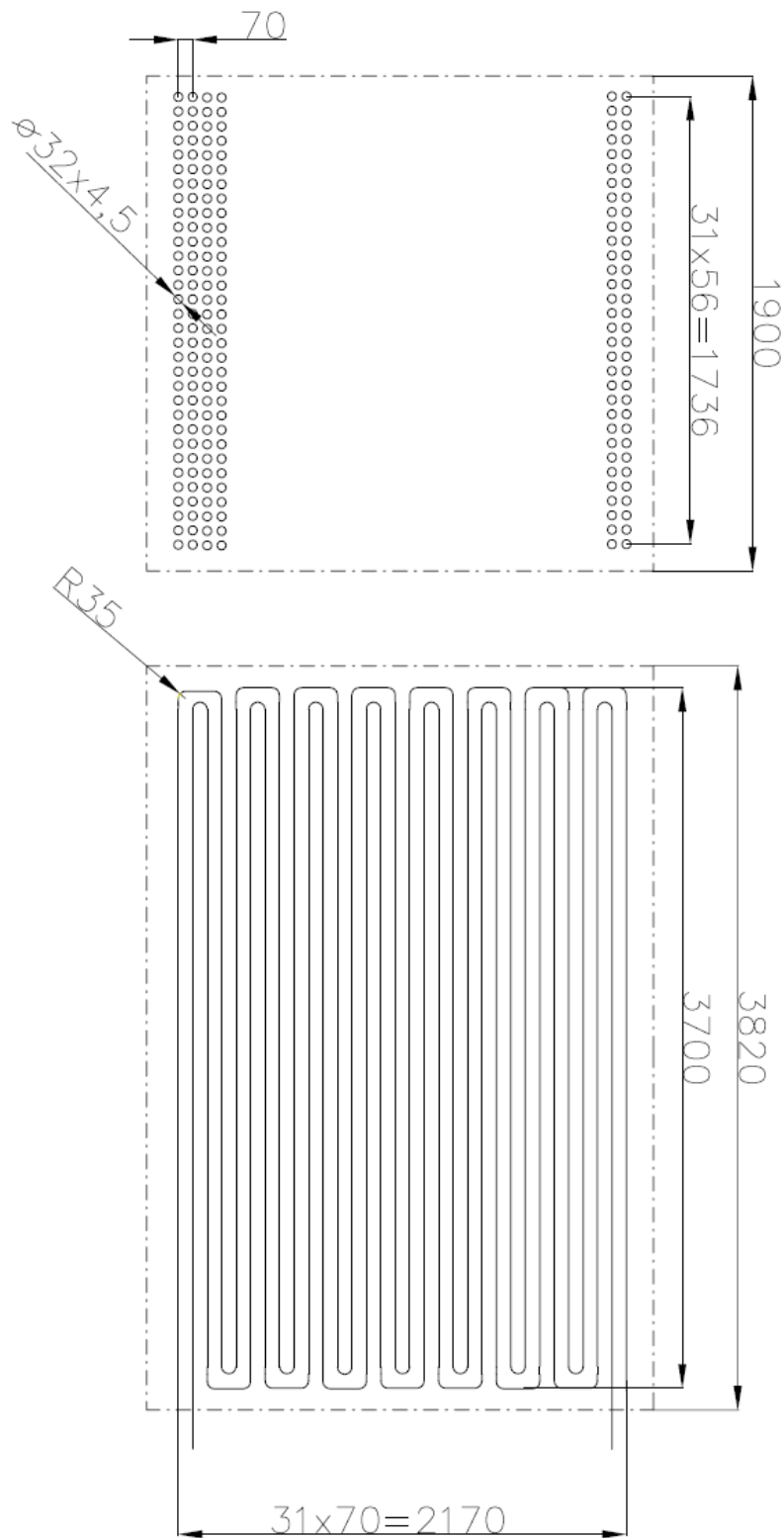
**Bilanční teplo předané na této ploše**

$$Q_b = \varphi \cdot (I_{sp1} - I_{sp2}) = 0,994 \cdot (9244,21 - 6008,89) = 3216,049\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (14.0)$$

**Rozměry ekonomizéru**

Vnější průměr trubek	D=0,032m
Tloušťka stěny	s=0,0045m
Vnitřní průměr trubek	d=0,023m
Podélná rozteč	$s_2 = 0,07\text{m}$
Příčná rozteč	$s_1 = 0,056\text{m}$
Počet podélných řad	$z_1 = 16$
Počet příčných řad	$z_2 = 64$

## Přepočet kotle při dílčím výkonu



Obr.15. Schéma ekonomizéru

Ekonomizér počítám jako jeden velký celek, pro konstrukci bude rozdělen do dvou částí paralelně umístěných vedle sebe, na obr.15 je pro lepší názornost ukázka poloviny EKA.

Příčná rozteč

$$\sigma_1 = s_1 / D = 0,056 / 0,032 = 1,75 \quad (14.1)$$

Podélná rozteč

$$\sigma_2 = s_2 / D = 0,07 / 0,032 = 2,1875 \quad (14.2)$$

Světlý průřez kanálu

$$F = a \cdot b - D \cdot z_2 \cdot h = 3,8 \cdot 3,82 - 0,032 \cdot 64 \cdot 3,7 = 6,9384m^2 \quad (14.3)$$

Střední teplota média

$$t_m = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{304,67 + 262}{2} = 283,33^\circ C \quad (14.4)$$

Průřez pro médium proudící uvnitř trubek

$$F_m = z_1 \cdot x \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 16 \cdot 2 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,028^2}{4} \right) = 0,053m^2 \quad (14.5)$$

Rychlost proudění média v trubkách

$$w_m = \frac{M_{pl} \cdot v_m}{F_m} = \frac{43,2 \cdot 0,00132}{0,053} = 1,1m/s \quad (14.6)$$

Rychlost média by měla být v rozmezí 0,3 -1,2 m/s, 1,1 m/s toto rozmezí splňuje [1].

Měrný objem páry pro střední tlak  $p = 14,05Mpa$  a pro střední teplotu  $t_p = 283,33^\circ C$  je $v_p = 0,00132m^3 / kg$ , hodnota z [4].

Střední teplota spalin

$$t_s = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{533,8 + 355}{2} = 444,4^\circ C \quad (14.7)$$

Rychlost proudění spalin v kanále

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot t_{str} + 273}{F} \quad (14.8)$$

$$w_s = \frac{3,35 \cdot 12,03}{6,9384} \cdot \frac{444,4 + 273}{273} = 15,25m/s$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin**

Příčné proudění, trubky uspořádány za sebou

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (14.9)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,06307}{0,032} \cdot \left( \frac{15,25 \cdot 0,032}{6,68 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,658^{0,33} = 110,21W / m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalin, hodnoty z [4]

$$Pr = 0,658$$

$$\lambda_s = 0,06307W / mK$$

$$\nu_s = 6,68 \cdot 10^{-5} m^2 / s$$

Oprava na počet podélných řad

$$z_2 > 10 \Rightarrow c_z = 1$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči a poměrné podélné rozteči

$$\sigma_2 \geq 2 \Rightarrow c_s = 1$$

Celková plocha ekonomizéru (část 1)

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot h \cdot x = 3,14 \cdot 0,032 \cdot 16 \cdot 64 \cdot 3,7 \cdot 2 = 761,4m^2 \quad (14.10)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \alpha \cdot \psi = 110,21 \cdot 0,85 = 93,67W / m^2K \quad (14.11)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{229,13 - 93}{\ln \frac{229,13}{93}} = 151,14K \quad (14.12)$$

$$\Delta t_1 = 533,8 - 304,67 = 229,13K \quad (14.13)$$

$$\Delta t_2 = 355 - 262 = 93K \quad (14.14)$$

**Tepelný výkon ekonomizéru**

$$Q_{ekol} = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{761,4 \cdot 93,67 \cdot 151,14}{1000} = 10780kW \quad (14.15)$$

**14.3 Celkové teplo odebrané v této části tahu**

$$Q_C = \frac{Q_{ekol}}{M_{pv}} = \frac{10780}{3,35} = 3219,72kJ / m^3 \quad (14.16)$$

Bilanční odchylka na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{3216,049 - 3219,72}{3216,049} \cdot 100 = -0,11\% \quad (14.17)$$

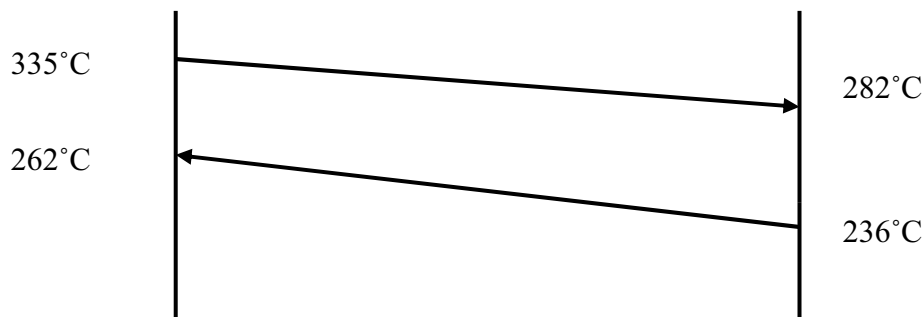
Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$ .

**Teplo výstupních spalin**

$$I_{sp1} = 9244,21kJ / m^3$$

$$I_{sp2} = I_{sp1} - Q_C = 9244,21 - 3188,71 = 6024,49kJ / m^3 \quad (14.18)$$

Entalpii  $I_{sp2}$  odpovídá z I-t diagramu spalin a vzduchu teplota  $t_{out} = 355,9^\circ C$

**14.4 Ekonomizér (část 2)****14.5 Teplotní spád v ekonomizéru**

Obr.16 Grafické zobrazení teplotního spádu v oblasti ekonomizéru

Teplota spalin: vstupní  $t_{in} = 335^{\circ}\text{C}$   
 volím výstupní  $t_{out} = 282^{\circ}\text{C}$

Výstupní teplotě spalin odpovídá entalpie  $I_{sp2} = 4729,26\text{kJ} / \text{m}^3$ , hodnota zjištěna interpolací z tab 1.

Teplota média vstupní  $t_{in} = 236^{\circ}\text{C}$   
 výstupní  $t_{out} = 262^{\circ}\text{C}$

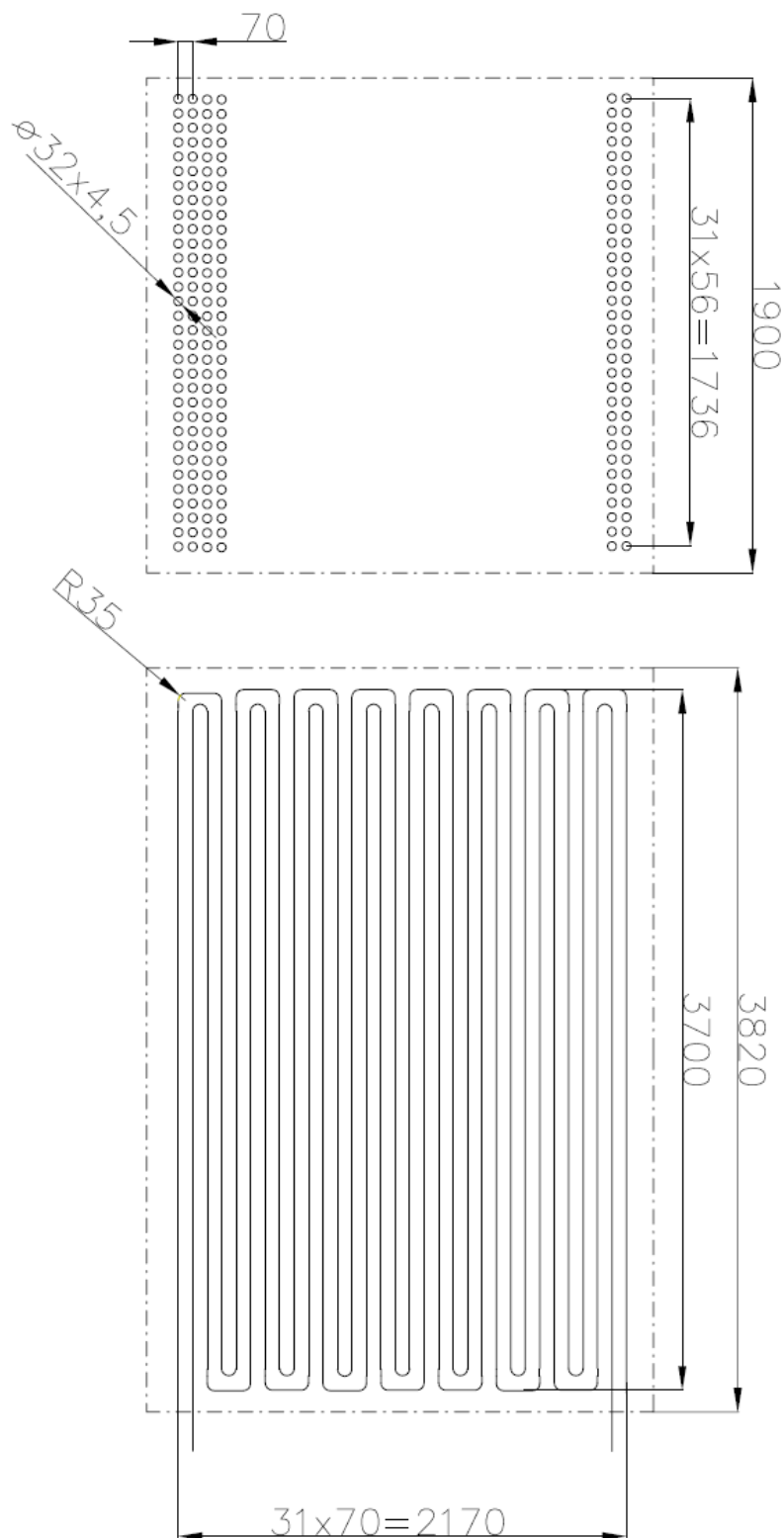
**Bilanční teplo předané na této ploše**

$$Q_b = \varphi \cdot (I_{sp1} - I_{sp2}) = 0,994 \cdot (6024,49 - 4729,26) = 1287,515\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (14.19)$$

**Rozměry ekonomizéru**

Vnější průměr trubek	$D=0,032\text{m}$
Tloušťka stěny	$s=0,0045\text{m}$
Vnitřní průměr trubek	$d=0,023\text{m}$
Podélná rozteč	$s_2=0,07\text{m}$
Příčná rozteč	$s_1=0,056\text{m}$
Počet podélných řad	$z_1=16$
Počet příčných řad	$z_2=64$

## Přepočet kotle při dílčím výkonu



Obr. 17 Schéma ekonomizéru

Ekonomizér počítám jako jeden velký celek, pro konstrukci bude rozdělen do dvou částí paralelně umístěných vedle sebe. Na obr.17 je pro lepší názornost ukázka poloviny EKA.

Příčná rozteč

$$\sigma_1 = s_1 / D = 0,056 / 0,032 = 1,75 \quad (14.20)$$

Podélná rozteč

$$\sigma_2 = s_2 / D = 0,07 / 0,032 = 2,1875 \quad (14.21)$$

Světlý průřez kanálu

$$F = a \cdot b - D \cdot z_2 \cdot h = 3,8 \cdot 3,82 - 0,032 \cdot 64 \cdot 3,7 = 6,9384m^2 \quad (14.22)$$

Střední teplota média

$$t_m = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{262 + 236}{2} = 249^\circ C \quad (14.23)$$

Průřez pro médium proudící uvnitř trubek

$$F_m = z_1 \cdot x \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 16 \cdot 2 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,028^2}{4} \right) = 0,053m^2 \quad (14.24)$$

Rychlost proudění média v trubkách

$$w_m = \frac{M_{pl} \cdot v_m}{F_m} = \frac{43,2 \cdot 0,00123}{0,053} = 1m / s \quad (14.25)$$

Rychlost média by měla být v rozmezí 0,3-1,2 m/s, 1 m/s toto rozmezí splňuje [1].

Měrný objem páry pro střední tlak  $p=14,15\text{Mpa}$  a pro střední teplotu  $t_p = 249^\circ C$  je $v_p = 0,00123m^3 / kg$ , hodnota z [4].

Střední teplota spalin

$$t_s = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{355 + 282}{2} = 318,5^\circ C \quad (14.26)$$

Rychlost proudění spalin v kanále

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot t_{str} + 273}{F} \quad (14.27)$$

$$w_s = \frac{3,35 \cdot 12,03 \cdot 318,5 + 273}{6,94} = 12,58m / s$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin**

Příčné proudění, trubky uspořádány za sebou

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_s}{D} \cdot \left( \frac{w_s \cdot D}{v_s} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (14.28)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,307 \cdot \frac{0,05149}{0,032} \cdot \left( \frac{12,58 \cdot 0,032}{4,85 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,676^{0,33} = 99,72W / m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalin, hodnoty z [4]

$$Pr = 0,676$$

$$\lambda_s = 0,05149W / mK$$

$$v_s = 4,85 \cdot 10^{-5} m^2 / s$$

Oprava na počet podélných řad

$$z_2 > 10 \Rightarrow c_z = 1$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči a poměrné podélné rozteči

$$\sigma_2 \geq 2 \Rightarrow c_s = 1$$

Celková plocha ekonomizéru (část 2)

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot h \cdot x = 3,14 \cdot 0,032 \cdot 16 \cdot 64 \cdot 3,7 \cdot 2 = 761,4m^2 \quad (14.29)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$$k = \alpha \cdot \psi = 99,72 \cdot 0,85 = 84,76W / m^2K \quad (14.30)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{93 - 46}{\ln \frac{93}{46}} = 66,8K \quad (14.31)$$

$$\Delta t_1 = 355 - 262 = 93K \quad (14.32)$$

$$\Delta t_2 = 282 - 236 = 46K \quad (14.33)$$

**Tepelný výkon ekonomizéru**

$$Q_{ekoll} = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{761,4 \cdot 84,76 \cdot 66,8}{1000} = 4313,72kW \quad (14.34)$$

**14.6 Celkové teplo odebrané v této části tahu**

$$Q_C = \frac{Q_{ekol}}{M_{pv}} = \frac{4313,72}{3,35} = 1288,4kJ / m^3 \quad (14.35)$$

Bilanční odchylka na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{1287,515 - 1288,4}{1287,515} \cdot 100 = -0,07\% \quad (14.36)$$

**Teplo výstupních spalin**

$$I_{sp1} = 6024,49kJ / m^3$$

$$I_{sp2} = I_{sp1} - Q_C = 6024,49 - 1288,4 = 4736,09kJ / m^3 \quad (14.37)$$

Entalpii  $I_{sp2}$  odpovídá z I-t diagramu spalin a vzduchu teplota  $t_{out} = 282,4^\circ C$

Odchylka bilance navrženého a vypočteného výkonu v celém EKU

$$Q = Q_{ekol} + Q_{ekoll} = 10780 + 4313,72 = 15093,79 \text{ kW} \quad (14.38)$$

$$\Delta Q = \frac{Q_{EKO} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{14901,92 - 15093,79}{14901,92} \cdot 100 = -1,28\% \quad (14.39)$$

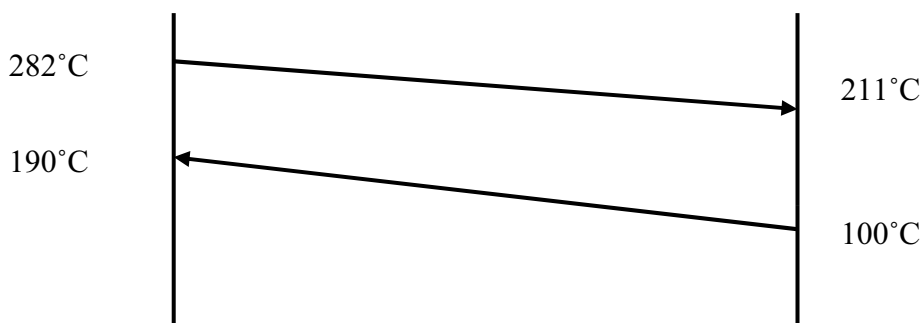
Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$ .

## 15. Trubkový ohřívák vzduchu

Výpočet je prováděn podle [2].

### 15.1 Trubkový ohřívák vzduchu (část 1)

### 15.2 Teplotní spád v ohříváku vzduchu



Obr.18 Grafické zobrazení teplotního spádu v oblasti trubkového ohříváku vzduchu

Teplota spalin: vstupní  $t_{in} = 282^\circ\text{C}$   
 volím výstupní  $t_{out} = 211^\circ\text{C}$

Výstupní teplotě spalin odpovídá entalpie  $I_{sp2} = 3509,55 \text{ kJ} / \text{m}^3$  hodnota zjištěna interpolací z tab 1.

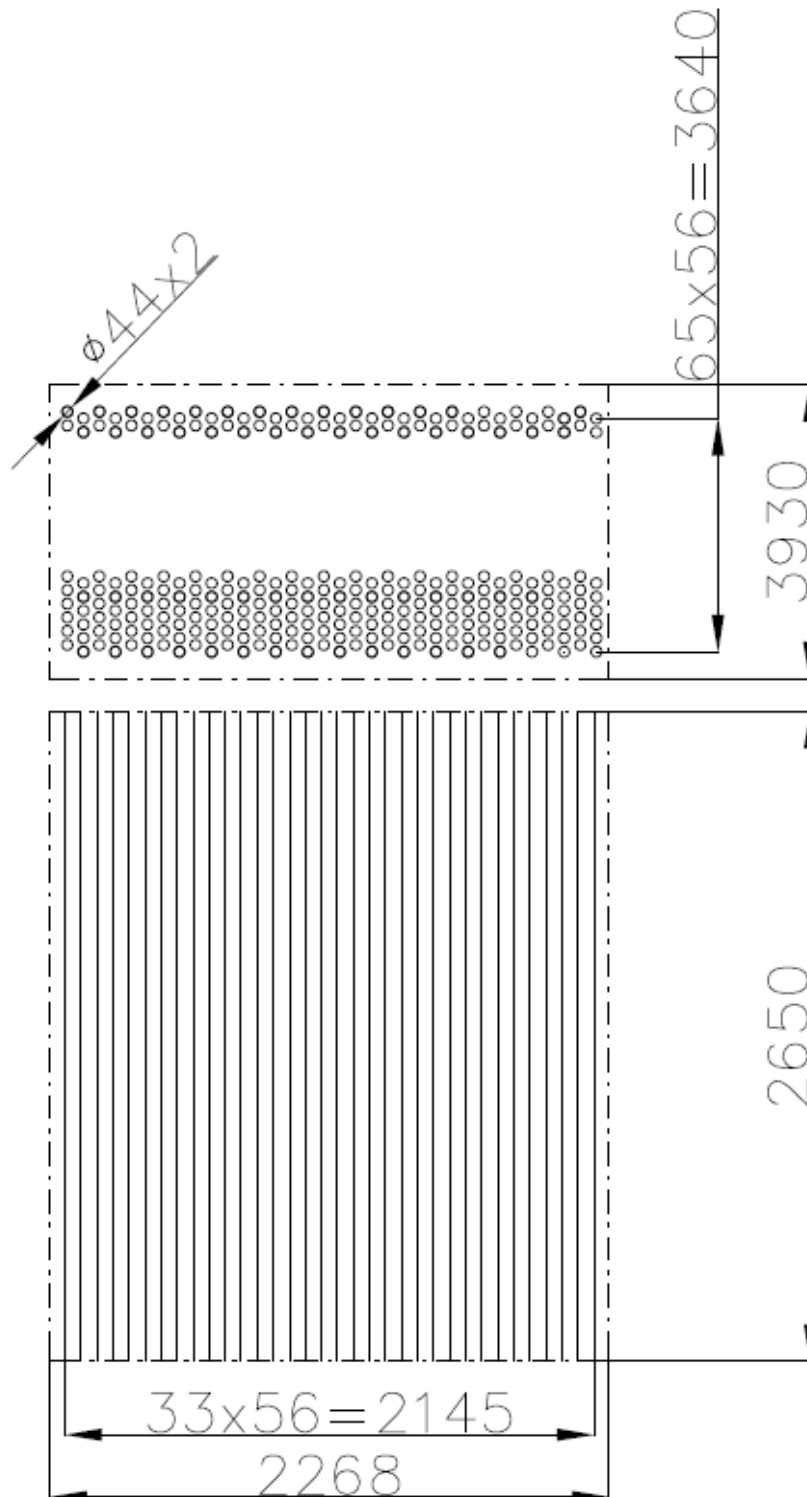
Teplota vzduchu vstupní  $t_{in} = 100^\circ\text{C}$   
 výstupní  $t_{out} = 190^\circ\text{C}$

### Bilanční teplo předané na této ploše

$$Q_b = \varphi \cdot (I_{sp1} - I_{sp2}) = 0,994 \cdot (4736,09 - 3509,55) = 1219,24 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (15.0)$$

## Rozměry ohříváku vzduchu

Vnější průměr trubek	$D=0,044\text{m}$
Tloušťka stěny	$s=0,002\text{m}$
Vnitřní průměr trubek	$d=0,04\text{m}$
Podélná rozteč	$s_2=0,064\text{m}$
Příčná rozteč	$s_1=0,056\text{m}$
Počet podélných řad	$z_2=68$
Počet příčných řad	$z_1=66$
Délka trubky	$h=2,65\text{m}$
Šířka OVZ	$b=4,536\text{m}$
Délka OVZ	$a=3,93\text{m}$



Obr.19 Schéma ohříváku vzduchu

Ohřívák vzduchu počítám jako jeden velký celek, pro konstrukci bude rozdělen do dvou částí paralelně umístěných vedle sebe. Na obr.19 je pro lepší názornost ukázka poloviny OVZ.

Příčná rozteč

$$\sigma_1 = s_1 / D = 0,056 / 0,032 = 1,27 \quad (15.1)$$

Podélná rozteč

$$\sigma_2 = s_2 / d = 0,064 / 0,032 = 1,45 \quad (15.2)$$

Světly průřez pro spaliny

$$F_s = z_1 \cdot z_2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 66 \cdot 68 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 0,4^2}{4} \right) = 5,64 m^2 \quad (15.3)$$

Střední teplota spalin

$$t_s = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{282 + 211}{2} = 246,5^\circ C \quad (15.4)$$

Rychlost proudu spalin v trubkách

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot t_{str} + 273}{F \cdot 273} \quad (15.5)$$

$$w_s = \frac{3,35 \cdot 12,03 \cdot 246,5 + 273}{5,64 \cdot 273} = 13,59 m / s$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin**

Podélné proudění spalin uvnitř trubek

$$\alpha_s = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d}{\nu_s} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (15.6)$$

$$\alpha_s = 0,023 \cdot \frac{0,0451}{0,04} \cdot \left( \frac{13,59 \cdot 0,04}{3,87 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,69^{0,4} = 46,46 W / m^2 \cdot K$$

Index  $s$  označuje spaliny.

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalin, hodnoty z [4]

$$Pr = 0,69$$

$$\lambda_s = 0,0451 W / mK$$

$$\nu_s = 3,87 \cdot 10^{-5} m^2 / s$$

Světly průřez pro vzduch

$$F_{vzd} = a \cdot h - h \cdot D \cdot z_1 = 3,93 \cdot 2,65 - 2,65 \cdot 0,044 \cdot 66 \cdot 2 = 5,4378 m^2 \quad (15.7)$$

Střední teplota vzduchu

$$t_{vzd} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{190 + 100}{2} = 145^\circ C \quad (15.8)$$

Rychlost proudu vzduchu v kanálu

$$w_{vz} = \frac{M_{pv} \cdot \beta_{vz} \cdot O_{vzd \min}}{F_{vz}} \cdot \left( \frac{t_{str}}{273} + 1 \right) = \frac{3,35 \cdot 1,15 \cdot 9,86}{5,4378} \cdot \left( \frac{145}{273} + 1 \right) = 10,7 \text{ m/s} \quad (15.9)$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany vzduchu

Příčné proudění, vystřídané uspořádání trubek

$$\alpha_{vz} = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{vz}}{D} \cdot \left( \frac{w_{vz} \cdot D}{v_{vz}} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (15.10)$$

$$\alpha_{vz} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,315 \cdot \frac{0,0353}{0,044} \cdot \left( \frac{10,5 \cdot 0,044}{2,83 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,695^{0,33} = 76,42 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu vzduchu, hodnoty z [4]

$$\text{Pr} = 0,695$$

$$\lambda_{vz} = 0,0353 \text{ W/mK}$$

$$v_{vz} = 2,83 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Oprava na počet podélných řad

$$z_2 > 10 \Rightarrow c_z = 1$$

Oprava na uspořádání svazku podle poměrné příčné rozteče a podle  $\varphi_\sigma$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 1,27^2 + 1,45^2} = 1,59 \quad (15.11)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{1,27 - 1}{1,45 - 1} = 0,46 \quad (15.12)$$

Pro hodnoty  $0,1 < \varphi_\sigma \leq 1,7$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 0,46^{0,1} = 0,315 \quad (15.13)$$

### Celkový součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{\alpha_s \cdot \alpha_{vz}}{\alpha_s + \alpha_{vz}} = 0,85 \cdot \frac{46,46 \cdot 76,42}{46,46 + 76,42} = 24,56 \text{ W/m}^2 \text{K} \quad (15.14)$$

Celková výhřevná plocha trubkového ohříváku vzduchu (část 1)

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot h = \pi \cdot 0,044 \cdot 66 \cdot 68 \cdot 2,65 = 1643,16 \text{ m}^2 \quad (15.15)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \cdot \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{111 - 92}{\ln \cdot \frac{111}{92}} = 101,2K \quad (15.16)$$

$$\Delta t_1 = 211 - 100 = 111K \quad (15.17)$$

$$\Delta t_2 = 282 - 190 = 92K \quad (15.18)$$

Tepelný výkon trubkového ohříváku

$$Q_{ovzl} = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{1643,16 \cdot 24 \cdot 56 \cdot 101,2}{1000} = 4083,92kW \quad (15.19)$$

### 15.3 Celkové teplo odebrané v této části tahu

$$Q_C = \frac{Q_{eko}}{M_{pv}} = \frac{4083,92}{3,35} = 1219,76kJ / m^3 \quad (15.20)$$

Bilanční odchylka na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{1219,24 - 1219,76}{1219,24} \cdot 100 = -0,04\% \quad (15.21)$$

Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$ .

### Výstupní teplo spalin

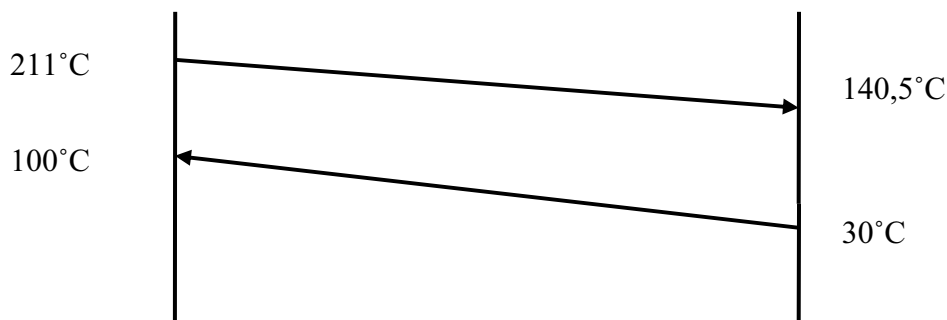
$$I_{sp1} = 4736,09kJ / m^3$$

$$I_{sp2} = I_{sp1} - Q_C = 4736,09 - 1219,76 = 3516,33kJ / m^3 \quad (15.22)$$

Entalpii  $I_{sp2}$  odpovídá teplota  $t_{out} = 211,6^\circ C$ . Hodnota zjištěna interpolací z tab. 1.

### 15.4 Trubkový ohřívák vzduchu (část 2)

### 15.5 Teplotní spád v ohříváku vzduchu



Obr.20 Grafické zobrazení teplotního spádu v oblasti trubkového ohříváku vzduchu

## Přepočet kotle při dílčím výkonu

Teplota spalin vstupní  $t_{in} = 211^{\circ}\text{C}$   
 volím výstupní  $t_{out} = 140,5^{\circ}\text{C}$

Výstupní teplotě spalin odpovídá entalpie  $I_{sp2} = 2324,44\text{kJ} / \text{m}^3$ , hodnota zjištěna interpolací z tab 1.

Teplota vzduchu vstupní  $t_{in} = 30^{\circ}\text{C}$   
 výstupní  $t_{out} = 100^{\circ}\text{C}$

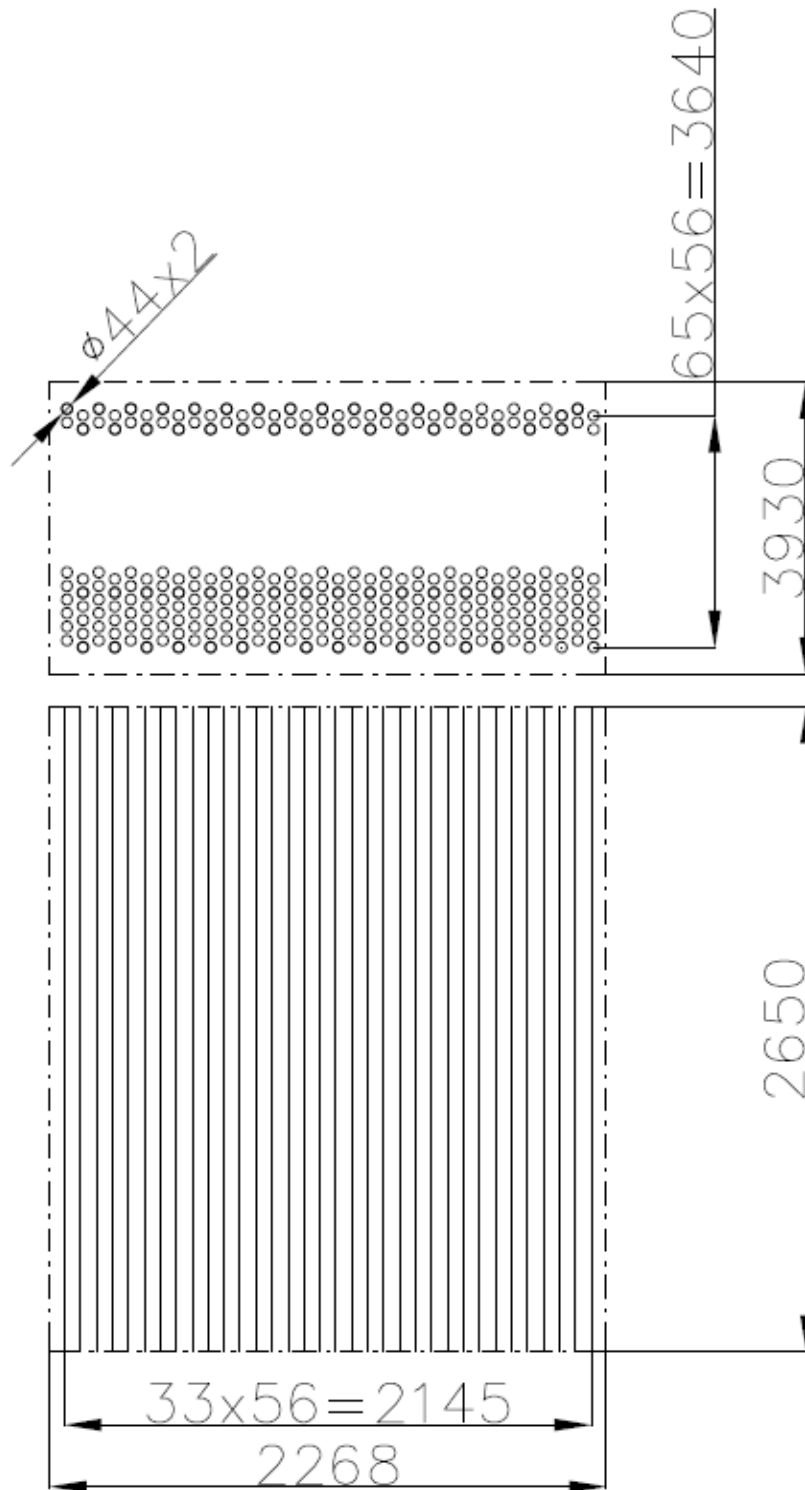
**Bilanční teplo předané na této ploše**

$$Q_b = \varphi \cdot (I_{sp1} - I_{sp2}) = 0,994 \cdot (3516,33 - 2324,44) = 1184,79\text{kJ} / \text{m}^3 \quad (15.23)$$

## Rozměry ohříváku vzduchu

Vnější průměr trubek	$D=0,044\text{m}$
Tloušťka stěny	$s=0,002\text{m}$
Vnitřní průměr trubek	$d=0,04\text{m}$
Podélná rozteč	$s_2=0,064\text{m}$
Příčná rozteč	$s_1=0,056\text{m}$
Počet podélných řad	$z_2=68$
Počet příčných řad	$z_1=66$
Délka trubky	$h=2,65\text{m}$
Šířka OVZ	$b=4,536\text{m}$
Délka OVZ	$a=3,93\text{m}$

## Přepočet kotle při dílčím výkonu



Obr.21 Schéma trubkového ohříváku vzduchu

Ohřívák vzduchu počítám jako jeden velký celek, pro konstrukci bude rozdělen do dvou částí paralelně umístěných vedle sebe. Na obr.21 je pro lepší názornost ukázka poloviny OVZ.

Příčná rozteč

$$\sigma_1 = s_1 / D = 0,056 / 0,032 = 1,27 \quad (15.24)$$

Podélná rozteč

$$\sigma_2 = s_2 / d = 0,064 / 0,032 = 1,45 \quad (15.25)$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_s = z_1 \cdot z_2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 66 \cdot 68 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 0,4^2}{4} \right) = 5,64 m^2 \quad (15.26)$$

Střední teplota spalin

$$t_s = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{211 + 140,5}{2} = 175,75^\circ C \quad (15.27)$$

Rychlost proudu spalin v trubkách

$$w_s = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot t_{str} + 273}{F \cdot 273} \quad (15.28)$$

$$w_s = \frac{3,35 \cdot 12,03 \cdot 175,75 + 273}{5,64 \cdot 273} = 11,75 m / s$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin**

Podélné proudění spalin uvnitř trubek

$$\alpha_s = 0,023 \cdot \frac{\lambda_s}{d} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d}{v_s} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (15.29)$$

$$\alpha_s = 0,023 \cdot \frac{0,03728}{0,04} \cdot \left( \frac{11,75 \cdot 0,04}{3,03 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,61^{0,4} = 39,54 W / m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu spalin, hodnoty z [4]

$$Pr = 0,61$$

$$\lambda_s = 0,03728 W / mK$$

$$v_s = 3,03 \cdot 10^{-5} m^2 / s$$

Světlý průřez pro vzduch

$$F_{vzd} = a \cdot h - h \cdot D \cdot z_1 = 3,93 \cdot 2,65 - 2,65 \cdot 0,044 \cdot 66 \cdot 2 = 5,4378 m^2 \quad (15.30)$$

Střední teplota vzduchu

$$t_{vzd} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{100 + 30}{2} = 65^\circ C \quad (15.31)$$

Rychlost proudu vzduchu v kanálu

$$w_{vz} = \frac{M_{pv} \cdot \beta_{vz} \cdot O_{vzd \min}}{F_{vz}} \cdot \left( \frac{t_{str}}{273} + 1 \right) = \frac{3,35 \cdot 1,15 \cdot 9,86}{5,4378} \cdot \left( \frac{65}{273} + 1 \right) = 8,64 m / s \quad (15.32)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany vzduchu**

Příčné proudění, vystřídané uspořádání trubek

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda_{vz}}{D} \cdot \left( \frac{w_{vz} \cdot D}{v_{vz}} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (15.33)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,315 \cdot \frac{0,0294}{0,044} \cdot \left( \frac{8,64 \cdot 0,044}{1,96 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,708^{0,33} = 70,19 W / m^2 \cdot K$$

Látkové vlastnosti pro střední teplotu vzduchu, hodnoty z [4]

$$Pr = 0,708$$

$$\lambda_{vz} = 0,0294 W / mK$$

$$v_{vz} = 1,96 \cdot 10^{-5} m^2 / s$$

Oprava na počet podélných řad

$$z_2 > 10 \Rightarrow c_z = 1$$

Oprava na uspořádání svazku podle poměrné příčné rozteče a podle  $\varphi_\sigma$ 

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 1,27^2 + 1,45^2} = 1,59 \quad (15.34)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{1,27 - 1}{1,59 - 1} = 0,46 \quad (15.35)$$

Pro hodnoty  $0,1 < \varphi_\sigma \leq 1,7$ 

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 0,46^{0,1} = 0,315 \quad (15.36)$$

**Celkový součinitel prostupu tepla**

$$k = \psi \cdot \frac{\alpha_s \cdot \alpha_{vz}}{\alpha_s + \alpha_{vz}} = 0,85 \cdot \frac{39,54 \cdot 70,19}{39,54 + 70,19} = 21,5 W / m^2 K \quad (15.37)$$

Celková výhřevná plocha trubkového ohříváku vzduchu

$$S = \pi \cdot D \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot h = \pi \cdot 0,044 \cdot 66 \cdot 68 \cdot 2,65 = 1643,16 m^2 \quad (15.38)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{111 - 110,5}{\ln \frac{111}{110,5}} = 110,87 K \quad (15.39)$$

$$\Delta t_1 = 211 - 100 = 111 K \quad (15.40)$$

$$\Delta t_2 = 140,5 - 30 = 110,5 K \quad (15.41)$$

Tepelný výkon trubkového ohříváku

$$Q_{ovzII} = \frac{S \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{1643,16 \cdot 21,5 \cdot 110,87}{1000} = 3917 \text{ kW} \quad (15.42)$$

### 15.6 Celkové teplo odebrané v této části tahu

$$Q_C = \frac{Q_{ovzII}}{M_{pv}} = \frac{3917}{3,35} = 1169,9 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (15.43)$$

Bilanční odchylka na této ploše

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_c}{Q_b} \cdot 100 = \frac{1184,79 - 1169,9}{1184,79} \cdot 100 = 1,2\% \quad (15.44)$$

Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$ .

### Teplo výstupních spalin

$$I_{sp1} = 3516,33 \text{ kJ} / \text{m}^3$$

$$I_{sp2} = I_{sp1} - Q_C = 3516,33 - 1169,91 = 2346,43 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (15.45)$$

Entalpii  $I_{sp2}$  odpovídá teplota  $t_{out} = 141,8^\circ\text{C}$ . Hodnota zjištěna interpolací z tab. 1.

Odchylka bilance navrženého a vypočteného výkonu na této ploše

$$Q = Q_{ovzI} + Q_{ovzII} = 4083,9 + 3917 = 8000,9 \text{ kW} \quad (15.46)$$

$$\Delta Q = \frac{Q_{ovz} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{8025,04 - 8000,9}{8025,04} \cdot 100 = 0,3\% \quad (15.47)$$

Vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 2\%$ .

**16. Kontrola tepelné bilance kotle**

Teplo předané přehříváku III	4639,15	$\text{kJ/m}^3$
Teplo předané přehříváku II	2540,76	$\text{kJ/m}^3$
Teplo předané přehříváku I	3809,95	$\text{kJ/m}^3$
Teplo předané výparníku	16450,52	$\text{kJ/m}^3$
Teplo předané stropnímu přehříváku	251,7	$\text{kJ/m}^3$
Teplo předané v ekonomizéru	4508,11	$\text{kJ/m}^3$

---

Celkové bilanční teplo $Q_b$	32200,2	$\text{kJ/m}^3$
------------------------------	---------	-----------------

Odchylka tepelné bilance

$$\Delta Q = Q_p^p \cdot \frac{\eta_k}{100} - Q_b = 34340 \cdot \frac{93,46}{100} - 32200,2 = -106,62 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (16.0)$$

Procentuální odchylka tepelné bilance

$$\Delta = \frac{\Delta Q}{Q_p^p} \cdot 100 = \frac{-106,62}{34340} \cdot 100 = -0,31\% \quad (16.1)$$

Tepelná bilance vyhovuje předepsané odchylce  $\pm 0,5\%$ .

## 17. Technické opatření pro snížení emisí NO<sub>x</sub> ve spalinách , čerpáno z [3]

### Škodlivé složky spalin plynných paliv

Při spalování fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn) a jejich derivátů (benzin, nafta) vznikají látky, které mají negativní vliv na životní prostředí a lidské zdraví. Na světové produkci emisí negativně působících látek se plynná paliva podílejí přibližně 2%.

### Principy vzniku NO<sub>x</sub>

#### Oxidy dusíku

Při spalování paliv se vzduchem při teplotách plamene nad 1100°C dochází ke vzniku oxidů dusíku. Při reakci kyslíku a dusíku vznikají různé oxidy dusíku jako například NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> a N<sub>2</sub>O. Z těchto možných forem oxidů jsou termodynamicky schopné existovat pouze NO a NO<sub>2</sub>, které jsou označovány jako „nitrozní plyny“ - NO<sub>x</sub>. celkového množství NO<sub>x</sub> obsažené ve spalinách plynných paliv je 10% NO a 90% NO<sub>2</sub>.

Při spalování paliva existují tři mechanismy vzniku NO :

#### a) Termický NO

Vzniká v částech plamene chudých na palivo a při teplotách spalování nad 1200°C. NO vzniká oxidací atmosférického dusíku atomárním kyslíkem obsaženým ve vzduchu. Koncentrace atomárního kyslíku je závislá na teplotě a se zvyšující se teplotou se zvyšuje množství disociovaných molekul O<sub>2</sub>, a také roste koncentrace atomárního kyslíku O a následkem této reakce je růst tvorby NO. J.B. Zedlovič popsal rychlost tvorby NO při spalování plynu rovnicí:

$$\frac{d(NO)}{d\tau} = k_1(N_2)(O_2) - k_2(NO)^2 \quad (17.1)$$

NO – koncentrace oxidu dusnatého ve spalinách

k<sub>1</sub> a k<sub>2</sub> – kinetické konstanty

N<sub>2</sub> a O<sub>2</sub> – koncentrace kyslíku a dusíku v reakční zóně



#### b) Promptní NO

Vzniká reakcí atmosférického dusíku s radikály uhlovodíků v místech plamene bohatých na palivo.

Průběh vzniku promptního (rychlého) NO je popsán následujícími rovnicemi:



**c) Palivový NO**

Vzniká oxidací dusíku, který je chemicky navázán v palivu. Reakce neprobíhá přímo ale prostřednictvím vzniku meziprojektu jako  $NH_3$  nebo  $HCN$ . Meziprojektu reakce jsou oxidovány na NO.

DeSoete popsal vznik palivového NO rovnicí:

**Metody snižování tvorby  $NO_x$** 

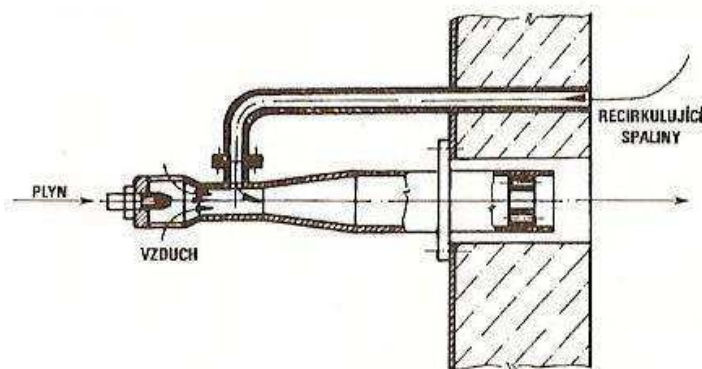
**Primární metody** – snižují množství  $NO_x$  při spalování paliv

Faktory ovlivňující tvorbu  $NO_x$

Teplota plamene v reakční zóně  
 Koncentrace  $O_2$  v plynové vzdušné směsi  
 Doba setrvání v pásmu vysokých teplot  
 Obsah dusíku v používaném palivu

**1) Teplotu plamene v reakční zóně je možné snížit****a) Recirkulací spalin**

Recirkulace spalin tj. použití již jednou ochlazených spalin o teplo odevzdané v pracovním prostoru a přivedením těchto spalin zpátky k ústí hořáku, kde dojde ke smísení s novou směsí plynu a vzduchu.



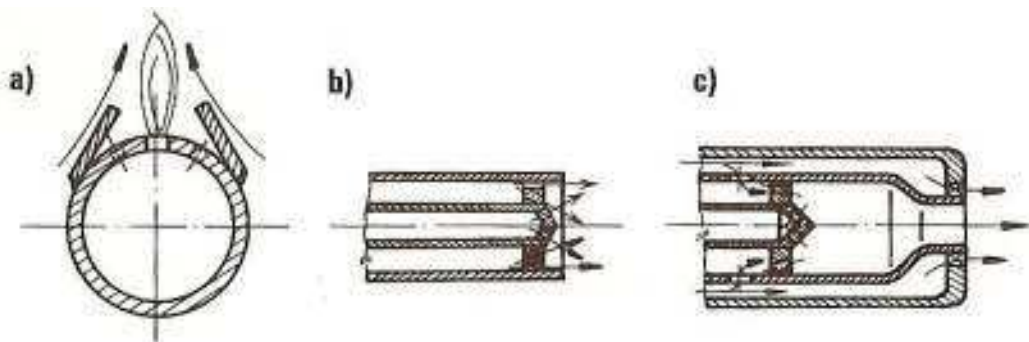
Obr.22 Recirkulace spalin přímo do sání injektorového hořáku, převzato z [3]

**b) Vstřikováním  $H_2O$  do plamene.****c) Chlazení plamene použitím keramických nebo kovových tyčí či mříží.**

Chladicí elementy jsou umístěny do plamene v místech s nejvyšší teplotou, následně dojde k zahřátí elementu a ty umožní odvést teplo z plamene do studenějších teplosměnných ploch kotle.

## 2) Snížení množství $O_2$ v reakční zóně plamene

Metoda spočívá v určení optimálního přebytku vzduchu, který ještě umožní dokonalé spálení paliva, ale neumožní vytvořit vhodné podmínky pro vznik  $NO_2$ . Pro snížení množství vzduchu v reakční zóně plamene se v praxi používá dvoustupňové spalování plynu, kde primární směs obsahuje 70 – 80% objemu vzduchu. Směs je spalována při nižších teplotách se vznikem CO. V druhém stupni se spalování dokončí přívodem 20 – 30% objemu vzduchu. Při tomto způsobu spalování je teplota plamene nižší než při 1° spalování.



Obr.23 Dvoustupňový přívod vzduchu do plamene hořáku, převzato z [3]

## 3) Zmenšení doby setrvání $N_2$ a $O_2$ v pásnu vysokých teplot:

- Rozdělení palivové směsi do většího počtu výstupních otvorů o menším průměru
- Zkrácení délky plamene a snížení objemu plamene
- Využitím třístupňového spalování

## 4) Optimalizace stávajících hořáků

Optimalizace stávajících hořáků je ekonomicky nejefektivnější metoda jak dosáhnout kvalitního spalování a dodržení emisních limitů  $NO_x$ . Optimalizace je možno dosáhnout změnou provozních podmínek na kotli, tj. jemné kalibrace kotle nebo snížením přebytku vzduchu.

## 5) Hořáky s potlačenou tvorbou $NO_x$

Jsou hořáky, které umožňují kontrolovat množství vzduchu a paliva ve směsi tak, aby bylo dosaženo rozvětvenějšího plamene. To vede ke snížení teploty na konci plamene a tím i k nižší tvorbě  $NO_x$ . Takto vytvořený plamen snižuje množství kyslíku v nejteplejších částech plamene a zlepšuje účinnost plynového hořáku.

**Sekundární metody** – odstraňují již vzniklý  $NO_x$  ze spalin.

Mezi nejčastěji používané metody pro odstraňování již vzniklého  $NO_x$  ze spalin patří selektivní katalytická redukce SCR a selektivní nekatalytická redukce SNCR.

### 1) Selektivní katalytická redukce SCR [6]

Koncentrace  $NO_x$  ve spalinách je snižována pomocí dávkování čpavku a době setrvání proudu spalin v katalyzátoru. Selektivní reakce značí, že nedochází k oxidaci  $NH_3$  a  $SO_2$ . Produkty SCR jsou  $H_2O$  a  $N_2$ . Nejčastěji probíhané reakce uvnitř katalyzátoru jsou:



Optimální teplota uvnitř katalyzátoru je 300° – 400°C.

### Technologická část SCR je sestavena ze třech hlavních částí

#### 1) čpavkové hospodářství

- zařízení pro zplyňování (pára)
- zařízení pro skladování NH<sub>3</sub>
- směšovací zařízení vzduch - NH<sub>3</sub>
- dávkovací zařízení

#### 2) katalyzátor

- umísťuje se do různých částí spalinového proudu, v závislosti na složení plynů a také na teplotě proudu spalin

a) umístění v proudu spalin s vysokým obsahem popílku, obvykle je katalyzátor umístěn mezi ekonomisérem a ohřívákem vzduchu

b) umístění v proudu spalin s nízkým obsahem popílku

- katalyzátor je umístěn mezi vysokoteplotní elektrostatický odlučovač a ohřívák vzduchu
- katalyzátor je umístěn mezi nízkoteplotní elektrostatický odlučovač a odsiřovací zařízení

c) expozice mezi odsiřovacím zařízením a komínem

#### 3) spalinový kanál

- potrubí, ventilátory, klapky atd.

### 2) Selektivní nekatalytická redukce SNCR,[6]

Princip SNCR spočívá v použití vhodných druhů redukčních chemikálií. Všechny druhy potřebují rozdílnou teplotu aby reakce mohla probíhat. Oblast teplot kde reakce probíhá se nazývá teplotní okno. Pro většinu chemikálií je vhodné teplotní okno mezi 900° – 1100°C.

#### Podmínky pro správnou funkci SNCR

- dobré promíchání chemikálií a NO<sub>x</sub> ve spalinách
- optimální teplota reakce
- vhodné místo pro injektáž NH<sub>3</sub> do spalin
- vhodné médium pro dopravu chemikálií

#### Chemikálie používané pro snižování NO<sub>x</sub>

- amoniak v koncentrované podobě nebo ve formě roztoku
- močovina s nebo bez přídavných chemikálií

Optimální reakční teplota amoniaku se nachází v rozmezí  $950^{\circ} - 1050^{\circ}\text{C}$ , močoviny mezi  $1100^{\circ} - 1150^{\circ}\text{C}$

**Technologická část SNCR se skládá:**

- zásobník chemikálií
- podávací zařízení chemikálií
- zařízení na míchání chemikálií s nosným médiem
- vstřikovací systém

## 18. Závěr

Tepelný výpočet kotle byl proveden podle literatury uvedené v seznamu. Pro dané palivo jsem provedl tepelný přepočet kotle. Vypočítaný kotel dosahuje účinnosti 94,46% při spotřebě 3,35m<sup>3</sup>/s zemního plynu. Hořáky jsou umístěny po dvou v přední a zadní stěně spalovací komory. Spalovací prostor kotle je tvořen membránovými stěnami z hladkých trubek. První výhřevnou plochou na výstupu ze spalovací komory je deskový přehřívák, který je tvořený hladkými trubkami o průměru 38mm s tepelným výkonem 15,4MW. Druhou plochou ve směru spalin je výstupní přehřívák o výkonu 8,45MW. Vstupní přehřívák dosahuje výkonu 13MW. Teplota páry je regulována pomocí dvou vstříků o celkové velikosti 2,7% Mpp. Ve druhém tahu je umístěn ekonomizér, který je řešen jako protiproudý. Vzhledem k prostorové náročnosti ekonomizéru dojde k jeho rozdělení na 4 části. Poslední výhřevnou plochou kotle je trubkový ohřívák vzduchu, který umožňuje ohřát spalovací vzduch z 30°C na 190°C. Všechny navržené plochy jsou vypočítány v povolených tolerancích.

Pro splnění zákonných limitů pro NO<sub>x</sub> si pro daný kotel vystačíme s použitím primárních metod a to s výměnou stávajících hořáku za hořáky se sníženou tvorbou NO<sub>x</sub>. Hlavní výhodou hořáků se sníženou tvorbou NO<sub>x</sub> je cenová dostupnost a rychlost, se kterou mohou být instalovány na kotel.

**19. Seznam použitých zdrojů:**

- [1] Budaj,Florián; *Parní kotle : Podklady pro tepelný výpočet*. 4.vyd. Brno : VUT, 1992. 200 s. ISBN 80-214-0426-4.
- [2] Dlouhý, Tomáš; *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. 2.vyd. Praha : ČVUT, 2002. 212 s. ISBN 80-01-02591-8.
- [3] Fík,Josef; *Spalování plyných paliv a plynové hořáky*. 1. vyd. Praha : GAS s.r.o, 1998. 232 s. ISBN 80-86176-01-0.
- [4] X Steam Tables for MS Excel IF-97
- [5] Firemní literatura ALSTOM
- [6] Skála, Zdeněk; Přednášky předmětu: *Spalovací zařízení a výměníky tepla*. 4.ročník.

---

**20. Seznam použitých zkratk a symbolů**


---

A	m	šířka desky
a	-	stupeň černosti proudu spalin
a,b,c,d,e	m	rozměry kanálu
$a_{NS}$	-	stupeň černosti nesvítivé části plamene
$a_{st}$	-	stupeň černosti stěn
$a_{SV}$	-	stupeň černosti svítivé části plamene
$c_s$	-	oprava na uspořádání svazku
$c_z$	-	oprava na počet podélných řad
D	m	vnější průměr trubky
d	m	vnitřní průměr trubky
$d_e$	m	ekvivalentní průměr kanálu
F	$m^2$	světlý průřez kanálu
$F_{is}$	$m^2$	účinná sálavá plocha stěn ohniště
$F_{st}$	$m^2$	celkový povrch stěn ohniště
h	m	délka
$h_h$	m	výška hořáků ode dna ohniště
$h_o$	m	výška ohniště
I	$kJ / m^3$	entalpie spalin
i	$kJ / m^3$	entalpie
k	$W / m^2 K$	součinitel prostupu tepla
$k_C$	$1 / m Mpa$	součinitel zeslabení sálání částicemi sazí
$k_{sp}$	$1 / m Mpa$	součinitel zeslabení sálání nesvítivými 3at. plyny
$I_U$	$kJ / kg$	užitečné teplo uvolněné v ohništi
$M_p$	$m^3 / s$	množství paliva přivedeného do kotle
$M_{pv}$	$m^3 / s$	skutečné množství spáleného paliva
$M_{pp}$	kg/s	množství přehřáté páry
$M_{vsII}$	kg/s	druhý regulační vstřík
$M_{vsI}$	kg/s	první regulační vstřík
O	m	obvod
$O_{2min}$	$m^3 / m^3$	minimální množství kyslíku
$O_{H_2O}$	$m^3 / m^3$	skutečné množství vodní páry
$O_{spmin}$	$m^3 / m^3$	minimální množství spalin
$O_{vzd}$	$m^3 / m^3$	skutečné množství vzduchu
$O_{sp}^s$	$m^3 / m^3$	minimální množství suchých spalin
$O_{sp}$	$m^3 / m^3$	skutečné množství spalin
$O_{vzdmin}$	$m^3 / m^3$	minimální množství vlhkého vzduchu
$O_{vzd}^s$	$m^3 / m^3$	minimální množství suchého vzduchu

---

## Přepočet kotle při dílčím výkonu

---

$O_{CO_2}^S$	$m^3 / m^3$	objem $CO_2$ ve spalinách
$O_{N_2}^S$	$m^3 / m^3$	objem $N_2$ ve spalinách
$O_{Ar}^S$	$m^3 / m^3$	objem Ar ve spalinách
$O_{H_2O}^S$	$m^3 / m^3$	objem vodní páry ve spalinách
p	MPa	tlak
$p_{sp}$	MPa	parciální tlak tříatomových plynů
$Q_b$	$kJ / m^3$	bilanční teplo
$Q_C$	$kJ / m^3$	celkové teplo odebrané z plochy
$Q_v$	kW	výrobní teplo páry
$\Delta Q$	%	bilanční odchylka
$r_{H_2O}$	-	objemová koncentrace vodní páry ve spalinách
$r_{RO_2}$	-	objemová koncentrace tříatomových plynů
$r_{sp}$	-	objemová koncentrace tříatomových plynů ve sp.
s	m	účinná tloušťka sálové vrstvy
S	$m^2$	plocha
$s_1$	m	příčná rozteč
$s_2$	m	podélná rozteč
t	$^{\circ}C$	teplota
w	m/s	rychlost proudění
x	-	úhlový součinitel trubkové stěny
$z_{co}$	%	ztráta chemickým nedopalem
$z_k$	%	ztráta komínová
$z_{so}$	%	ztráta sdílením tepla do okolí
$z_2$	-	počet podélných řad
$z_1$	-	počet příčných řad
$z_c$	%	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
$\varphi_{\sigma}$	-	oprava na uspořádání svazku
$\alpha$	-	součinitel přebytku vzduchu
$\varepsilon$	-	součinitel zanesení stěn ohniště
v	$m^3 / kg$	měrný objem
v	$m^2 / s$	součinitel kinematické viskozity
$\alpha_s$	$W / m^2 K$	součinitel přestupu tepla sáláním
$\alpha$	$W / m^2 K$	celkový součinitel přestupu tepla ze strany spalin
$\alpha_2$	$W / m^2 K$	celkový součinitel přestupu tepla ze strany páry
$\beta_{ovz}$	-	součinitel přebytku vzduchu
$\Delta t$	$^{\circ}C$	střední logaritmický teplotní spád
$\mathcal{G}_a$	$^{\circ}C$	teoretická adiabatická teplota
$\mathcal{G}_0$	$^{\circ}C$	teplota spalin na výstupu z ohniště
$\eta_k$	%	tepelná účinnost kotle

---

## Přepočet kotle při dílčím výkonu

---

$v_k$	°C	teplota spalin za kotlem
$\sigma_2$	-	podélná rozteč
$\sigma_1$	-	příčná rozteč
$\psi$	-	součinitel tepelné efektivity stěn
$\lambda$	$W / mK$	součinitel tepelné vodivosti
$\varphi$	-	součinitel uchování tepla
Pr	-	Prandtlovo číslo
$\omega$	-	Součinitel omývání

## Dolní indexy

s,sp	spaliny
p	pára
1	vstup
2	výstup
př	příčné proudění
pod	podélné proudění
stř	střední hodnota
syt	teplota sytosti
z	teplota vnějšího povrchu
in	vstupní hodnota
out	výstupní hodnota
vz	vzduch
nv	napájecí voda
OVZ	ohřívač vzduchu
EKO	ekonomizér

**21. Seznam příloh**

Výkres kotle.