



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## NÁVRH PARNÍHO PLYNOVÉHO KOTLE

GAS STEAM BOILER DESIGN

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Vacek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

BRNO 2021



# Zadaní diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	<b>Bc. Jiří Vacek</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.</b>
Akademický rok:	2020/21

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:

## Návrh parního plynového kotle

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte parní bubnový plynový kotel 200 t/h, 10,5 MPa, 540 °C s přirozenou cirkulací parovodní směsi ve výparníku. Teplota napájecí vody je 115 °C. Jako palivo bude sloužit zemní plyn. Kotel navrhněte s vysokou účinností s ohledem na maximální obsah 60 mg/m<sup>3</sup> NO<sub>x</sub> ve spalinách.

### Cíle diplomové práce:

- provést stechiometrické výpočty,
- provést tepelný výpočet kotle včetně rozměrového návrhu kotle,
- stanovit účinnost kotle,
- stanovit teploty rosného bodu spalin,
- vypracovat výkresovou dokumentaci.

### Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019. ISBN 978-80-214-5769-7.

ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. Parní kotle: technický průvodce svazek 32. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce (SNTL-Nakladatelství technické literatury).

BUDAJ, Florian. Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet. 4. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992.

DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03757-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Cílem této diplomové práce je návrh parního plynového kotle s parním výkonem 200 t/hod. V první části práce jsou provedeny stechiometrické výpočty, na které navazuje výpočet rosného bodu, účinnosti kotle a množství paliva. Dále je proveden výpočet spalovací komory a její rozměrový návrh, po kterém jsou navrženy tepelné bilance jednotlivých ploch. Dále jsou geometricky navrženy jednotlivé plochy. Na závěr jsou provedeny kontrolní výpočty. Práce obsahuje výkres kotle.

### **Klíčová slova**

Plynový parní kotel, zemní plyn, tepelný návrh

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is a draft of a gas steam boiler with steam output of 200 t/h. The first part of the paper provides stoichiometric calculations, then there are calculations of the dew point, boiler efficiency and the amount of gas. After that, calculations and a draft of the combustion chamber are carried out and then heat balances are drafted. In the following text, geometric properties of individual heat exchanging surfaces are drafted. At the end, there are control calculations. This thesis contains a blueprint of the gas steam boiler.

### **Key words**

Gas steam boiler, natural gas, thermal design

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VACEK, Jiří. Návrh parního plynového kotle. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132078>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Zdeněk Skála.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh parního plynového kotle vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

\_\_\_\_\_  
*Jiří Vacek*

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Michalu Pecháčkovi a doc. Ing. Zdeňku Skálovi, CSc. za cenné připomínky a rady, které mi poskytli při vypracování této závěrečné práce. Dále děkuji všem vyučujícím, kteří se podíleli na mé výuce. Samozřejmě děkuji i své rodině a všem blízkým za podporu při studiu.



## OBSAH

1. Úvod .....	11
2. Stechiometrické výpočty .....	12
2.1. Minimální objem vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1Nm <sup>3</sup> plynu. ....	12
2.2. Objemy složek spalin při stechiometrickém spalování $\alpha = 1$ .....	12
2.3. Výpočet skutečného množství vzduchu a spalin.....	13
2.4. Entalpie spalin, spalovacího vzduchu a I-t diagram.....	14
3. Rosný bod, základní tepelná bilance, ztráty .....	17
3.1. Určení rosného bodu spalin.....	17
3.2. Tepelná bilance .....	17
3.3. Ztráty a účinnost kotle.....	18
3.4. Výrobní teplo páry a množství paliva .....	18
4. Výpočet spalovací komory .....	19
4.1. Návrh základních rozměrů ohniště.....	19
4.2. Výpočet teploty spalin na výstupu ze spalovací komory .....	21
5. Tepelné bilance jednotlivých ploch na straně vody/páry .....	24
5.1. Přehřívák P3 .....	24
5.2. Přehřívák P2 .....	25
5.3. Přehřívák P1 .....	26
5.4. Přehřívák stěnový P0 a závěsné trubky ZT.....	27
5.5. Výparník.....	28
5.6. Ekonomizér .....	28
5.6. Celkové přijaté teplo vodou/párou .....	28
6. Návrh prvního tahu.....	29
6.1. Návrh oblasti přehříváku P3.....	29
6.2. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti P3.....	31
6.3. Tepelný výpočet přehříváku P3 .....	33
6.4. Tepelný výpočet závěsných trubek v oblasti P3 .....	35
6.5. Celková tepla v oblasti P3.....	37
6.6. Návrh oblasti přehříváku P2.....	38
6.7. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti P2.....	39
6.8. Tepelný výpočet přehříváku P2 .....	41
6.9. Tepelný výpočet závěsných trubek v oblasti P2 .....	44
6.10. Celková tepla v oblasti P2.....	45
7. Návrh obratových komor a mříže .....	46
7.1. Návrh oblasti obratové komory OK1 .....	46
7.2. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti OK1 .....	47
7.3. Tepelný výpočet přehříváku P0 v oblasti OK1 .....	49
7.4. Tepelný výpočet závěsných trubek v oblasti OK1.....	51
7.5. Celková tepla v oblasti OK1 .....	53
7.6. Tepelný výpočet mříže .....	53
7.7. Celková tepla v oblasti mříže.....	57
7.8. Návrh oblasti obratové komory OK2.....	58
7.9. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti OK2 .....	59

7.10. Tepelný výpočet přehříváku P0 v oblasti OK2 .....	61
7.11. Celková tepla v oblasti OK2.....	63
8. Návrh druhého tahu.....	64
8.1. Návrh oblasti přehříváku P1 .....	64
8.2. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti P1 .....	66
8.2. Tepelný výpočet přehříváku P1 .....	68
8.3. Tepelný výpočet přehříváku P0 v oblasti P1 .....	70
8.4. Celková tepla v oblasti P1 .....	72
8.5. Návrh oblasti ekonomizéru EKO1 .....	72
8.6. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti EKO1 .....	74
8.7. Tepelný výpočet ekonomizéru EKO1 .....	76
8.8. Tepelný výpočet přehříváku P0 v oblasti EKO1 .....	78
8.9. Celková tepla v oblasti EKO1 .....	80
9. Návrh obrátového výstupního prostoru.....	81
9.1. Návrh obrátové komory OK3 .....	81
9.2. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti OK3.....	82
9.3. Celková tepla v oblasti OK3.....	84
10. Návrh plechového kanálu.....	85
10.1. Návrh oblasti ekonomizéru EKO2 .....	85
10.2. Tepelný výpočet ekonomizéru EKO2.....	86
10.3. Celková tepla v oblasti EKO2 .....	89
10.4. Návrh ohříváku vzduchu OVZ .....	89
10.4. Tepelný výpočet ohříváku vzduchu OVZ.....	90
10.5. Celková tepla v oblasti OVZ .....	92
11. Schéma kotle, pilový diagram a kontrolní výpočty .....	93
11.1. Schéma kotle.....	93
11.2. Pilový diagram.....	94
11.3. Kontrolní výpočty.....	95
12. Diskuse.....	96
13. Závěr .....	97
14. Seznam použitých zdrojů .....	98
15. Seznam použití symbolů a zkratk.....	99
Seznam příloh .....	102

## 1. Úvod

Politicko-ekologický tlak na ukončení spalování uhlí vede k hledání jiného velmi pružného zdroje výroby elektřiny pro pokrytí výkyvů denní spotřeby elektrické energie. Tímto zdrojem pravděpodobně bude z velké části zemní plyn, který bude užit jak při spalování přímo pro spalovací turbíny a případném využití v kotli na odpadní teplo, tak v parním kotli, čímž se tato diplomová práce zabývá. Zemní plyn lze získat několika cestami. První cestou je jeho přímá těžba a následný import plynovody či ve zkapalnělé podobě. Druhou cestou je jeho extrakce z biologických procesů, ať již z procesů, jejichž cílem je tvorba bioplynu, nebo ať jsou to zařízení s jiným primárním cílem, např. čističky odpadních vod. Třetí možností zisku metanu je katalytická syntéza oxidu uhličitého s vodíkem.

Výhodou metanu či jiných plynných uhlovodíkových paliv je jednoduchost jejich palivového hospodářství a minimální zanášení výhřevných ploch vzhledem k palivům tuhým. Oproti tuhým palivům odpadá nutnost zachytu popílku v ESO nebo v jiných technologiích, výhodou i oproti kapalným palivům je nulový podíl síry v palivu, a tedy není nutná technologie pro odsíření. Výhoda nad tuhými palivy je také v tom, že se příliš nemění vlastnosti spalovaného paliva. Nevýhodou je cena ušlechtilého paliva, která způsobuje vysoké provozní náklady.

V první části se tato práce zabývá stechiometrií spalování, následované ztrátami kotle, rosným bodem a množstvím potřebného paliva. Dále následuje návrh spalovací komory, po kterém jsou navrženy tepelné bilance. Nakonec přichází vlastní návrh jednotlivých teplosměnných ploch. Na závěr vlastních výpočtů je uvedeno schéma kotle, pilový diagram a jako poslední jsou provedeny kontrolní výpočty. Konstrukce kotle je zavěšená, tedy ta, jež se používá pro kotle větších výkonů.

## 2. Stechiometrické výpočty

### 2.1. Minimální objem vzduchu potřebného pro dokonalé spálení $1\text{Nm}^3$ plynu.

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení  $1\text{Nm}^3$  plynu

$$\begin{aligned}
 O_{O_2min} &= \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) \cdot o_{C_mH_n} \\
 &= 2 \cdot 0,9743 + 3,5 \cdot 0,0102 + 5 \cdot 0,0032 + 6,5 \cdot 0,0011 \\
 &\quad + 8 \cdot 0,0003 \\
 O_{O_2min} &= 2,00985 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3_{pal}} \right]
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro spálení  $1\text{Nm}^3$  plynu

$$O_{VSmin} = \frac{O_{O_2min}}{0,21} = \frac{2,00985}{0,21} = 9,57071 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3_{pal}} \right] \tag{2.2}$$

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro spálení  $1\text{Nm}^3$  plynu

$$O_{VVmin} = \chi_v \cdot O_{VSmin} = 1,016 \cdot 9,57071 = 9,72384 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3_{pal}} \right] \tag{2.3}$$

$$\begin{aligned}
 \chi_v &= 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} = 1 + \frac{70}{100} \cdot \frac{0,0023368}{0,1 - \frac{70}{100} \cdot 0,0023368} \\
 \chi_v &= 1,016 [-]
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Pro běžné klimatické podmínky  $\varphi = 70\%$ ,  $t_v = 20^\circ\text{C}$ ,  $p_c = 0,1\text{ MPa}$  platí  $p'' = 0,0023368\text{ MPa}$ .

**Objem vodní páry v objemu vlhkého vzduchu**

$$\begin{aligned}
 O_{H_2O}^V &= O_{VVmin} - O_{VSmin} = 9,72384 - 9,57071 \\
 O_{H_2O}^V &= 0,15313 \left[ \text{Nm}^3 / \text{Nm}^3 \right]
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

### 2.2. Objemy složek spalin při stechiometrickém spalování $\alpha = 1$ Objem oxidu uhličitého v suchých spalinách

$$\begin{aligned}
 O_{CO_2min} &= 0,0004 \cdot O_{VSmin} + 0,944 \cdot \sum m \cdot o_{C_mH_n} \\
 &= 0,0004 \cdot 9,57071 + 0,0029 \\
 &\quad + 0,944 (1 \cdot 0,9743 + 2 \cdot 0,0102 + 3 \cdot 0,0032 + 4 \\
 &\quad \cdot 0,0011 + 5 \cdot 0,0003) \\
 O_{CO_2min} &= 1,01693 \left[ \text{Nm}^3 / \text{Nm}^3_{pal} \right]
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

### Objem dusíku v suchých spalínách

$$\begin{aligned} O_{N_2min} &= o_{N_2} + 0,7805 \cdot O_{VSmin} = 0,008 + 0,7805 \cdot 9,57071 \\ O_{N_2min} &= 7,47794 [Nm^3/Nm^3_{pal}] \end{aligned} \quad (2.7)$$

### Objem argonu v suchých spalínách

$$\begin{aligned} O_{Armin} &= 0,0092 \cdot O_{VSmin} = 0,0092 \cdot 9,57071 \\ O_{Armin} &= 0,08805 [Nm^3/Nm^3_{pal}] \end{aligned} \quad (2.8)$$

### Výsledný objem suchých spalín

$$\begin{aligned} O_{SSmin} &= O_{CO_2min} + O_{N_2min} + O_{Ar} = 1,01693 + 7,47794 + 0,08805 \\ O_{SSmin} &= 8,58292 [Nm^3/Nm^3_{pal}] \end{aligned} \quad (2.9)$$

### Objem vodní páry ve spalínách

$$\begin{aligned} O_{H_2Omin}^S &= \sum \frac{n}{2} \cdot o_{C_mH_n} \\ &= 2 \cdot 0,9743 + 3 \cdot 0,0102 + 4 \cdot 0,0032 + 5 \cdot 0,0011 + 6 \cdot 0,0003 \\ O_{H_2Omin}^S &= 1,99930 [Nm^3/Nm^3_{pal}] \end{aligned} \quad (2.9)$$

### Objem vlhkých spalín

$$\begin{aligned} O_{SVmin} &= O_{SSmin} + O_{H_2Omin}^V = 8,58292 + 1,99930 \\ O_{SVmin} &= 10,58222 [Nm^3/Nm^3_{pal}] \end{aligned} \quad (2.10)$$

## 2.3. Výpočet skutečného množství vzduchu a spalín

U kotlů na plynná paliva je obvykle volen přebytek vzduchu  $\alpha$  mezi 1,05 a 1,15. Na doporučení konzultanta je volen přebytek vzduchu 1,05. Přisávání falešného vzduchu není možné z důvodu přetlakové konstrukce kotle.

### Skutečný objem oxidu uhličitého v suchých spalínách

$$\begin{aligned} O_{CO_2} &= O_{CO_2min} + (1 - \alpha) \cdot O_{VSmin} \cdot 0,0004 \\ &= 1,01693 + (1 - 1,05) \cdot 9,57071 \cdot 0,0004 \\ O_{CO_2} &= 1,01712 [Nm^3/Nm^3_{pal}] \rightarrow x_{CO_2} = 0,11225 \end{aligned} \quad (2.11)$$

### Skutečný objem dusíku v suchých spalínách

$$\begin{aligned} O_{N_2} &= O_{N_2min} + (1 - \alpha) \cdot O_{VSmin} \cdot 0,7805 \\ &= 7,47794 + (1 - 1,05) \cdot 9,57071 \cdot 0,7805 \\ O_{N_2} &= 7,85144 [Nm^3/Nm^3_{pal}] \rightarrow x_{N_2} = 0,86648 \end{aligned} \quad (2.12)$$

### Skutečný objem argonu v suchých spalínách

$$\begin{aligned}
 O_{Ar} &= O_{Armin} + (1 - \alpha) \cdot O_{VSmin} \cdot 0,0092 \\
 &= 0,08805 + (1 - 1,05) \cdot 9,57071 \cdot 0,0092 \\
 O_{Ar} &= 0,09245 \text{ [Nm}^3\text{/Nm}^3_{pal}] \rightarrow x_{Ar} = 0,01020
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

#### Skutečný objem kyslíku v suchých spalinách

$$\begin{aligned}
 O_{O_2} &= (1 - \alpha) \cdot O_{VSmin} \cdot 0,2095 = (1 - 1,05) \cdot 9,57071 \cdot 0,2095 \\
 O_{O_2} &= 0,10025 \text{ [Nm}^3\text{/Nm}^3_{pal}] \rightarrow x_{O_2} = 0,01106
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

#### Skutečné množství suchého vzduchu pro spálení 1 Nm<sup>3</sup> plyn

$$\begin{aligned}
 O_{VS} &= O_{VSmin} \cdot \alpha = 9,57071 \cdot 1,05 \\
 O_{VS} &= 10,04925 \text{ [Nm}^3\text{/Nm}^3_{pal}]
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

#### Skutečné množství vlhkého vzduchu pro spálení 1 Nm<sup>3</sup> plyn

$$\begin{aligned}
 O_{VV} &= O_{VS} \cdot \chi_v = 10,04925 \cdot 1,016 \\
 O_{VV} &= 10,21003 \text{ [Nm}^3\text{/Nm}^3_{pal}]
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

#### Skutečný objem suchých spalin při spálení 1 Nm<sup>3</sup> plyn

$$\begin{aligned}
 O_{SS} &= O_{SSmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin} = 8,58292 + (1,05 - 1) \cdot 9,57071 \\
 O_{SS} &= 9,06145 \text{ [Nm}^3\text{/Nm}^3_{pal}]
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

#### Skutečný objem vlhkých spalin při spálení 1 Nm<sup>3</sup> plynu

$$\begin{aligned}
 O_{SV} &= O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin} = 10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384 \\
 O_{SV} &= 11,55460 \text{ [Nm}^3\text{/Nm}^3_{pal}] \rightarrow x_{H_2O} = 0,21577
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

#### Recirkulace

Součinitel recirkulace  $r = \frac{v_{SV}^r}{v_{SV}}$ , byl po konzultaci stanoven na hodnotu 0,15. V tomto návrhu je recirkulace užita ke snížení tvorby NOx.

$$\begin{aligned}
 O_{SV}^r &= O_{SV} \cdot (1 + r) = 11,55460 \cdot (1 + 0,15) \\
 O_{SV}^r &= 13,28779 \text{ [Nm}^3\text{/Nm}^3_{pal}]
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

#### 2.4. Entalpie spalin, spalovacího vzduchu a I-t diagram

$t$	$CO_2$	$N_2$	$Ar$	$H_2O$	vzduch suchý	$O_2$
[°C]	[kJ/Nm <sup>3</sup> ]	[kJ/Nm <sup>3</sup> ]	[kJ/Nm <sup>3</sup> ]	[kJ/Nm <sup>3</sup> ]	[kJ/Nm <sup>3</sup> ]	[kJ/Nm <sup>3</sup> ]
25	41,62	32,53	23,32	39,10	32,57	32,78
100	170,0	129,5	93,07	150,6	132,3	131,7
200	357,5	259,9	186,0	304,5	266,2	267,0
300	558,8	392,1	278,8	462,8	402,5	406,8
400	771,9	526,7	371,7	625,9	541,7	550,9
500	994,4	664,0	464,7	794,5	684,1	698,7
600	1225	804,3	557,3	968,8	829,6	849,9

700	1462	947,3	650,2	1149	978,1	1003
800	1705	1093	743,1	1335	1129	1159
900	1952	1241	835,7	1526	1283	1318
1000	2203	1392	928,2	1723	1439	1477
1100	2458	1544	1020	1925	1597	1638
1200	2716	1698	1114	2132	1756	1802
1300	2976	1853	1207	2344	1916	1965
1400	3239	2009	1300	2559	2077	2129
1500	3503	2166	1393	2779	2240	2293
1600	3769	2325	1577	3002	2403	2465
1800	4305	2643	1742	3458	2732	2804
2000	4844	2965	1857	3925	3065	3138
2500	6204	3778	2321	5132	3939	4006

Tabulka 1: Měrná entalpie složek spalin  $i_i^t$  [kJ/Nm<sup>3</sup>] v závislosti na teplotě  $t$  [°C]

Následující výpočty jsou ukázkové pro teplotu **100 °C** a  $\alpha = 1,05$ .

#### Entalpie minimálního objemu vlhkých spalin

$$I_{SVmin}^t = O_{CO_2min} \cdot i_{CO_2min}^t + O_{N_2min} \cdot i_{N_2min}^t + O_{Armin} \cdot i_{Armin}^t + O_{H_2Omin}^S \cdot i_{H_2Omin}^t$$

$$= 1,1017 \cdot 170,0 + 7,4779 \cdot 129,5 + 0,0881 \cdot 93,07 + 1,9993 \cdot 150,6 \quad (2.20)$$

$$I_{SVmin}^t = 1450,5607 \text{ [kJ/Nm}^3\text{]}$$

#### Entalpie minimálního množství vlhkého vzduchu

$$I_{VVmin}^t = O_{VSmin} \cdot i_{VS}^t + O_{H_2Omin}^V \cdot i_{H_2Omin}^t$$

$$= 9,5707 \cdot 132,3 + 0,15313 \cdot 150,6 \quad (2.21)$$

$$I_{VVmin}^t = 1289,2649 \text{ [kJ/Nm}^3\text{]}$$

#### Entalpie spalin při spalování s přebytkem vzduchu $\alpha$

$$I_{SV}^{t,\alpha} = I_{SVmin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{VVmin}^t = 1450,5607 + (1,05 - 1) \cdot 1289,2649 \quad (2.22)$$

$$I_{SV}^{t,\alpha} = 1515,0240 \text{ [kJ/Nm}^3\text{]}$$

#### Entalpie spalin při spalování s přebytkem vzduchu $\alpha$

$$I_{SV}^r = I_{SV}^{t,\alpha} \cdot (1 + r) = 1515,0240 \cdot (1 + 0,15) \quad (2.23)$$

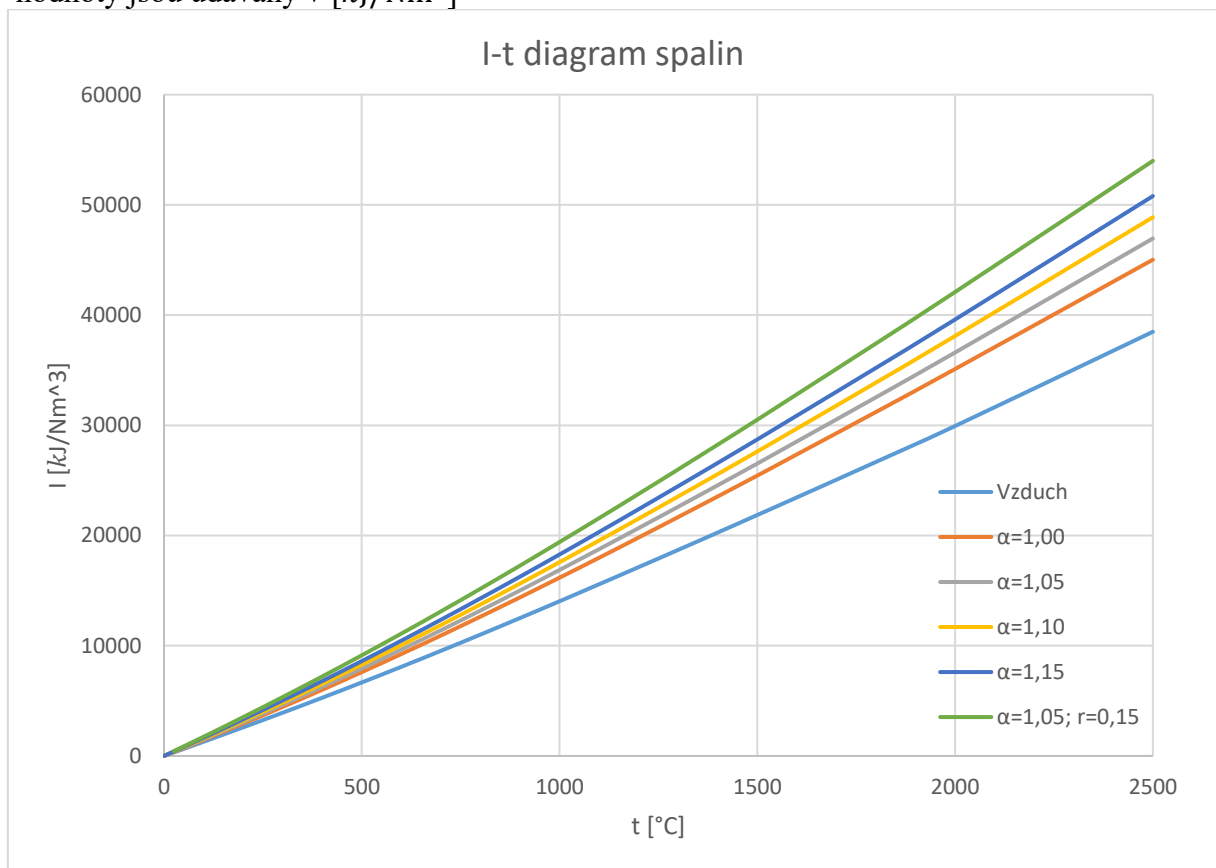
$$I_{SV}^r = 1742,2776 \text{ [kJ/Nm}^3\text{]}$$

$t$	$I_{SVmin}^t$	$I_{VVmin}^t$	$I_{SV}^{t,\alpha}$	$I_{SV}^{t,\alpha}$	$I_{SV}^{t,\alpha}$	$I_{SV}^{t,\alpha}$	$I_{SV}^{t,\alpha,r}$
[°C]			$\alpha = 1,00$	$\alpha = 1,05$	$\alpha = 1,10$	$\alpha = 1,15$	$\alpha = 1,05$ $r = 0,15$
<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>
<b>25</b>	365,80797	317,7051	365,808	<b>381,6932</b>	397,5785	413,4637	<b>438,9472</b>
<b>100</b>	1450,561	1289,265	1450,561	<b>1515,024</b>	1579,487	1643,95	<b>1742,278</b>
<b>200</b>	2932,2332	2594,348	2932,233	<b>3061,951</b>	3191,668	3321,385	<b>3521,243</b>
<b>300</b>	4450,1851	3923,075	4450,185	<b>4646,339</b>	4842,493	5038,646	<b>5343,29</b>
<b>400</b>	6007,6893	5280,292	6007,689	<b>6271,704</b>	6535,719	6799,733	<b>7212,46</b>
<b>500</b>	7605,948	6668,978	7605,948	<b>7939,397</b>	8272,846	8606,295	<b>9130,306</b>

<b>600</b>	9246,2385	8088,205	9246,238	<b>9650,649</b>	10055,06	10459,47	<b>11098,25</b>
<b>700</b>	10925,05	9537,048	10925,05	<b>11401,9</b>	11878,75	12355,61	<b>13112,19</b>
<b>800</b>	12641,75	11009,75	12641,75	<b>13192,24</b>	13742,72	14293,21	<b>15171,07</b>
<b>900</b>	14389,686	12512,88	14389,69	<b>15015,33</b>	15640,97	16266,62	<b>17267,63</b>
<b>1000</b>	16176,111	14036,08	16176,11	<b>16877,92</b>	17579,72	18281,52	<b>19409,6</b>
<b>1100</b>	17984,017	15579,18	17984,02	<b>18762,98</b>	19541,94	20320,89	<b>21577,42</b>
<b>1200</b>	19820,119	17132,62	19820,12	<b>20676,75</b>	21533,38	22390,01	<b>23778,26</b>
<b>1300</b>	21675,642	18696,4	21675,64	<b>22610,46</b>	23545,28	24480,1	<b>26002,03</b>
<b>1400</b>	23547,691	20270,2	23547,69	<b>24561,2</b>	25574,71	26588,22	<b>28245,38</b>
<b>1500</b>	25438,232	21863,92	25438,23	<b>26531,43</b>	27624,62	28717,82	<b>30511,14</b>
<b>1600</b>	27359,773	23458,09	27359,77	<b>28532,68</b>	29705,58	30878,49	<b>32812,58</b>
<b>1800</b>	31209,042	26676,68	31209,04	<b>32542,88</b>	33876,71	35210,54	<b>37424,31</b>
<b>2000</b>	35108,862	29935,23	35108,86	<b>36605,62</b>	38102,39	39599,15	<b>42096,47</b>
<b>2500</b>	45025,463	38484,85	45025,46	<b>46949,71</b>	48873,95	50798,19	<b>53992,16</b>

Tabulka 2 Entalpie spalin o různých přebytecích vzduchu v závislosti na teplotě

hodnoty jsou udávány v  $[kJ/Nm^3]$



Obrázek 1: I-t diagram spalin



### 3. Rosný bod, základní tepelná bilance, ztráty

#### 3.1. Určení rosného bodu spalín

##### Střední zdánlivá molární hmotnost suchých spalín

$$M = \sum_i M_i \cdot x_i = 44 \cdot 0,11225 + 28 \cdot 0,86648 + 40 \cdot 0,01020 + 32 \cdot 0,01106 \quad (3.1)$$

$$M = 29,96236 \text{ [kg/kmol]}$$

##### Měrná plynová konstanta suchých spalín

$$r_{ss} = \frac{R_m}{M} = \frac{8314}{29,96236} \quad (3.2)$$

$$r_{ss} = 277,48148 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]}$$

##### Měrná vlhkost

$$x = \frac{M_{H_2O} \cdot x_{H_2O}}{M} = \frac{18 \cdot 0,21577}{29,96236} \quad (3.3)$$

$$x = 0,12963 \text{ [kg/kg s. v.]}$$

##### Parciální tlak vodní páry

$$p_{vp} = \frac{x \cdot p_c}{\frac{r_{ss}}{r_{vp}} + x} = \frac{0,12963 \cdot 100000}{\frac{277,48}{461,5} + 0,12963} \quad (3.4)$$

$$p_{vp} = 17970 \text{ Pa}$$

##### Teplota rosného bodu

Teplota rosného bodu je určena z TD tabulek.

$$t_{rb} = 57,76 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

#### 3.2. Tepelná bilance

##### Redukovaná výhřevnost

$$Q_{i \text{ red}} = Q_i^r + i_{pv} + Q_{cizí} + Q_S^{rec} = 35,99 + 0,04452 + 0,33876 + 0,22224 \quad (3.6)$$

$$Q_{i \text{ red}} = 36,601 \text{ [MJ/Nm}^3\text{]}$$

$Q_{cizí}$  je teplo přivedené cizím zdrojem, v tomto případě je to teplo užitá v POV, parním ohříváku vzduchu, pro ohřátí vzduchu z 20 °C na 45 °C.

$$Q_{cizí} = \beta'_{ovz} \cdot (I_{VVmin}^{45} - I_{VVmin}^{20}) = 1,05 \cdot (576,79 - 254,16) \quad (3.7)$$

$$Q_{cizí} = 338,76 \text{ [kJ/Nm}^3\text{]}$$

$Q_S^{rec}$  je teplo přivedené v recirkulovaných spalínách – teplota spalín do komína je stanovena na 84 °C.

$$Q_S^{rec} = r \cdot I_{SV}^{tr, \alpha_r, r} = 0,15 \cdot 1481,61 \quad (3.8)$$

$$Q_S^{rec} = 222,242 \text{ [kJ/Nm}^3\text{]}$$

$i_{pv}$  je citelné teplo palivem přiváděné do kotle ( $t_{pal} = 20^\circ\text{C}$ ) a je rovno 44,52 [kJ/Nm<sup>3</sup>].

### 3.3. Ztráty a účinnost kotle

#### Ztráty irelevantní a ztráta zanedbaná

Ztráta mechanickým nedopalem a ztráta citelným teplem tuhých zbytků se v kotlích na plynná paliva nemohou ze své podstaty vyskytnout. Ztráta chemickým nedopalem je po odborné konzultaci zanedbána, z důvodu její mizivé hodnoty.

#### Ztráta sáláním do okolí

Odečtena z diagramu.

$$Z_{SV} = 0,0052 \quad (3.9)$$

#### Komínová ztráta

Teplota spalin na výstupu z kotle je volena na 84 °C.

$$Z_k = \frac{I_{SV}^{84,\alpha,r} - I_{SV}^{20,\alpha,r}}{Q_{ired}} = \frac{1464,23 - 351,157}{36634,696} \quad (3.10)$$

$$Z_k = 0,0303 [-]$$

#### Účinnost kotle

$$\eta_k = 1 - Z_{SV} - Z_k = 1 - 0,0052 - 0,0303 \quad (3.11)$$

$$\eta_k = 0,9644[-]$$

### 3.4. Výrobní teplo páry a množství paliva

#### Výrobní teplo páry

$$M_{pp} = 200 \text{ t/hod}; i_{pp}(10,5 \text{ MPa}, 540^\circ\text{C}); i_{nv}(11,4 \text{ MPa}; 115^\circ\text{C})$$

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) = 55,55 \cdot (3471,642 - 490,618) \quad (3.12)$$

$$Q_v = 165,596 \text{ [MW]}$$

#### Skutečné množství paliva přivedeného

$$M_{pal} = \frac{Q_v}{Q_{ired} \cdot \eta_k} = \frac{165,612}{36,601 \cdot 0,9644} \quad (3.13)$$

$$M_{pal} = 4,6917 \text{ [Nm}^3\text{/s]}$$

#### 4. Výpočet spalovací komory

Ohniště je tvořeno membránovou stěnou s trubkami o průměru 60,3 mm, tloušťkou stěny 5 mm, rozteč trubek membránové stěny je 80 mm.

##### 4.1. Návrh základních rozměrů ohniště

Dle konzultace volím šest čelních hořáků ve dvou výškových hladinách. Hořáky jsou vyráběny na poptávku, není tedy nutné držet se katalogu.

##### Návrh výkonu jednoho hořáku

$$Q_{1hoř} = M_{pal} \cdot Q_i \cdot \frac{1}{6} = 4,69 \cdot 35,99 \cdot \frac{1}{6} \quad (4.1)$$

$$Q_{1hoř} = 28,132 \text{ [MW]}$$

##### Výpočet délky L a průměru plamene D

$$L = Q_{1hoř}^{0,33} \cdot 2,22 + 0,5 = 28,132^{0,33} \cdot 2,22 + 0,5$$

$$L \doteq 7,320 \text{ [m]} \quad (4.2)$$

$$D = Q_{1hoř}^{0,33} \cdot 0,4 + 0,5 = 29^{0,33} \cdot 0,4 + 0,5$$

$$D \doteq 1,72 \text{ [m]}$$

##### Plošné zatížení ohniště

Plošné rozměry a, b volím tak, že a je nejbližší větší číslo L dělitelné 0,08. b je nejbližší větší číslo trojnásobku D a zároveň je dělitelné 0,08.

$$a = 7,36 \text{ [m]}$$

$$b = 5,20 \text{ [m]}$$

$$q_s = \frac{M_{pal} \cdot Q_i}{n_{řadhořáků} \cdot S_o} = \frac{4,69 \cdot 35,99}{2 \cdot 38,272} \quad (4.3)$$

$$q_s = 2,2 \text{ [MW/m}^2\text{]}$$

##### Objemové zatížení ohniště

Objemové zatížení ohniště volím 400 [kW/m<sup>3</sup>].

$$V_o = \frac{M_{pal} \cdot Q_i}{q_v} = \frac{4,69 \cdot 35990}{400} \quad (4.4)$$

$$V_o = 422,8 \text{ [m}^3\text{]}$$

##### Přibližná výška ohniště

$$h_o = \frac{V_o}{S_o} = \frac{422,8}{38,272} \quad (4.5)$$

$$h_o = 11,05 \text{ [m]}$$

##### Skutečné objemové zatížení ohniště

Po odborné konzultaci byl přidán první metr prvního tahu ke spalovací komoře.

$$q_v = \frac{M_{pal} \cdot Q_i}{V_o} = \frac{4,69 \cdot 35990}{442,0416} \quad (4.6)$$

$$q_v = 382,58 \text{ [kW/m}^3\text{]}$$

##### Projekční povrch stěn ohniště

$$S_{st} = 2 \cdot 3,77 \cdot 5,2 + 2 \cdot 7,36 \cdot 0,5 \cdot 0,8 + 9 \cdot 5,2 + 11,2 \cdot 5,2 + 2$$

$$\cdot (11,2 \cdot 7,36 - 0,5 \cdot 2,2 \cdot 0,5 \cdot 7,36) + 0,5 \cdot 5,2 \cdot 7,36 + 4,3 \cdot 5,2$$

$$+ 5,2 \cdot 3,68 \quad (4.7)$$

$$S_{st} = 367,5 \text{ [m}^2\text{]}$$

### Účinná sálavá plocha stěn ohniště

Na doporučení konzultanta je průměr hořáku volen 800 mm.

$$\begin{aligned}
 S_{\dot{u}s} &= S_{st} - 6 \cdot S_{1hoř} - S_{vo} + S_{\dot{u}s\ vo} = 367,5 - 6 \cdot 0,5 - 19,1 + 6,8 \\
 S_{\dot{u}s} &= 352,2 [m^2] \\
 S_{\dot{u}s\ vo} &= S_{vo} \cdot \delta \cdot y_h = 0,5 \cdot 5,2 \cdot 7,36 \cdot 0,65 \cdot 0,55 \\
 S_{\dot{u}s\ vo} &= 6,8 [m^2]
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

### Součinitel tepelné efektivity stěn

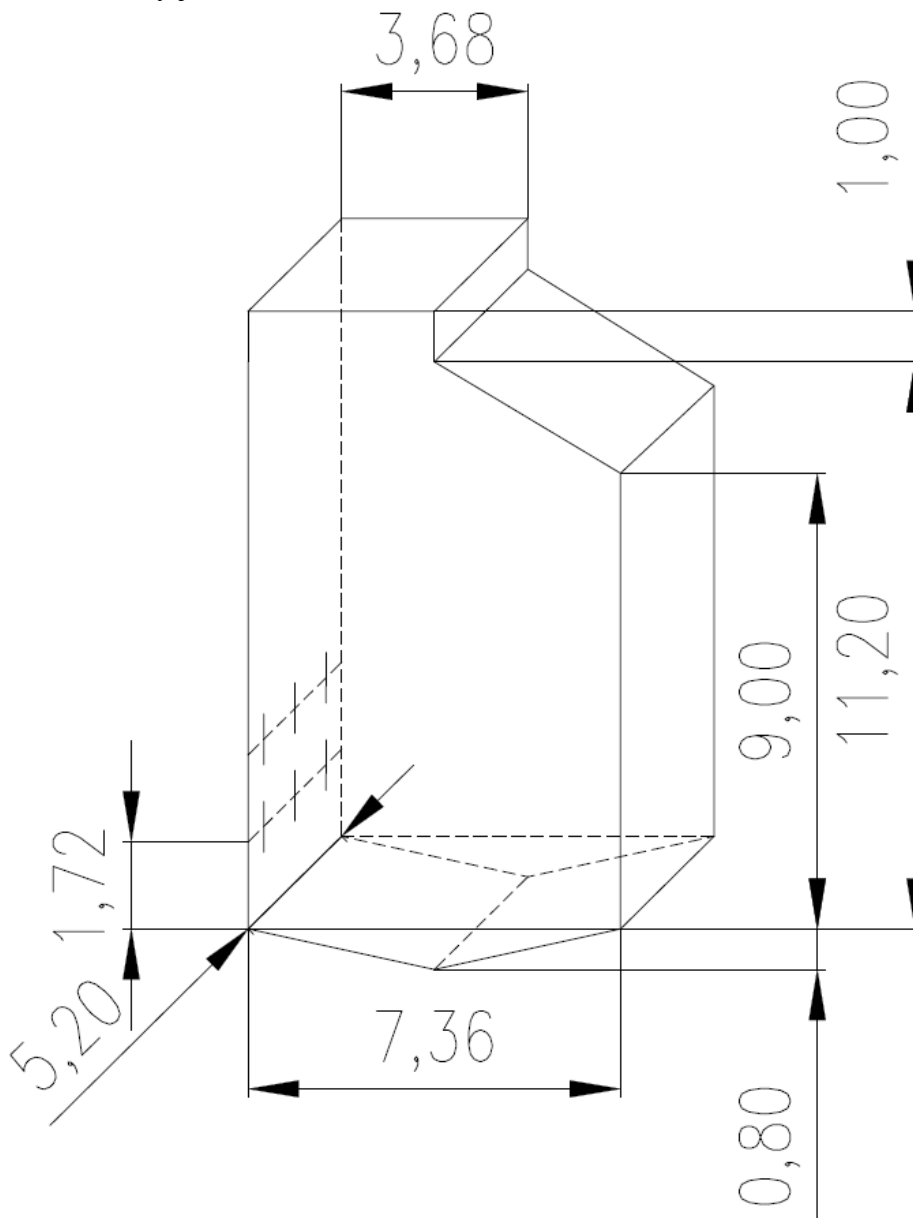
Součinitel zanesení ohniště volen 0,8 dle konzultace.

$$\bar{\psi} = \frac{\sum_i x_i \cdot \zeta_i \cdot S_i}{S_{st}} = \frac{S_{\dot{u}s} \cdot \zeta_i}{S_{st}} = \frac{352,2 \cdot 0,8}{367,5}
 \tag{4.9}$$

$$\bar{\psi} = 0,767 [-]$$

### Nákres spalovací komory

Udávané rozměry jsou v metrech.



Obrázek 2: Nákres spalovací komory

#### 4.2. Výpočet teploty spalin na výstupu ze spalovací komory

Teplotu volím dle konzultace  $t_{ok} = 1100^\circ\text{C}$  a následně počítám skutečnou. Zde provedený výpočet je pro konečnou iteraci s již reálnou teplotou  $t_{ok} = 1237,64^\circ\text{C}$ .

##### Teplota nechlazeného plamene

Spalovací vzduch z OVZ má teplotu  $100^\circ\text{C}$ . Teplo přivedené v recirkulovaných spalinách je obsaženo v  $Q_{ired}$ .

$$\begin{aligned} Q_u &= Q_{ired} + Q_V - Q_{cz} = 36,601 + 1,353 - 0,33876 \\ Q_u &= 37,616 \text{ [MJ/Nm}^3\text{]} \\ I_{np}^{t_{np}, \alpha_{ok}} &= \frac{Q_u}{1 + r_3} = \frac{37,616}{1 + 0,15} \\ I_{np}^{t_{np}, \alpha_{ok}} &= 32\,709,5 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \right] \rightarrow t_{np} = 1808,2 \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned} \quad (4.10)$$

##### Součinitel M

$$\begin{aligned} x_h &= \frac{h_h}{h_o} = \frac{2,52}{11,2} \\ x_h &= 0,225 [-] \\ \Delta x &= 0,1 [-] \\ x_{pl} &= x_h + \Delta x = 0,225 + 0,1 \\ x_{pl} &= 0,325 [-] \\ M &= 0,54 - 0,2 \cdot x_{pl} = 0,54 - 0,2 \cdot 0,325 \\ M &= 0,475 [-] \end{aligned} \quad (4.11)$$

M je menší než 0,48 je tedy splněna podmínka pro spalování plynu.

##### Boltzmannovo číslo

$$\begin{aligned} Bo &= \frac{\varphi \cdot M_{pal} \cdot (O_S \cdot \bar{c}_S)_o}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot \bar{\psi} \cdot S_{st} \cdot (273 + t_{np})^3} = \\ &= \frac{0,994 \cdot 4,699 \cdot 22,76}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot 0,767 \cdot 367,5 \cdot (273 + 1764,8)^3} \\ Bo &= 1,02 [-] \end{aligned} \quad (4.12)$$

##### Součinitel uchování tepla

$$\begin{aligned} \varphi &= 1 - \frac{z_{SV}}{\eta_k - z_{SV}} = 1 - \frac{0,0052}{0,9618 - 0,0052} \\ \varphi &= 0,994 \end{aligned} \quad (4.13)$$

##### Střední celkové měrné teplo spalin

$$\begin{aligned} (O_S \cdot \bar{c}_S)_o &= \frac{Q_u - r \cdot I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}}}{t_{np} - t_{ok}} = \frac{36613 - 24616}{1764,8 - 1237,7} \\ (O_S \cdot \bar{c}_S)_o &= 22,76 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]} \end{aligned} \quad (4.14)$$

##### Stupeň černosti ohniště

$$\begin{aligned} a_o &= \frac{a_{pl}}{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \bar{\psi}} = \frac{0,416}{0,419 + (1 - 0,419) \cdot 0,723} \\ a_o &= 0,469 \end{aligned} \quad (4.15)$$

### Součinitel zeslabení sálání částicemi sazí

$$k_{sz} = 0,306 \cdot (2 - \alpha_{ok}) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{t_{ok} + 273,15}{1000} - 0,5\right) \cdot \frac{C^r}{H^r} =$$

$$= 0,306 \cdot (2 - 1,05) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{1237,7 + 273,15}{1000} - 0,5\right) \cdot 2,98 \quad (4.16)$$

$$k_{sz} = 1,68 [-]$$

### Poměrný obsah uhlíku a vodíku pro původní vzorek plyného paliva

$$\frac{C^r}{H^r} = 0,12 \sum_i \left(\frac{m}{n}\right)_i \cdot (C_m H_n)_i =$$

$$= 0,12 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot 97,43\right) + \left(\frac{2}{6} \cdot 1,02\right) + \left(\frac{3}{8} \cdot 0,32\right) + \dots \quad (4.17)$$

$$\frac{C^r}{H^r} = 2,984 [-]$$

### Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$= \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,181}{\sqrt{0,027 \cdot 4,37}} - 1,02\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1268 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,27 \quad (4.18)$$

$$k_s \cdot r_s = 1,07$$

### Objemové podíly tříatomových plynů $r_{H_2O}$ a $r_{RO_2}$ ve spalínách $r_s$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}}{O_{SVmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}}$$

$$= \frac{1,999 + (1,016 - 1) \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,724}{10,582 + (1,05 - 1) \cdot 9,724} \quad (4.19)$$

$$r_{H_2O} = 0,181 [-]$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SVmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}} = \frac{1,017}{10,582 + (1,05 - 1) \cdot 9,724} \quad (4.20)$$

$$r_{RO_2} = 0,092 [-]$$

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,181 + 0,092 = 0,273 [-] \quad (4.21)$$

$s$  je účinná tloušťka sálové vrstvy,

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_o}{S_{st}} = 3,6 \cdot \frac{422,0}{367,5} = 4,33 [m] \quad (4.22)$$

$p_s$  je parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách  $p$  je tlak v ohništi odpovídající 0,1 MPa.

$$p_s = r_s \cdot p = 0,273 \cdot 0,1 = 0,0273 [MPa] \quad (4.23)$$

**Stupeň černosti svítivé části plamene**

$$a_{sv} = 1 - e^{-(k_s \cdot r_s + k_{sz}) \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-(1,07 + 1,66) \cdot 0,1 \cdot 4,33} = 0,694 [-] \quad (4.24)$$

**Stupeň černosti nesvítivé části plamene**

$$a_{ns} = 1 - e^{-k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,07 \cdot 0,1 \cdot 4,33} = 0,366 [-] \quad (4.25)$$

**Stupeň černosti plamene**

$$a_{pl} = m \cdot a_{sv} + (1 - m) \cdot a_{ns} = 0,1 \cdot 0,694 + (1 - 0,1) \cdot 0,366 = 0,404 [-] \quad (4.26)$$

**Teplota a entalpie spalin na konci ohniště**

$$t_{ok} = \frac{t_{np} + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{B_o}\right)^{0,6}} - 273,15 = \frac{1764,8 + 273,15}{1 + 0,475 \cdot \left(\frac{0,469}{0,785}\right)^{0,6}} - 273,15$$
$$t_{ok} = 1237,64 [^{\circ}\text{C}] \quad (4.27)$$

$$I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}} = 24606,64 [k]/\text{Nm}^3$$

**Tepelný výkon zachycený v prostoru ohniště**

$$Q_o = M_{pal} \cdot (Q_u - (1 + r) \cdot I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}} - Z_{sv}^o \cdot Q_{i \text{ red}}) =$$
$$= 4,69 \cdot (36613 - (1 + 0,15) \cdot 24606,64 - 0,0052 \cdot 36634)$$
$$Q_o = 60\,489,79 [kW] \quad (4.28)$$

### 5. Tepelné bilance jednotlivých ploch na straně vody/páry

		tlak	teplota	entalpie	hmotnostní tok	entalpický spád	výkon
		[MPa]	[°C]	[kJ/kg]	[kg/s]	[kJ/kg]	[kW]
Přehřívák 3	Out	10,5	540,00	3471,64	55,55	170,46	9469,17
	In	10,7	475,40	3301,18	55,55		
Přehřívák 2	Out	10,7	508,23	3394,09	53,77	289,31	15556,87
	In	10,9	406,56	3104,78	53,77		
Přehřívák 1	Out	10,9	461,05	3258,74	50,78	489,31	24848,18
	In	11,1	327,99	2769,43	50,78		
Závěsné trubky	Out	11,1	323,81	2744,13	25,39	41,76	1060,22
	In	11,2	319,44	2702,37	25,39		
Stěnový přehřívák	Out	11,1	332,57	2794,72	25,39	92,35	2344,74
	In	11,2	319,44	2702,37	25,39		
Výparník	Out	11,2	319,44	2702,37	50,78	1342,19	68158,74
	In	11,2	302,52	1360,18	50,78		
EKO	Out	11,2	302,52	1360,18	50,78	869,56	44157,74
	In	11,4	115,00	490,62	50,78		
Celkový tepelný výkon						165595,65	

Tabulka 3: Parametry vody/páry

#### 5.1. Přehřívák P3

##### Parametry páry na výstupu

$$t_{out}^{P3} = 540 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$p_{out}^{P3} = 10,5 \text{ [MPa]}$$

$$i_{out}^{P3} = 3471,64 \text{ [kJ/kg]}$$

##### Parametry páry na vstupu

Volím entalpický spád  $\Delta i = 170,46 \text{ [kJ/kg]}$

$$i_{in}^{P3} = i_{out}^{P3} - \Delta i = 3464,274 - 170,69 = 3301,18 \text{ [kJ/kg]} \quad (5.1)$$

$$p_{in}^{P3} = p_{out}^{P3} + \Delta p = 10,5 + 0,2 = 10,7 \text{ [MPa]} \quad (5.2)$$

$$t_{in}^{P3} = 475,40 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

##### Tepelný výkon P3

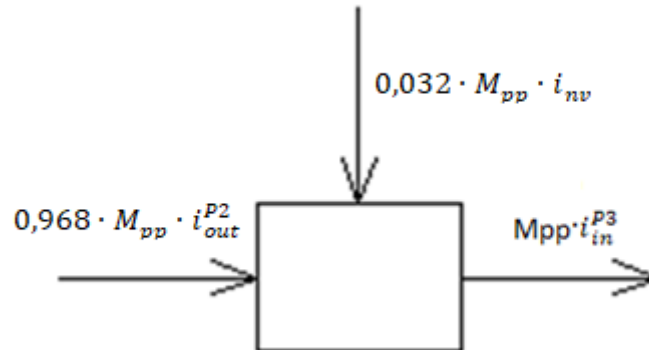
$$Q_{P3} = M_{pp} \cdot (i_{out}^{P3} - i_{in}^{P3}) = 55,55 \cdot (3471,64 - 3301,18) = 9469,17 \text{ [kW]} \quad (5.3)$$



## 5.2. Přehřívák P2

### Parametry páry na výstupu

Na výstupu z přehříváku je zařazen vstřík napájecí vody. Množství vstříku jsou 3,2%  $M_{pp}$ .



Obrázek 3: Bilanční schéma zástřiku po P2

$$M_{pp} \cdot i_{in}^{P3} = 0,968 \cdot M_{pp} \cdot i_{out}^{P2} + 0,032 \cdot M_{pp} \cdot i_{nv} \rightarrow$$

$$i_{out}^{P2} = \frac{M_{pp} \cdot i_{in}^{P3} - 0,032 \cdot M_{pp} \cdot i_{nv}}{0,968 \cdot M_{pp}} \quad (5.4)$$

$$i_{out}^{P2} = \frac{55,55 \cdot 3301,18 - 0,032 \cdot 55,55 \cdot 490,618}{0,968 \cdot 55,55} = 33894,09 \text{ [kJ/kg]}$$

$$p_{in}^{P3} = p_{out}^{P2} = 10,7 \text{ [MPa]}$$

$$t_{out}^{P2} = 508,23 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### Parametry páry na vstupu

Volím entalpický spád  $\Delta i = 288,55 \text{ [kJ/kg]}$ .

$$i_{in}^{P2} = i_{out}^{P2} - \Delta i = 3394,09 - 289,31 = 3104,78 \text{ [kJ/kg]} \quad (5.5)$$

$$p_{in}^{P2} = p_{out}^{P2} + \Delta p = 10,7 + 0,2 = 10,9 \text{ [MPa]} \quad (5.6)$$

$$t_{in}^{P2} = 406,56 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### Tepelný výkon P2

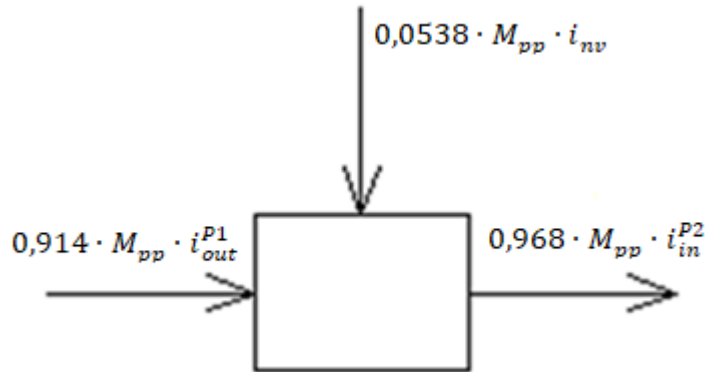
$$Q_{P2} = 0,968 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{P2} - i_{in}^{P2}) = 0,968 \cdot 55,55 \cdot (3394,09 - 3104,78)$$

$$Q_{P2} = 15556,87 \text{ [kW]} \quad (5.7)$$

### 5.3. Přehřívák P1

#### Parametry páry na výstupu

Na výstupu z přehříváku je zařazen vstřík napájecí vody. Množství vstříku činní 5,384 %  $M_{pp}$ .



Obrázek 4: Bilanční schéma zástřiku po P1

$$0,97 \cdot M_{pp} \cdot i_{in}^{P2} = 0,914 \cdot M_{pp} \cdot i_{out}^{P1} + 0,0527 \cdot M_{pp} \cdot i_{nv} \rightarrow$$

$$i_{out}^{P1} = \frac{0,968 \cdot M_{pp} \cdot i_{in}^{P2} - 0,0538 \cdot M_{pp} \cdot i_{nv}}{0,914 \cdot M_{pp}}$$

$$i_{out}^{P1} = \frac{53,77 \cdot 3099,52 - 2,99 \cdot 490,618}{0,914 \cdot 55,55} \quad (5.8)$$

$$i_{out}^{P1} = 3258,74 \text{ [kJ/kg]}$$

$$p_{in}^{P2} = p_{out}^{P1} = 10,9 \text{ [MPa]}$$

$$t_{out}^{P1} = 461,05 \text{ [°C]}$$

#### Parametry páry na vstupu

Volím entalpický spád  $\Delta i = 489,31 \text{ [kJ/kg]}$ .

$$i_{in}^{P1} = i_{out}^{P1} - \Delta i = 3258,74 - 489,31 = 2769,43 \text{ [kJ/kg]} \quad (5.9)$$

$$p_{in}^{P1} = p_{out}^{P1} + \Delta p = 10,9 + 0,2 = 11,1 \text{ [MPa]} \quad (5.10)$$

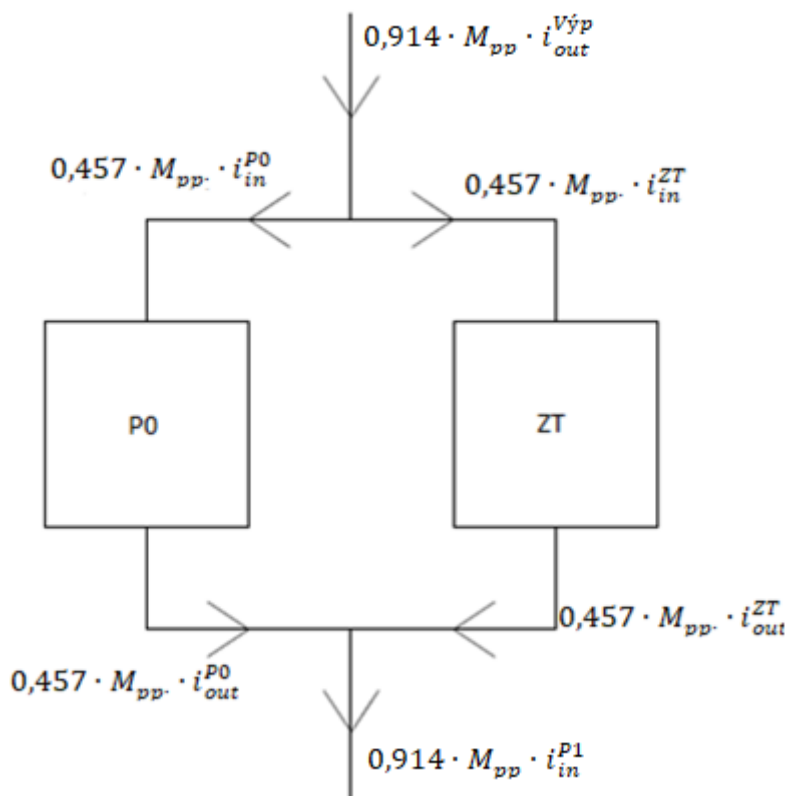
$$t_{in}^{P1} = 327,99 \text{ [°C]}$$

#### Tepelný výkon P1

$$Q_{P1} = 0,9151 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{P2} - i_{in}^{P2}) = 0,914 \cdot 55,55 \cdot (3258,74 - 2769,43)$$

$$Q_{P1} = 24848,18 \text{ [kW]} \quad (5.11)$$

#### 5.4. Přehřívák stěnový P0 a závěsné trubky ZT



Obrázek 5: Bilanční schéma ZT a P0

##### Parametry páry na vstupu

$$p_{in}^{ZT+P0} = p_{in}^{P1} + \Delta p = 11,1 + 0,1 = 11,2 \text{ [MPa]} \quad (5.12)$$

$$t_{in}^{ZT+P0} = t_{out}^{Výp} = 319,44 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$i_{in}^{ZT+P0} = 2702,37 \text{ [kJ/kg]}$$

##### Parametry páry na výstupu závěsných trubek ZT

$$t_{out}^{ZT} = 323,81 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$p_{out}^{ZT} = p_{in}^{P1} = 11,1 \text{ [MPa]}$$

$$i_{out}^{ZT} = 2744,13 \text{ [kJ/kg]}$$

##### Tepelný výkon ZT

$$Q_{ZT} = 0,457 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{ZT} - i_{in}^{ZT+P0}) =$$

$$Q_{ZT} = 0,457 \cdot 55,55 \cdot (2744,13 - 2702,37) = 1060,22 \text{ [kW]} \quad (5.13)$$

##### Parametry páry na výstupu ze stěnového přehříváku P0

Podmínkou je po smíšení s párou ze ZT dostat stav vstupu do P1.

$$p_{out}^{P0} = p_{in}^{P1} = 11,1 \text{ [MPa]}$$

$$i_{in}^{P1} = \frac{i_{out}^{ZT} + i_{out}^{P0}}{2} \rightarrow i_{out}^{P0} = 2 \cdot i_{in}^{P1} - i_{out}^{ZT} = 2 \cdot 2769,43 - 2744,13$$

$$i_{out}^{P0} = 2794,72 \text{ [kJ/kg]} \quad (5.14)$$

$$t_{out}^{P0} = 332,57 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### Tepelný výkon P0

$$Q_{P0} = 0,457 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{P0} - i_{in}^{ZT+P0}) = 0,457 \cdot 55,55 \cdot (2794,72 - 2702,37) \quad (5.15)$$

$$Q_{P0} = 2344,74 [kW]$$

### 5.5. Výparník

#### Parametry syté páry na výstupu z výparníku

$$t_{out}^{Výp} = t_{in}^{ZT+P0} = t'' = 319,44 [^{\circ}C]$$

$$p_{out}^{Výp} = p_{in}^{ZT+P0} = 11,2 [MPa]$$

$$i_{out}^{Výp} = 2704,393 [kJ/kg]$$

#### Parametry syté páry na vstupu do výparníku

Nedohřev vody na výstupu z EKA byl pro první iteraci konzultován na 15 °C, následně vypočten na 16,92 °C. Tlakovou ztrátu ve výparníku kompenzuje vztlková síla.

$$p_{in}^{Výp} = p_{out}^{Výp} = 11,2 [MPa]$$

$$t_{in}^{Výp} = t_{out}^{EKO} = t' - 1692 = 302,52 [^{\circ}C] \quad (5.16)$$

$$i_{in}^{Výp} = 1360,18 [kJ/kg]$$

#### Tepelný výkon výparníku

$$Q_{Výp} = 0,914 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{Výp} - i_{in}^{Výp}) = 0,914 \cdot 55,55 \cdot (2702,37 - 1360,18) \quad (5.17)$$

$$Q_{Výp} = 68158,74 [kW]$$

### 5.6. Ekonomizér

#### Parametry na výstupu z EKA

$$t_{out}^{EKO} = t_{in}^{Výp} = t' - 16,92 = 302,52 [^{\circ}C] \quad (5.18)$$

$$p_{out}^{EKO} = p_{in}^{Výp} = p_{out}^{Výp} = 11,2 [MPa]$$

$$i_{out}^{EKO} = i_{in}^{Výp} = 1360,18 [kJ/kg]$$

#### Parametry napájecí vody

$$p_{in}^{EKO} = p_{out}^{Výp} + \Delta p = 11,2 + 0,2 = 11,4 [MPa] \quad (5.19)$$

$$t_{in}^{EKO} = 115 [^{\circ}C]$$

$$i_{in}^{EKO} = 490,618 [kJ/kg]$$

#### Tepelný výkon EKA

$$Q_{EKO} = 0,914 \cdot M_{pp} \cdot (i_{out}^{EKO} - i_{in}^{EKO}) = 0,914 \cdot 55,55 \cdot (1360,18 - 490,62) \quad (5.20)$$

$$Q_{EKO} = 44157,74 [kW]$$

### 5.6. Celkové přijaté teplo vodou/párou

$$Q_{Celkový} = Q_{EKO} + Q_{Výp} + Q_{P0} + Q_{ZT} + Q_{P3} + Q_{P2} + Q_{P1} =$$

$$= 44157,74 + 68158,74 + 2344,74 + 1060,22 + 9469,17 + 15556,87$$

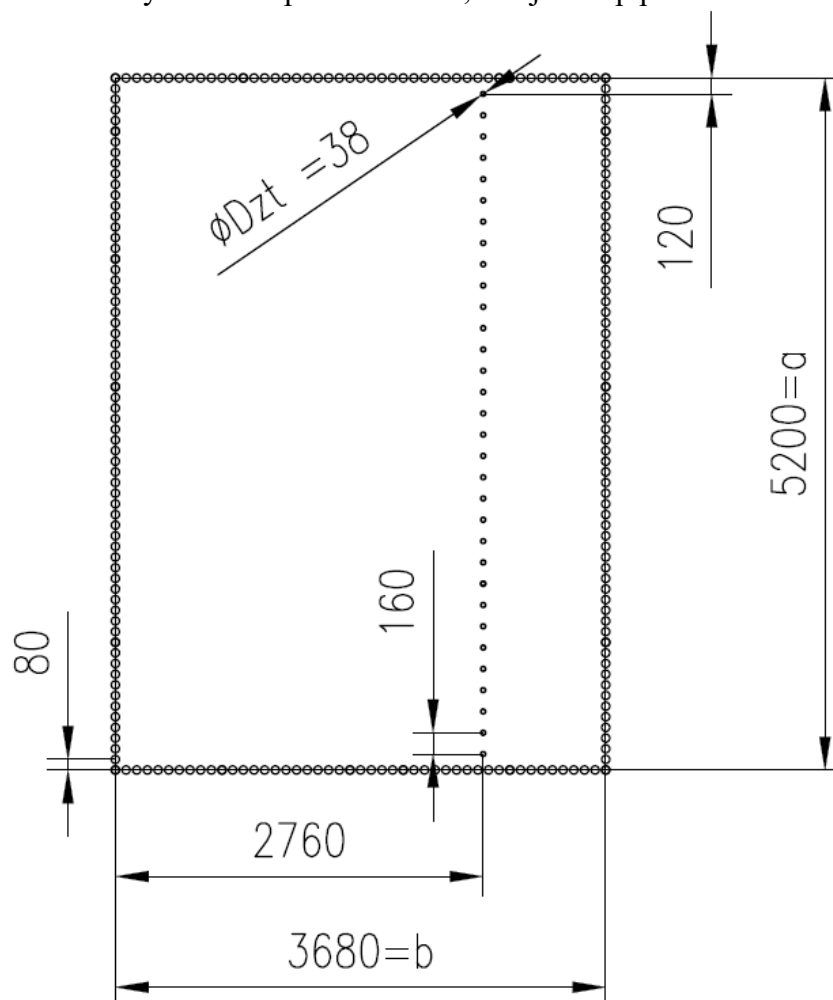
$$+ 24848,18 \quad (5.21)$$

$$Q_{Celkový} = 165595,65 [kW]$$

## 6. Návrh prvního tahu

První tah má stěny tvořeny membránovými stěnami, nacházejí se v něm přehříváky P3 a P2, které jsou zavěšeny na závěsných trubkách ZT, které jsou chlazeny parou z bubnu. Metodika výpočtu je dle [1].

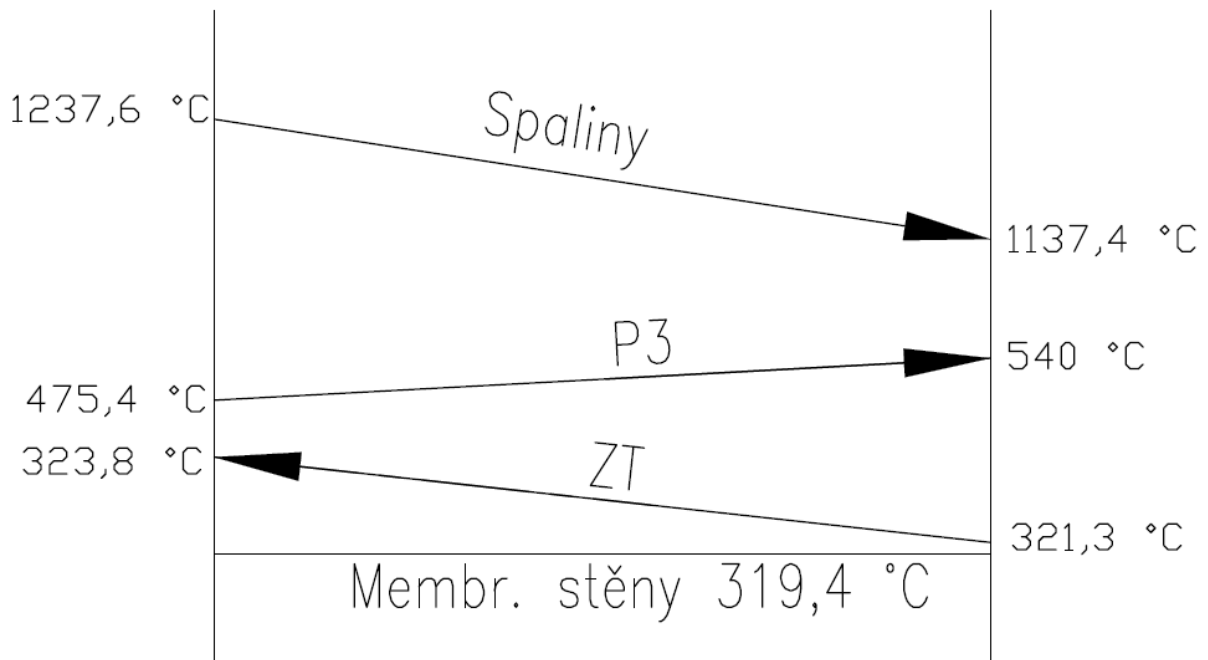
Rozměry prvního tahu jsou shodné s rozměry výstupního okna ohniště. Při výpočtech zanedbávám vyhnutí membránových stěn z důvodu průchodů přehříváků stěnou. Závěsné trubky umístíuji do 3/4 délky tahu na opačnou stranu, než je vstup přehříváků.



Obrázek 6: Rozměry prvního tahu

### 6.1. Návrh oblasti přehříváku P3

Oblast výstupního přehříváku P3 se skládá z membránových stěn, závěsných trubek a samotného přehříváku P3. Oblast je první, která následuje po výstupním oknu ohniště.



Obrázek 7: Teploty v oblasti P3

**Teplotu spalin na výstupu z části P3 volím**

$$t_{P30}^{SP} = 1137,42 [^{\circ}\text{C}]$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř} = \frac{t_{ok} + t_{P30}^{SP}}{2} = \frac{1237,64 - 1137,42}{2} = 1187,53 [^{\circ}\text{C}] \quad (6.1)$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = a \cdot b - n_{tr} \cdot D \cdot l_e - n_{zt} \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D_{zt}^2 =$$

$$F_{sp} = 5,2 \cdot 3,68 - 32 \cdot 0,038 \cdot 3,52 - 32 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 0,038^2 = 14,82 [m^2] \quad (6.2)$$

**Střední rychlost proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{\dot{V}_{SP}^{skut}}{F_{sp}} = \frac{333,38}{14,82} = 22,50 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (6.3)$$

**Skutečný objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{SP}^{skut} = \dot{V}_{sp} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = 62,34 \cdot \frac{273,15 + 1187,53}{273,15} = 333,38 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (6.4)$$

### Objemový průtok spalin

$$\dot{V}_{sp} = O_{SV}^r \cdot M_{pal} = 13,29 \cdot 4,69 = 62,24 \left[ \frac{Nm^3}{s} \right] \quad (6.5)$$

### 6.2. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti P3

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m = \quad (6.6)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,1337}{0,4495} \left( \frac{22,50 \cdot 0,4495}{223,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,61^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 29,67 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

kde  $c_t, c_l, c_m$  jsou opravné koeficienty dle [1] a v tomto případě jsou rovny 1.  
 $\lambda, \nu, Pr$  jsou určeny pro střední hodnotu spalin v oblasti P3 dle [2].

#### Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 14,82}{477,00} = 0,4495 [m] \quad (6.7)$$

#### Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b) + \pi \cdot D_{zt} \cdot n_{zt} + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D) = \quad (6.8)$$

$$O = 2 \cdot (5,2 + 3,68) + \pi \cdot 0,038 \cdot 32 + 2 \cdot 32 \cdot (3,52 + 0,038) = 131,88 [m]$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalin

Pro čisté spaliny při spalování plynu platí vztah

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{Stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)} = \quad (6.9)$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,13 \cdot (1187,53 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{1187,53 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{1187,53 + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_{sál} = 33,23 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

kde  $a_{st}$  je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu  $a_{st} = 0,8$  dle [1].

#### Stupeň černosti proudu spalin při teplotě $T_{P3Stř}^{SP}$

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,14} = 0,13 [-] \quad (6.10)$$

#### Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s = 16,97 \cdot 0,27 \cdot 0,1 \cdot 0,29 = 0,14 [-] \quad (6.11)$$

#### Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

Určuji pro svazek hladkých trubek P3. Rozteče a průměr viz následující podkapitola.

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4 s_1 \cdot s_2}{\pi D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4 \cdot 0,08 \cdot 0,0675}{\pi \cdot 0,038} - 1 \right) = 0,29 [m] \quad (6.12)$$

### Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,29}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1187,53 + 273,15}{1000} \right) = 16,97 [-] \quad (6.13)$$

### Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

Určuji pouze jednou, dále je vždy stejná.

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18 + 0,09 = 0,27 [-] \quad (6.14)$$

### Objemová koncentrace vodní páry a dalších tříatomových plynů ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2Omin}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{1,99930 + (1,016 - 1) \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,57071}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384} = 0,18 [-] \quad (6.15)$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2min} + O_{SO_2min}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}} = \frac{1,01693 + 0}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384}$$

$$r_{RO_2} = 0,09 [-] \quad (6.16)$$

### Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18 + 0,09 = 0,27 [-] \quad (6.17)$$

### Teplota nánosu na straně spalin

$$t_z = t_m + \Delta t = 319,44 + 25 = 344,44 [^{\circ}C] \quad (6.18)$$

kde  $t_m$  je teplota média v trubkách a  $\Delta t$  se pro spalování plynu volí u všech ploch  $25^{\circ}C$  dle [1].

### Celková výhřevná plocha membránových stěn v oblasti P3

Výška oblasti je spočtena jako výška svazku  $+0,45$  m kvůli průlezu mezi přehříváky 3 a 2.

$$S_{ST} = 2 \cdot (a + b) \cdot h = 2 \cdot (5,2 + 3,68) \cdot 0,9 = 15,98 [m^2] \quad (6.19)$$

### Součinitel přestupu tepla ze strany média

Pro jeho velikost je uvažován pouze u přehřáté páry a u vzduchu v OVZ. Tedy u membránových stěn je možné jej bezchybně zanedbat.

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen  $0,95$ .

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 0,95 \cdot 29,67 + 33,23 = 61,24 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (6.20)$$



### Součinitel prostupu tepla

$\psi$  je součinitel tepelné efektivity, pro spalování plynu odpovídá hodnotě 0,85 u všech ploch.

$$k = \psi \cdot \alpha_s = 0,85 \cdot 61,24 = 52,05 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (6.21)$$

### Teplo přijaté membránovou stěnou v oblasti P3

$$Q_{ms}^{P3} = k \cdot S_{ST} \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 52,05 \cdot 15,98 \cdot 867,13 \cdot 10^{-3} = 721,47 [kW] \quad (6.22)$$

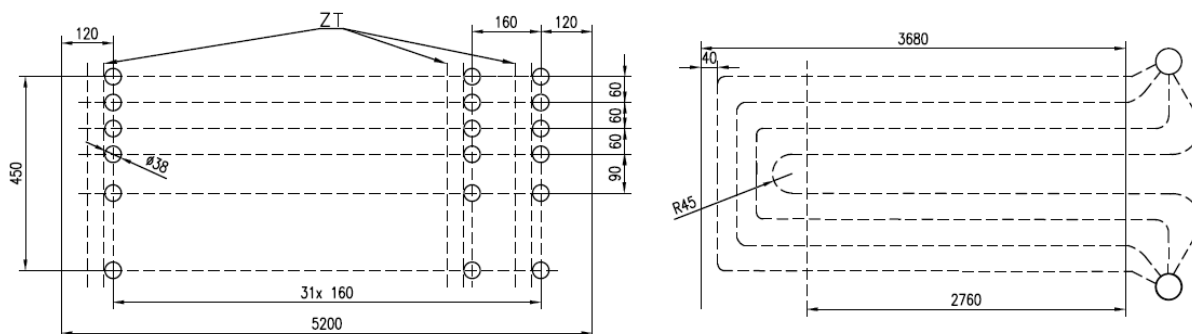
### Teplotní logaritmický spád

$\Delta t_v$  je větším z rozdílů teplot spalin a média a  $\Delta t_m$  je menším z rozdílů.

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{918,20 - 817,98}{\ln \frac{918,20}{817,98}} = 867,13 [^\circ C] \quad (6.23)$$

### 6.3. Tepelný výpočet přehříváku P3

Třetí přehřívák je výstupní, je na něho proto kladen požadavek, aby měl z přehříváku nejmenší plochu, a tedy nejlepší dynamické vlastnosti. Přehřívák je řešen jako dvojhád, avšak z důvodu rychlosti spalin je každá druhá trubka v řadě vyhnuta nad sousední, a jeví se tak jako čtyřhád. Přehřívák je z důvodu vysoké teploty spalin za ohništěm řešen jako souproudý s uspořádáním trubek za sebou.



Obrázek 8: Přehřívák 3

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,038	[m]
Tloušťka stěny	t	0,004	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,030	[m]
Příčná rozteč	$2 \cdot s_1$	0,160	[m]
Střední podélná rozteč	$s_2$	0,068	[m]
Efektivní délka trubek	$l_e$	3,52	[m]
Počet řad	$n_{řad}$	4	[-]
Počet hadů	$n_{had}$	2	[-]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	64	[-]

Tabulka 4: Geometrie přehříváku 3

	Vstup	Výstup	Střední hodnota
Tlak [MPa]	10,7	10,5	10,6
Teplota [°C]	475,40	540	507,70
Entalpie [kJ/kg]	3301,18	3471,64	3386,41
Měrný objem v [m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]	0,0292	0,0333	0,0313
Součinitel tepelné vodivosti λ [W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]			0,0769
Dynamická viskozita η [kg · m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> ]			2,93 · 10 <sup>-5</sup>
Prandtlovo číslo Pr [-]			0,99

Tabulka 5: Parametry páry v přehříváku 3

### Součinitel přestupu tepla ze strany páry

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0769}{0,03} \left( \frac{19,19 \cdot 0,03}{2,93 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0313} \right)^{0,8} \cdot 0,99^{0,4} = 2554,02 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (6.24)$$

### Střední rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pp}^{P3} \cdot \nu}{F_p} = \frac{55,55 \cdot 0,0313}{0,09} = 19,19 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (6.25)$$

### Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{had} = \frac{\pi \cdot 0,03}{4} \cdot 64 \cdot 2 = 0,09 [m^2] \quad (6.26)$$

### Součinitel přestupu konvekcí tepla ze strany spalín

$$\alpha_k = 0,02 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \left( \frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33}$$

$$\alpha_k = 0,02 \cdot 0,985 \cdot 0,985 \cdot \frac{0,13}{0,038} \left( \frac{22,50 \cdot 0,038}{223,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,61^{0,33} = 123,30 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (6.27)$$

kde korekční součinitele  $C_z, C_s$  jsou vypočteny dle [1].

### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalín

Hodnoty  $a_{st}, a, T_{stř}$  jsou shodné jako ve výpočtu membránových stěn.

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)}$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,13 \cdot (1187,53 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{532,70 + 273,15}{1187,53 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{532,70 + 273,15}{1187,53 + 273,15} \right)} \quad (6.28)$$

$$\alpha_{sál} = 39,54 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### Teplota nánosu na straně spalin

Vypočtena opět jako u membránových stěn, pouze se změnou teploty média.

$$t_z = t_m + \Delta t = 507,70 + 25 = 532,70 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.29)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 1.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 1 \cdot 123,30 + 39,54 = 162,84 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (6.30)$$

### Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 \cdot 162,84}{1 + \frac{162,84}{2254,02}} = 130,12 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (6.31)$$

### Teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{762,24 - 597,42}{\ln \frac{762,24}{597,42}} = 676,49 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.32)$$

### Plocha jedné řady trubek

$$S_{1řada} = \pi \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{had} \cdot D = \pi \cdot 3,52 \cdot 64 \cdot 2 \cdot 0,038 = 53,79 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.33)$$

### Skutečná plocha

$$S_{skut} = S_{1řada} \cdot n_{řad} = 53,79 \cdot 2 = 107,58 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.34)$$

### Teplo přijaté přehřívákem P3

$$Q^{P3} = k \cdot S_{skut} \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 130,12 \cdot 107,58 \cdot 676,49 \cdot 10^{-3} = 9469,02 \text{ [kW]} \quad (6.35)$$

## 6.4. Tepelný výpočet závěsných trubek v oblasti P3

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,038	[m]
Tloušťka stěny	t	0,0063	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,0254	[m]
Příčná rozteč	$2 \cdot s_1$	0,160	[m]
Efektivní délka trubek	$l_e$	0,9	[m]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	32	[-]

Tabulka 6: Geometrie ZT

	Vstup	Výstup	Střední hodnota
Tlak [MPa]	11,13	11,21	11,185
Teplota [°C]	321,31	323,81	322,56
Entalpie [kJ/kg]	2737,90	2744,13	2741,02
Měrný objem v $[m^3 \cdot kg^{-1}]$	0,0161	0,0160	0,01605
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$			0,0852
Dynamická viskozita $\eta [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$			$2,11 \cdot 10^{-5}$
Prandtlovo číslo Pr [-]			1,84

Tabulka 7: Parametry páry v závěsných trubkách v oblasti P3

### Součinitel přestupu tepla ze strany páry

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6.36)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0852}{0,0254} \left( \frac{25,70 \cdot 0,0254}{2,11 \cdot 10^{-5} \cdot 0,01605} \right)^{0,8} \cdot 1,84^{0,4} = 10326,95 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### Střední rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pp}^{ZT} \cdot v}{F_p} = \frac{25,39 \cdot 0,01605}{0,02} = 25,70 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (6.37)$$

### Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0254^2}{4} \cdot 32 = 0,02 [m^2] \quad (6.38)$$

### Součinitel přestupu konvekcí tepla ze strany spalín

Tento součinitel je stejný jako pro membránové stěny shodné oblasti.

$$\alpha_k = 29,67$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalín

Hodnoty  $a_{st}$ ,  $a$ ,  $T_{stř}$  jsou shodné jako ve výpočtu membránových stěn.

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,13 \cdot (1187,53 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{347,56 + 273,15}{1187,53 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{347,56 + 273,15}{1187,53 + 273,15} \right)} \quad (6.39)$$

$$\alpha_{sál} = 33,33 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### Teplota nánosu na straně spalín

Vypočtena opět jako u membránových stěn, pouze se změnou teploty média.

$$t_z = t_m + \Delta t = 322,56 + 25 = 347,56 [°C] \quad (6.40)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 1.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 1 \cdot 29,67 + 33,33 = 63,00 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (6.41)$$

### Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 \cdot 63,00}{1 + \frac{63,00}{10326,95}} = 53,22 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (6.42)$$

### Teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{913,83 - 816,11}{\ln \frac{913,83}{816,11}} = 864,05 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.43)$$

### Plocha závěsných trubek v oblasti P3

$$S_{ZT} = \pi \cdot h \cdot n_{tr} \cdot D = \pi \cdot 0,9 \cdot 32 \cdot 0,038 = 3,44 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.44)$$

### Teplo přijaté přehřívákem P3

$$Q^{ZT} = k \cdot S_{ZT} \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 53,22 \cdot 3,44 \cdot 864,05 \cdot 10^{-3} = 158,11 \text{ [kW]} \quad (6.45)$$

## 6.5. Celková tepla v oblasti P3

### Měrná entalpie spalin na výstupu z oblasti P3

$$i_{p3}^{sp} = \frac{Q_{p3}^{sp}}{M_{pal}} = \frac{105099,81}{4,69} = 22403,95 \left[ \frac{kJ}{Nm^3} \right] \quad (6.46)$$

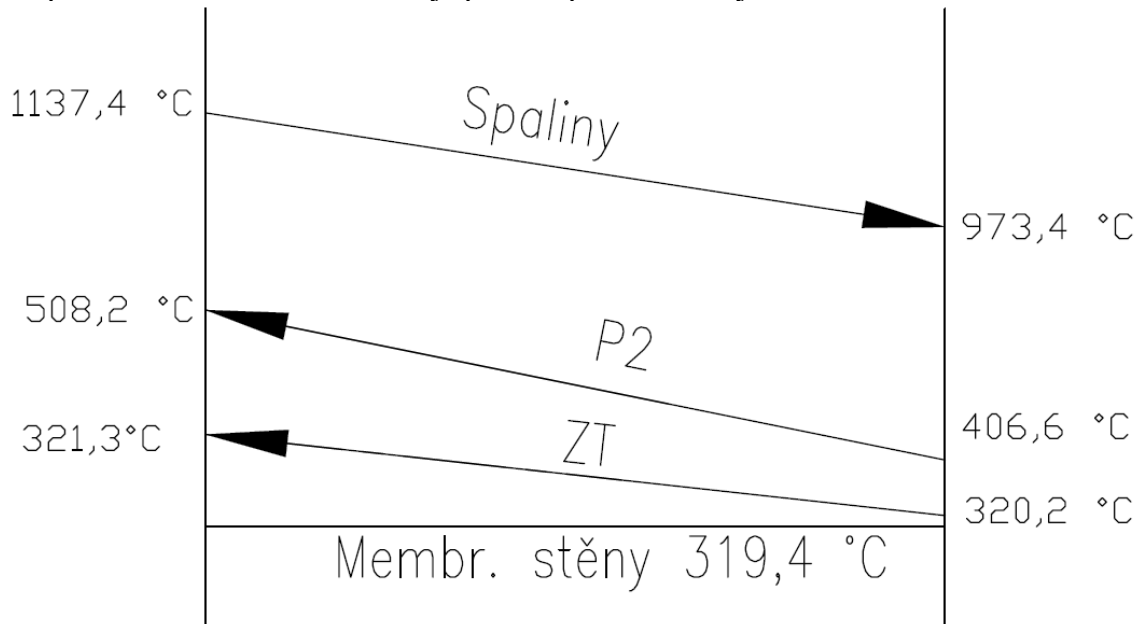
což odpovídá volené teplotě na začátku výpočtu oblasti.

### Teplo spalin na výstupu z oblasti P3 a změna tepla spalin

$$\begin{aligned} Q_{p3}^{sp} &= Q_S^{tok, \alpha_{ok}} - Q_{ZT}^{P3} - Q^{P3} - Q_{ms}^{P3} \\ Q_{p3}^{sp} &= 115761,92 - 158,11 - 9469,02 - 721,47 = 105099,81 \text{ [kW]} \\ \Delta Q_{p3}^{sp} &= Q_S^{tok, \alpha_{ok}} - Q_{p3}^{sp} = 115761,92 - 105099,81 = 10348,61 \text{ [kW]} \end{aligned} \quad (6.47)$$

### 6.6. Návrh oblasti přehříváku P2

Oblast prostředního přehříváku P se skládá z membránových stěn, závěsných trubek a samotného přehříváku P2. Oblast následuje po P3 a po ní následuje obratová komora.



Obrázek 9: Teploty v oblasti P2

**Teplotu spalin na výstupu z části P2 volím**

$$t_{P20}^{SP} = 974,35 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř} = \frac{t_{P30}^{SP} + t_{P20}^{SP}}{2} = \frac{1137,42 + 974,35}{2} = 1055,38 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.48)$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = a \cdot b - n_{tr} \cdot D \cdot l_e - n_{zt} \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D_{zt}^2 =$$

$$F_{sp} = 5,2 \cdot 3,68 - 32 \cdot 0,038 \cdot 3,52 - 32 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 0,038^2 = 14,82 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.49)$$

**Střední rychlost proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{\dot{V}_{SP}^{skut}}{F_{sp}} = \frac{303,88}{14,82} = 20,46 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (6.50)$$

**Skutečný objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{SP}^{skut} = \dot{V}_{sp} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = 62,34 \cdot \frac{273,15 + 1055,38}{273,15} = 303,22 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (6.51)$$

**Objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{sp} = O_{SV}^r \cdot M_{pal} = 13,29 \cdot 4,69 = 62,34 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right] \quad (6.52)$$

### 6.7. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti P2 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,1192}{0,2378} \left( \frac{20,46 \cdot 0,2378}{189,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,61^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 31,95 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (6.53)$$

kde  $c_t, c_l, c_m$  jsou opravné koeficienty dle [1] a v tomto případě jsou jejich hodnoty rovny 1.

$\lambda, \nu, Pr$  jsou určeny pro střední hodnotu spalin v oblasti P3 dle [2].

#### Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 14,82}{249,29} = 0,2378 \quad (6.54)$$

#### Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b) + \pi \cdot D_{zt} \cdot n_{zt} + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D) =$$

$$O = 2 \cdot (5,2 + 3,68) + \pi \cdot 0,038 \cdot 32 + 2 \cdot 32 \cdot (3,52 + 0,038) = 249,29 [m] \quad (6.55)$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalin

Pro čisté spalinu při spalování plynu platí vztah

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{Stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,14 \cdot (1055,38 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{1055,38 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{1055,38 + 273,15} \right)} \quad (6.56)$$

$$\alpha_{sál} = 29,06 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

kde  $a_{st}$  je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu  $a_{st} = 0,8$  dle [1].

#### Stupeň černosti proudu spalin při teplotě $T_{P3Stř}^{SP}$

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,15} = 0,14 [-] \quad (6.57)$$

#### Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s = 18,78 \cdot 0,27 \cdot 0,1 \cdot 0,29 = 0,14 [-] \quad (6.58)$$

#### Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4 s_1 \cdot s_2}{\pi D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4 \cdot 0,08 \cdot 0,0675}{\pi \cdot 0,038} - 1 \right) = 0,29 [m] \quad (6.59)$$

### Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,29}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1055,38 + 273,15}{1000} \right) = 18,78 [-] \quad (6.60)$$

### Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách

Určuji pouze jednou, její hodnota se nemění.

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18 + 0,09 = 0,27 [-] \quad (6.61)$$

### Objemová koncentrace vodní páry a dalších tříatomových plynů ve spalínách

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2Omin}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{1,99930 + (1,016 - 1) \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,57071}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384} = 0,18 [-] \quad (6.62)$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2min} + O_{SO_2min}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}} = \frac{1,01693 + 0}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384}$$

$$r_{RO_2} = 0,09 [-] \quad (6.63)$$

### Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách

$$p_s = r_s \cdot p = 0,27 \cdot 0,1 = 0,027 [MPa] \quad (6.64)$$

### Teplota nánosu na straně spalin

$$t_z = t_m + \Delta t = 319,44 + 25 = 344,44 [^{\circ}C] \quad (6.65)$$

kde  $t_m$  je teplota média v trubkách a  $\Delta t$  se pro spalování plynu volí u všech ploch  $25^{\circ}C$  dle [1].

### Celková výhřevná plocha membránových stěn v oblasti P2

Výška oblasti je spočtena jako výška svazku  $+0,45$  m kvůli průlezu mezi přehříváky 3 a 2.

$$S_{ST} = 2 \cdot (a + b) \cdot h = 2 \cdot (5,2 + 3,68) \cdot 1,35 = 23,98 [m^2] \quad (6.66)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 0,95.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 0,95 \cdot 31,95 + 29,06 = 59,55 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (6.67)$$





	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,038	[m]
Tloušťka stěny	t	0,004	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,030	[m]
Příčná rozteč	$2 \cdot s_1$	0,160	[m]
Střední podélná rozteč	$s_2$	0,068	[m]
Efektivní délka trubek	$l_e$	3,52	[m]
Počet řad	$n_{řad}$	8	[-]
Počet hadů	$n_{had}$	2	[-]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	64	[-]

Tabulka 8: Geometrie přehříváku 2

	Vstup	Výstup	Střední hodnota
Tlak [MPa]	10,9	10,7	10,8
Teplota [°C]	406,56	508,23	457,39
Entalpie [kJ/kg]	3104,78	3394,09	3249,44
Měrný objem $v$ [ $m^3 \cdot kg^{-1}$ ]	0,0218	0,0296	0,0257
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]			0,0715
Dynamická viskozita $\eta$ [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ]			$2,67 \cdot 10^{-5}$
Prandtlovo číslo Pr [-]			1,06

Tabulka 9: Parametry páry v přehříváku 2

#### Součinitel přestupu tepla ze strany páry

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0715}{0,03} \left( \frac{15,25 \cdot 0,03}{2,67 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0257} \right)^{0,8} \cdot 1,06^{0,4} = 2561,02 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (6.71)$$

#### Střední rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pp}^{P2} \cdot v}{F_p} = \frac{53,77 \cdot 0,0257}{0,09} = 15,25 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (6.72)$$

#### Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{had} = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 64 \cdot 2 = 0,09 [m^2] \quad (6.72)$$

#### Součinitel přestupu konvekcí tepla ze strany spalin

$$\alpha_k = 0,02 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33}$$

$$\alpha_k = 0,02 \cdot 1 \cdot 0,985 \cdot \frac{0,1192}{0,038} \left( \frac{20,52 \cdot 0,038}{189,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,614^{0,33} = 117,31 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (6.73)$$

kde korekční součinitele  $C_z, C_s$  jsou vypočteny dle [1].

### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalin

Hodnoty  $a_{st}$ ,  $a$ ,  $T_{Stř}$  jsou shodné jako ve výpočtu membránových stěn.

$$\begin{aligned}\alpha_{sál} &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{Stř} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{Stř}}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{T_z}{T_{Stř}}\right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,14 \cdot (1055,38 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left(\frac{482,39 + 273,15}{1055,38 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{682,39 + 273,15}{1055,38 + 273,15}\right)} \quad (6.74) \\ \alpha_{sál} &= 33,45 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]\end{aligned}$$

### Teplota nánosu na straně spalin

Vypočtena opět jako u membránových stěn, pouze se změnou teploty média.

$$t_z = t_m + \Delta t = 457,39 + 25 = 482,39 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.75)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 1.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 1 \cdot 117,31 + 33,45 = 150,77 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (6.76)$$

### Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 \cdot 150,77}{1 + \frac{150,77}{2561,02}} = 121,03 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (6.77)$$

### Teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{629,19 - 566,79}{\ln \frac{629,19}{566,79}} = 597,45 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.78)$$

### Plocha jedné řady trubek

$$S_{1řada} = \pi \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{had} \cdot D = \pi \cdot 3,52 \cdot 64 \cdot 2 \cdot 0,038 = 53,79 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.79)$$

### Skutečná plocha

$$S_{skut} = S_{1řada} \cdot n_{řad} = 53,79 \cdot 4 = 215,15 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.80)$$

### Teplu přijaté přehřívákem P2

$$\begin{aligned}Q^{P3} &= k \cdot S_{skut} \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 121,03 \cdot 215,15 \cdot 597,45 \cdot 10^{-3} \\ Q^{P3} &= 15557,03 \text{ [kW]} \quad (6.81)\end{aligned}$$

### 6.9. Tepelný výpočet závěsných trubek v oblasti P2

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,038	[m]
Tloušťka stěny	t	0,0063	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,0254	[m]
Příčná rozteč	$2 \cdot s_1$	0,160	[m]
Efektivní délka trubek	$l_e$	0,9	[m]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	32	[-]

Tabulka 10: Geometrie ZT

	Vstup	Výstup	Střední hodnota
Tlak [MPa]	11,17	11,13	11,1495
Teplota [°C]	320,23	321,31	320,77
Entalpie [kJ/kg]	2729,72	2737,90	2733,81
Měrný objem v $[m^3 \cdot kg^{-1}]$	0,0161	0,0160	0,01605
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$			0,0852
Dynamická viskozita $\eta [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$			$2,11 \cdot 10^{-5}$
Prandtlovo číslo Pr [-]			1,84

Tabulka 11: Parametry páry v závěsných trubkách v oblasti P2

#### Součinitel přestupu tepla ze strany páry

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0837}{0,0254} \left( \frac{25,70 \cdot 0,0254}{2,09 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0165} \right)^{0,8} \cdot 1,8^{0,4} = 10213,37 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (6.82)$$

#### Střední rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot \nu}{F_p} = \frac{25,39 \cdot 0,01605}{0,02} = 25,70 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (6.83)$$

#### Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0254^2}{4} \cdot 32 = 0,02 [m^2] \quad (6.84)$$

#### Součinitel přestupu konvekcí tepla ze strany spalín

Tento součinitel je stejný jako pro membránové stěny shodné oblasti.

$$\alpha_k = 31,95 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalín

Hodnoty  $a_{st}$ ,  $a$ ,  $T_{Stř}$  jsou shodné jako ve výpočtu membránových stěn.

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{Stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)} = \quad (6.85)$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,14 \cdot (1055,38 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left(\frac{346,62 + 273,15}{1055,38 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{346,62 + 273,15}{1055,38 + 273,15}\right)}$$

$$\alpha_{sál} = 29,13 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

### Teplota nánosu na straně spalín

Vypočtena opět jako u membránových stěn, pouze se změnou teploty média.

$$t_z = t_m + \Delta t = 321,62 + 25 = 346,62 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.86)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 1.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 1 \cdot 31,95 + 29,13 = 61,07 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (6.87)$$

### Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 \cdot 61,07}{1 + \frac{61,07}{10213,37}} = 51,60 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (6.88)$$

### Teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{816,11 - 653,12}{\ln \frac{816,11}{653,12}} = 731,59 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.89)$$

### Plocha závěsných trubek v oblasti P2

$$S_{ZT} = \pi \cdot h \cdot n_{tr} \cdot D = \pi \cdot 1,44 \cdot 32 \cdot 0,038 = 5,50 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.90)$$

### Teplo přijaté přehřívákem P2

$$Q^{ZT} = k \cdot S_{ZT} \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 51,60 \cdot 5,50 \cdot 731,59 \cdot 10^{-3} = 207,67 \text{ [kW]} \quad (6.91)$$

## 6.10. Celková tepla v oblasti P2

### Měrná entalpie spalín na výstupu z oblasti P2

$$i_{p2}^{sp} = \frac{Q_{p2}^{sp}}{M_{pal}} = \frac{88386,44}{4,69} = 18838,73 \left[ \frac{kJ}{Nm^3} \right] \quad (6.92)$$

což odpovídá volené teplotě na začátku výpočtu oblasti.

### Teplo spalín na výstupu z oblasti P2 a změna tepla spalín

$$Q_{p2}^{sp} = Q_{p3}^{sp} - Q_{ZT}^{P2} - Q^{P2} - Q_{ms}^{P2} = 105099,81 - 207,67 - 15557,03 - 948,79$$

$$Q_{p2}^{sp} = 88386,44 \text{ [kW]} \quad (6.93)$$

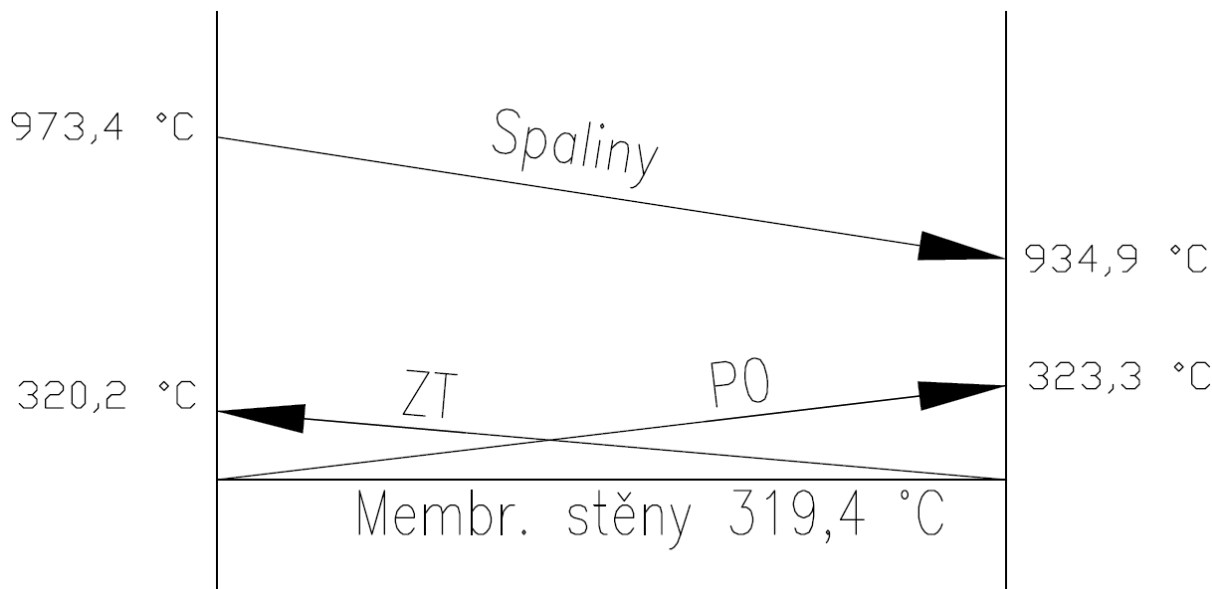
$$\Delta Q_p^{sp} = Q_{p3}^{sp} - Q_{p2}^{sp} = 105287,09 - 88386,44 = 16713,49 \text{ [kW]}$$

## 7. Návrh obratových komor a mříže

Celá oblast je v oblasti kotle s chlazenými stěnami, přičemž kromě stropu a zadní stěny druhé komory, které tvoří stěnový přehřívák P0, jsou to stěny membránové, které jsou součástí výparného systému kotle.

### 7.1. Návrh oblasti obratové komory OK1

Po P2 následuje obratový prostor OK1, jehož výška činí 4,35m. Obsahuje membránové stěny, stěnový přehřívák a závěsné trubky. Na OK1 navazuje mříž.



Obrázek 11: Teploty v oblasti OK1

**Teplotu spalin na výstupu z části OK1 volím**

$$t_{OK10}^{SP} = 934,89 [^{\circ}C]$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř} = \frac{t_{P20}^{SP} + t_{OK10}^{SP}}{2} = \frac{974,35 + 934,89}{2} = 954,12 [^{\circ}C] \quad (7.1)$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = a \cdot b - n_{zt} \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D_{zt}^2$$

$$F_{sp} = 5,2 \cdot 3,68 - 32 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 0,038^2 = 19,10 [m^2] \quad (7.2)$$

**Střední rychlost proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{\dot{V}_{SP}^{skut}}{F_{sp}} = \frac{280,11}{19,10} = 14,67 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (7.3)$$

**Skutečný objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{SP}^{skut} = \dot{V}_{sp} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = 62,34 \cdot \frac{273,15 + 954,12}{273,15} = 280,11 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (7.4)$$

### Objemový průtok spalin

$$\dot{V}_{sp} = O_{SV}^r \cdot M_{pal} = 13,29 \cdot 4,69 = 62,34 \left[ \frac{Nm^3}{s} \right] \quad (7.5)$$

### 7.2. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti OK1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,1127}{3,54} \left( \frac{14,67 \cdot 3,54}{169,4 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,62^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 14,83 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (7.6)$$

kde  $c_t, c_l, c_m$  jsou opravné koeficienty dle [1] a v tomto případě jsou jejich hodnoty rovny 1.

$\lambda, \nu, Pr$  jsou určeny pro střední hodnotu spalin v oblasti P3 dle [2].

#### Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 19,10}{21,58} = 3,54 [m] \quad (7.7)$$

#### Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b) + \pi \cdot D_{zt} \cdot n_{zt} =$$

$$O = 2 \cdot (5,2 + 3,68) + \pi \cdot 0,038 \cdot 32 = 21,58 [m] \quad (7.8)$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalin

Pro čisté spaliny při spalování plynu platí vztah

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{Stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,36 \cdot (954,12 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{954,12 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{954,12 + 273,15} \right)} \quad (7.9)$$

$$\alpha_{sál} = 63,25 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

kde  $a_{st}$  je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu  $a_{st} = 0,8$  dle [1].

#### Stupeň černosti proudu spalin při teplotě $T_{P3Stř}^{SP}$

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,45} = 0,36 [-] \quad (7.10)$$

#### Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s = 6,39 \cdot 0,27 \cdot 0,1 \cdot 2,59 = 0,45 [-] \quad (7.11)$$

### Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{Sp}} = 3,6 \cdot \frac{4 \cdot 5,2 \cdot 3,68}{2 \cdot 3,68 \cdot 4 + 2 \cdot 5,2 \cdot 4,35 + 2 \cdot 5,2 \cdot 3,64} = 2,59 \text{ [m]} \quad (7.12)$$

### Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 2,52}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{954,12 + 273,15}{1000} \right) = 6,39 \text{ [-]} \quad (7.13)$$

### Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

Určuji pouze jednou, její hodnota se nemění.

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18 + 0,09 = 0,27 \text{ [-]} \quad (7.14)$$

### Objemová koncentrace vodní páry a dalších tříatomových plynů ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2Omin}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{1,99930 + (1,016 - 1) \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,57071}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384} = 0,18 \text{ [-]} \quad (7.15)$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2min} + O_{SO_2min}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}} = \frac{1,01693 + 0}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384}$$

$$r_{RO_2} = 0,09 \text{ [-]} \quad (7.16)$$

### Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$p_s = r_s \cdot p = 0,27 \cdot 0,1 = 0,027 \text{ [MPa]} \quad (7.17)$$

### Teplota nánosu na straně spalin

$$t_z = t_m + \Delta t = 319,44 + 25 = 344,44 \text{ [°C]} \quad (7.18)$$

kde  $t_m$  je teplota média v trubkách a  $\Delta t$  se pro spalování plynu volí u všech ploch 25 °C dle [1].

### Celková výhřevná plocha membránových stěn v oblasti OK1

$$S_{ST} = 2 \cdot h \cdot b + a \cdot h + (h - 0,75) \cdot b$$

$$= 2 \cdot 4,35 \cdot 3,68 + 5,2 \cdot 4,35 + (4,35 - 1,05) \cdot 3,68$$

$$S_{ST} = 58,02 \text{ [m}^2\text{]} \quad (7.19)$$



**Celkový součinitel přestupu tepla**

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 0,9.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 0,9 \cdot 14,83 + 63,25 = 76,60 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7.20)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$\psi$  je součinitel tepelné efektivity, pro spalování plynu odpovídá hodnotě 0,85 u všech ploch.

$$k = \psi \cdot \alpha_s = 0,85 \cdot 76,60 = 65,11 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7.21)$$

**Teplo přijaté membránovou stěnou v oblasti OK1**

$$Q_{ms}^{P2} = k \cdot S_{ST} \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 65,11 \cdot 58,19 \cdot 634,89 \cdot 10^{-3} = 2479,34 [kW] \quad (7.22)$$

**Teplotní logaritmický spád**

$\Delta t_v$  je větším z rozdílů teplot spalin a média a  $\Delta t_m$  je menším z rozdílů.

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{653,91 - 615,45}{\ln \frac{653,91}{615,45}} = 634,10 [^\circ C] \quad (7.23)$$

**7.3. Tepelný výpočet přehříváku P0 v oblasti OK1**

Přehřívák P0 tvoří v oblasti OK1 strop. Je zapojen souproudě se spalinami. Je tvořen membránovou stěnou s roztečí 80 mm, shodnou s membránovou stěnou výparníku, a trubkami o průměru 38 mm.

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,038	[m]
Tloušťka stěny	t	0,004	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,030	[m]
Příčná rozteč	$s_1$	0,08	[m]
Délka trubek v úseku	$l_e$	3,68	[m]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	64	[-]

Tabulka 12: Geometrie přehříváku P0

	Vstup	Výstup	Střední hodnota
Tlak [MPa]	11,2	11,175	11,1875
Teplota [°C]	319,44	323,27	321,36
Entalpie [kJ/kg]	2702,37	2732,88	2717,63
Měrný objem $v$ [ $m^3 \cdot kg^{-1}$ ]	0,0156	0,0162	0,0159
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]			0,0831
Dynamická viskozita $\eta$ [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ]			$2,12 \cdot 10^{-5}$
Prandtlovo číslo Pr [-]			1,74

Tabulka 13: Parametry páry v přehříváku P0

### Součinitel přestupu tepla ze strany páry

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0831}{0,03} \left( \frac{8,95 \cdot 0,03}{21,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0159} \right)^{0,8} \cdot 1,74^{0,4} = 4035,07 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7.24)$$

### Střední rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pp}^{P0} \cdot \nu}{F_p} = \frac{25,39 \cdot 0,0159}{0,05} = 8,95 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (7.25)$$

### Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,03}{4} \cdot 64 = 0,05 \left[ m^2 \right] \quad (7.26)$$

### Součinitel přestupu konvekcí tepla ze strany spalin

Je shodný se součinitelem přestupu tepla u membránových stěn.

$$\alpha_k = 14,83 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalin

Hodnoty  $a_{st}$ ,  $a$ ,  $T_{stř}$  jsou shodné jako ve výpočtu membránových stěn.

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)}$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,14 \cdot (954,12 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{346,36 + 273,15}{954,12 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{346,36 + 273,15}{954,12 + 273,15} \right)} \quad (7.27)$$

$$\alpha_{sál} = 63,39 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### Teplota nánosu na straně spalin

Vypočtena opět jako u membránových stěn, pouze se změnou teploty média.

$$t_z = t_m + \Delta t = 321,36 + 25 = 346,36 \left[ ^\circ C \right] \quad (7.28)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 0,9.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 0,9 \cdot 14,83 + 63,39 = 76,73 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7.29)$$

### Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 \cdot 76,73}{1 + \frac{76,73}{4035,07}} = 64,01 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7.30)$$

### Teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{653,91 - 611,62}{\ln \frac{653,91}{611,62}} = 632,53 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7.31)$$

### Skutečná plocha

$$S = a \cdot b = 5,2 \cdot 3,68 = 19,14 \text{ [m}^2\text{]} \quad (7.32)$$

### Teplo přijaté přehřívákem P0

$$Q^{P3} = k \cdot S \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 64,01 \cdot 19,14 \cdot 632,53 \cdot 10^{-3} \\ Q^{P3} = 774,72 \text{ [kW]} \quad (7.33)$$

## 7.4. Tepelný výpočet závěsných trubek v oblasti OK1

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,038	[m]
Tloušťka stěny	t	0,0063	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,0254	[m]
Příčná rozteč	$2 \cdot s_1$	0,160	[m]
Efektivní délka trubek	$l_e$	0,9	[m]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	32	[-]

Tabulka 14: Geometrie ZT

	Vstup	Výstup	Střední hodnota
Tlak [MPa]	11,2	11,17	11,183
Teplota [°C]	319,44	320,23	319,83
Entalpie [kJ/kg]	2702,37	2729,72	2716,05
Měrný objem v [m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]	0,0160	0,0158	0,0159
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]			0,0852
Dynamická viskozita $\eta$ [kg · m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> ]			$2,11 \cdot 10^{-5}$
Prandtlovo číslo Pr [-]			1,84

Tabulka 15: Parametry páry v závěsných trubkách v oblasti OK1

### Součinitel přestupu tepla ze strany páry

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ \alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0837}{0,0254} \left( \frac{25,92 \cdot 0,0254}{2,09 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0165} \right)^{0,8} \cdot 1,8^{0,4} = 10326,95 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7.34)$$

### **Střední rychlost proudění páry**

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v}{F_p} = \frac{24,91 \cdot 0,01591}{0,0162} = 24,92 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (7.35)$$

### **Průtočný průřez pro páru**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0254}{4} \cdot 32 = 0,0162 [m^2] \quad (7.36)$$

### **Součinitel přestupu konvekcí tepla ze strany spalín**

Tento součinitel je stejný jako pro membránové stěny shodné oblasti.

$$\alpha_k = 14,83 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### **Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalín**

Hodnoty  $a_{st}$ ,  $a$ ,  $T_{stř}$  jsou shodné jako ve výpočtu membránových stěn.

$$\begin{aligned} \alpha_{sál} &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,14 \cdot (954,12 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{344,83 + 273,15}{954,12 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{344,83 + 273,15}{954,12 + 273,15} \right)} \end{aligned} \quad (7.37)$$

$$\alpha_{sál} = 63,28 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### **Teplota nánosů na straně spalín**

Vypočtena opět jako u membránových stěn, pouze se změnou teploty média.

$$t_z = t_m + \Delta t = 319,83 + 25 = 344,83 [^{\circ}C] \quad (7.38)$$

### **Celkový součinitel přestupu tepla**

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 1.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 1 \cdot 14,83 + 63,28 = 78,11 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7.39)$$

### **Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 \cdot 78,11}{1 + \frac{78,11}{10326,95}} = 65,89 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7.40)$$

### **Teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{653,12 - 615,45}{\ln \frac{653,12}{615,45}} = 634,10 [^{\circ}C] \quad (7.41)$$

### Plocha závěsných trubek v oblasti OK1

$$S_{ZT} = \pi \cdot h \cdot n_{tr} \cdot D = \pi \cdot 4,35 \cdot 32 \cdot 0,038 = 16,66 \text{ [m}^2\text{]} \quad (7.42)$$

### Teplo přijaté ZT v oblasti OK1

$$Q^{ZT} = k \cdot S_{ZT} \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 66,10 \cdot 17,00 \cdot 634,50 \cdot 10^{-3} = 712,96 \text{ [kW]} \quad (7.43)$$

## 7.5. Celková tepla v oblasti OK1

### Měrná entalpie spalin na výstupu z oblasti OK1

$$i_{OK1}^{sp} = \frac{Q_{OK1}^{sp}}{M_{pal}} = \frac{84521,44}{4,69} = 18013,80 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \right] \quad (7.44)$$

což odpovídá volené teplotě na začátku výpočtu oblasti s odchylkou 0,01 °C.

### Teplo spalin na výstupu z oblasti OK1 a změna tepla spalin

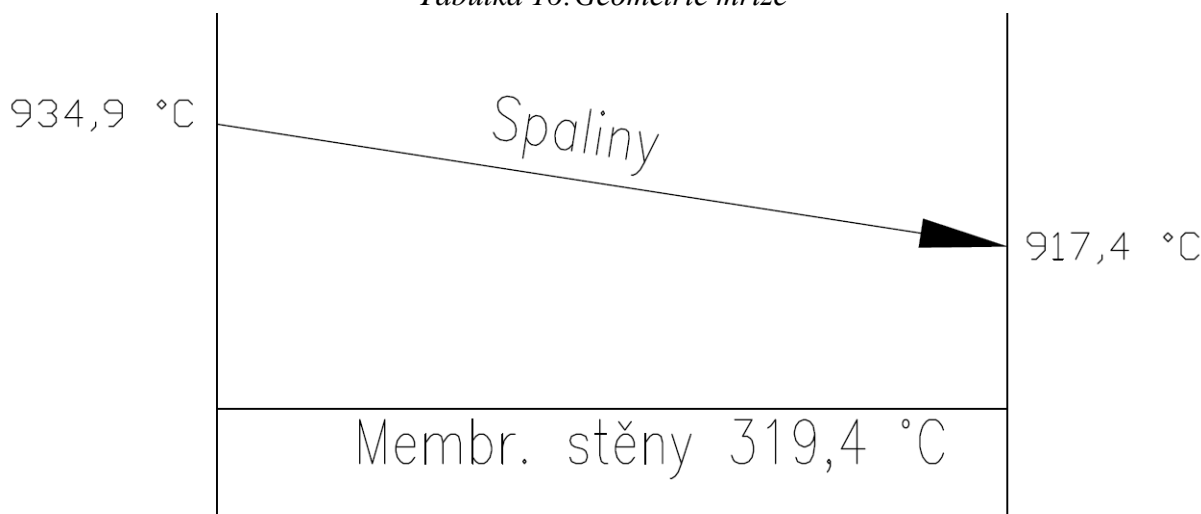
$$\begin{aligned} Q_{OK1}^{sp} &= Q_{p2}^{sp} - Q_{ZT}^{OK1} - Q_{p0}^{OK1} - Q_{ms}^{OK1} = \\ Q_{OK1}^{sp} &= 88386,32 - 694,35 - 774,72 - 2396,68 = 84520,57 \text{ [kW]} \\ \Delta Q_p^{sp} &= Q_{p2}^{sp} - Q_{OK1}^{sp} = 88386,32 - 84520,57 = 3865,75 \text{ [kW]} \end{aligned} \quad (7.45)$$

## 7.6. Tepelný výpočet mříže

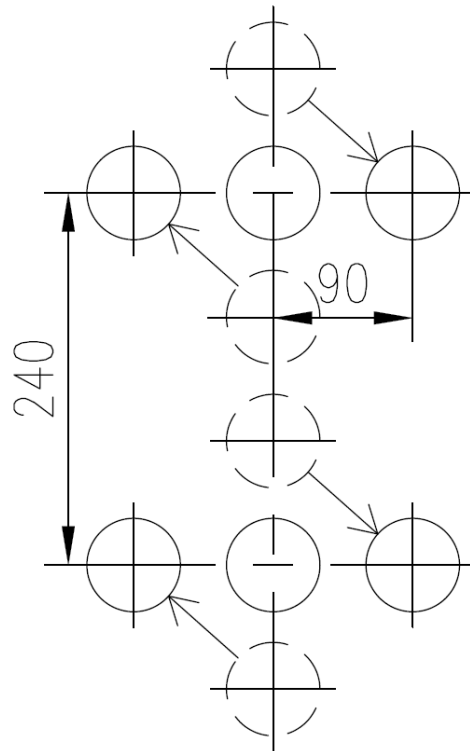
Mříž je umístěna mezi obrátové komory OK1 a OK2, její výška je 3,4 m. Je tvořena vyhnutými trubkami membránové stěny, ty jsou vyhnuté do tří trubek za sebou a krajní je tvořena čtyřmi trubkami za sebou.

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,0603	[m]
Podélná rozteč	$s_2$	0,09	[m]
Příčná rozteč	$3 \cdot s_1$	0,240	[m]
Výška mříže	$h$	3,7	[m]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	21	[-]
Počet řad	$n_{rad}$	3	[-]

Tabulka 16: Geometrie mříže



Obrázek 12: Teploty v oblasti mříže



Obrázek 13: Rozvolnění mříže

**Teplotu spalin na výstupu z mříže volím**

$$t_{MO}^{SP} = 917,44 [^{\circ}C]$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř} = \frac{t_{OK10}^{SP} + t_{MO}^{SP}}{2} = \frac{934,88 + 917,44}{2} = 926,16 [^{\circ}C] \quad (7.46)$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = a \cdot b - n_{tr} \cdot \frac{1}{n_{řad}} \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D^2$$

$$F_{sp} = 5,2 \cdot 3,68 - 64 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 0,0603^2 = 14,55 [m^2] \quad (7.47)$$

**Střední rychlost proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{\dot{V}_{SP}^{skut}}{F_{sp}} = \frac{273,73}{12,10} = 18,81 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (7.48)$$

**Skutečný objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{SP}^{skut} = \dot{V}_{sp} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = 62,34 \cdot \frac{273,15 + 926,16}{273,15} = 273,73 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (7.49)$$

**Objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{sp} = O_{SV}^r \cdot M_{pal} = 13,29 \cdot 4,69 = 62,34 \left[ \frac{Nm^3}{s} \right] \quad (7.50)$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\begin{aligned}\alpha_k &= 0,02 \cdot \frac{\lambda}{D} \left( \frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_s \cdot c_z = \\ &= 0,02 \cdot \frac{0,108}{0,0603} \left( \frac{18,81 \cdot 0,0603}{159,9 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,63^{0,33} \cdot 0,923 \cdot 0,929 \\ \alpha_k &= 57,50 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]\end{aligned}\quad (7.51)$$

kde  $c_s \cdot c_z$  jsou opravné koeficienty dle [1].

$\lambda, \nu, Pr$  jsou určeny pro střední hodnotu spalin v oblasti P3 dle [2].

### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalin

$$\begin{aligned}\alpha_{sál} &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{Stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,08 \cdot (926,16 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{926,16 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{926,16 + 273,15} \right)} \\ \alpha_{sál} &= 27,18 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]\end{aligned}\quad (7.52)$$

kde  $a_{st}$  je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu  $a_{st} = 0,8$  dle [1].

### Stupeň černosti proudu spalin při teplotě $T_{P3Stř}^{SP}$

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,18} = 0,16 [-] \quad (7.53)$$

### Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s = 18,53 \cdot 0,27 \cdot 0,1 \cdot 0,22 = 0,18 [-] \quad (7.54)$$

### Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$\begin{aligned}s &= 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{3 \cdot s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,24 \cdot 0,0675}{0,038} - 1 \right) \\ s &= 0,22 [m]\end{aligned}\quad (7.55)$$

### Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$\begin{aligned}k_s &= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{Stř} + 273,15}{1000} \right) \\ k_s &= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,22}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{926,16 + 273,15}{1000} \right) = 18,53 [-]\end{aligned}\quad (7.56)$$

### Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

Určuji pouze jednu, její hodnota se nemění.

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18 + 0,09 = 0,27 [-] \quad (7.57)$$

**Objemová koncentrace vodní páry a dalších tříatomových plynů ve spalinách**

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2Omin}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad (7.58)$$

$$r_{H_2O} = \frac{1,99930 + (1,016 - 1) \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,57071}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384} = 0,18 [-]$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2min} + O_{SO_2min}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}} = \frac{1,01693 + 0}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384} \quad (7.59)$$

$$r_{RO_2} = 0,09 [-]$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách**

$$p_s = r_s \cdot p = 0,27 \cdot 0,1 = 0,027 [MPa] \quad (7.60)$$

**Teplota nánosu na straně spalin**

$$t_z = t_m + \Delta t = 319,44 + 25 = 344,44 [^\circ C] \quad (7.61)$$

kde  $t_m$  je teplota média v trubkách a  $\Delta t$  se pro spalování plynu volí u všech ploch 25 °C dle [1].

**Celková výhřevná plocha membránových stěn v oblasti OK1**

$$S = \pi \cdot h \cdot D \cdot n_{trcelk} = \pi \cdot 3,4 \cdot 0,0603 \cdot 64 \quad (7.62)$$

$$S = 41,22 [m^2]$$

**Celkový součinitel přestupu tepla**

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 1.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 1 \cdot 57,50 + 27,18 = 84,68 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7.63)$$

**Součinitel prostupu tepla**

$\psi$  je součinitel tepelné efektivity, pro spalování plynu odpovídá hodnotě 0,85 u všech ploch.

$$k = \psi \cdot \alpha_s = 0,85 \cdot 84,68 = 71,97 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7.64)$$

**Teplo přijaté membránovou stěnou v oblasti mříže**

$$Q_{ms}^{Mříž} = k \cdot S \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 71,97 \cdot 41,22 \cdot 606,68 \cdot 10^{-3} = 1799,97 [kW] \quad (7.65)$$



### Teplotní logaritmický spád

$\Delta t_v$  je větším z rozdílů teplot spalin a média a  $\Delta t_m$  je menším z rozdílů.

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{615,45 - 598,00}{\ln \frac{615,45}{598,00}} = 606,68 [^{\circ}\text{C}] \quad (7.66)$$

### 7.7. Celková tepla v oblasti mříže

#### Měrná entalpie spalin na výstupu z oblasti OK1

$$i_{Mříž}^{sp} = \frac{Q_{Mříž}^{sp}}{M_{pal}} = \frac{82720,60}{4,69} = 17561,56 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \right] \quad (7.102)$$

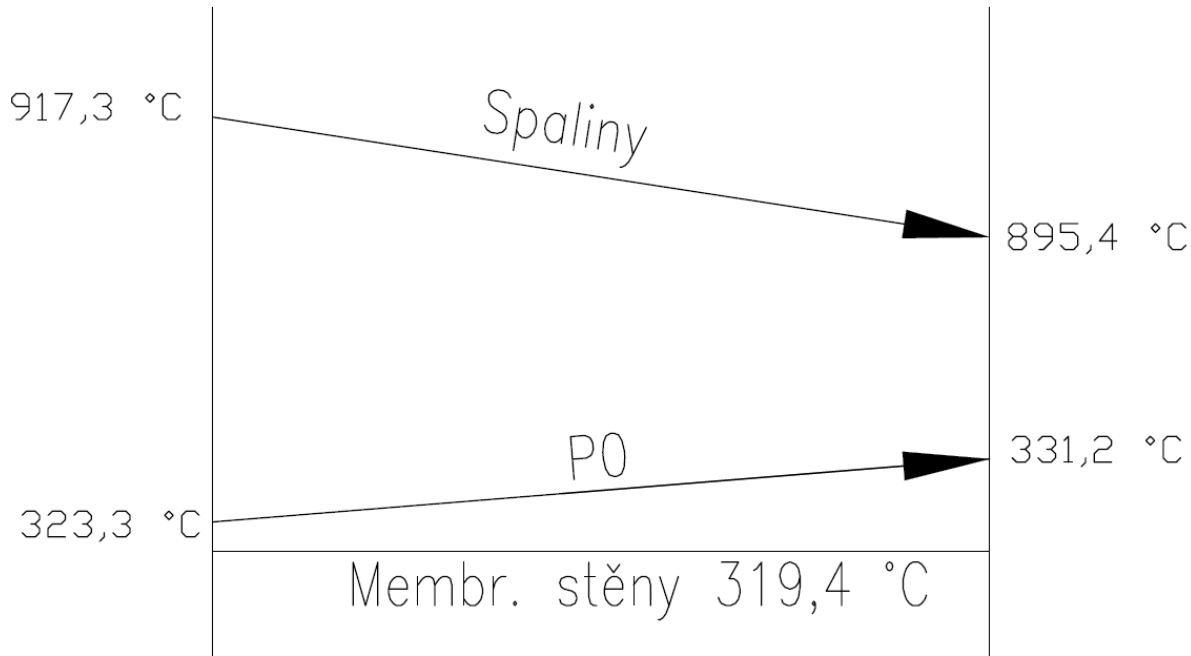
Což odpovídá volené teplotě na začátku výpočtu oblasti s odchylkou 0,10 °C.

#### Tepla spalin na výstupu z oblasti OK1 a změna tepla spalin

$$Q_{Mříž}^{sp} = Q_{OK1}^{sp} - Q_{ms}^{Mříž} = 84520,57 - 1799,97 = 82720,60 [\text{kW}]$$
$$\Delta Q_{Mříž}^{sp} = Q_{OK1}^{sp} - Q_{Mříž}^{sp} = 84520,57 - 82720,60 = 1799,97 [\text{kW}] \quad (7.45)$$

### 7.8. Návrh oblasti obratové komory OK2

Po mříži následuje obratová komora OK2, jejíž výška je shodná s velikostí mříže, tedy 3,4 m. OK2 je tvořena přehřívačem P0 umístěným na stropě a zadní stěnou a membránovou stěnou výparníku na bocích.



Obrázek 14: Teploty v oblasti OK2

**Teplotu spalin na výstupu z části OK1 volím**

$$t_{OK20}^{SP} = 895,40 [^{\circ}C]$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř} = \frac{t_{MO}^{SP} + t_{OK20}^{SP}}{2} = \frac{917,34 + 895,40}{2} = 906,42 [^{\circ}C] \quad (7.67)$$

**Střední světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = \frac{a \cdot b + a \cdot h}{2} = \frac{5,2 \cdot 3,68 + 5,2 \cdot 3,4}{2} = 19,19 [m^2] \quad (7.68)$$

**Střední rychlost proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{\dot{V}_{SP}^{skut}}{F_{sp}} = \frac{269,22}{19,19} = 14,03 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (7.69)$$

**Skutečný objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{SP}^{skut} = \dot{V}_{sp} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = 62,34 \cdot \frac{273,15 + 906,42}{273,15} = 269,22 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (7.70)$$

### Objemový průtok spalin

$$\dot{V}_{sp} = O_{SV}^r \cdot M_{pal} = 13,29 \cdot 4,69 = 62,34 \left[ \frac{Nm^3}{s} \right] \quad (7.71)$$

### 7.9. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti OK2 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,107}{4,32} \left( \frac{14,03 \cdot 4,32}{156,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,62^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 13,88 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (7.72)$$

Kde  $c_t, c_l, c_m$  jsou opravné koeficienty dle [1] a v tomto případě jsou jejich hodnoty rovny 1.

$\lambda, \nu, Pr$  jsou určeny pro střední hodnotu spalin v oblasti OK2 dle [2].

#### Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 19,10}{21,58} = 4,32 [m] \quad (7.73)$$

#### Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (5,2 + 3,68) = 17,76 [m] \quad (7.74)$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalin

Pro čisté spaliny při spalování plynu platí vztah

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{Stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)}$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,37 \cdot (906,42 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{906,42 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{906,42 + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_{sál} = 58,00 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (7.75)$$

kde  $a_{st}$  je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu  $a_{st} = 0,8$  dle [1].

#### Stupeň černosti proudu spalin při teplotě $T_{P3Stř}^{SP}$

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,45} = 0,37 [-] \quad (7.76)$$

#### Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s = 6,80 \cdot 0,27 \cdot 0,1 \cdot 2,45 = 0,45 [-] \quad (7.77)$$

### Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{4 \cdot 5,2 \cdot 3,68}{2 \cdot 3,68 \cdot 3,7 + 2 \cdot 5,2 \cdot 3,7 + 2 \cdot 5,2 \cdot 3,64} = 2,45 \text{ [m]} \quad (7.78)$$

### Součinitel zeslabení sálení tříatomovými plyny

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

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 2,45}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{906,42 + 273,15}{1000} \right) = 6,80 \text{ [-]} \quad (7.79)$$

### Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

Určuji pouze jednou, její hodnota se nemění.

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18 + 0,09 = 0,27 \text{ [-]} \quad (7.80)$$

### Objemová koncentrace vodní páry a dalších tříatomových plynů ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2Omin}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{1,99930 + (1,016 - 1) \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,57071}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384} = 0,18 \text{ [-]} \quad (7.81)$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2min} + O_{SO_2min}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}} = \frac{1,01693 + 0}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384}$$

$$r_{RO_2} = 0,09 \text{ [-]} \quad (7.82)$$

### Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$p_s = r_s \cdot p = 0,27 \cdot 0,1 = 0,027 \text{ [MPa]} \quad (7.83)$$

### Teplota nánosů na straně spalin

$$t_z = t_m + \Delta t = 319,44 + 25 = 344,44 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7.84)$$

kde  $t_m$  je teplota média v trubkách a  $\Delta t$  se pro spalování plynu volí u všech ploch  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  dle [1].

### Celková výhřevná plocha membránových stěn v oblasti OK2

$$S_{ST} = 2 \cdot h \cdot b = 2 \cdot 3,4 \cdot 3,68 = 25,02 \text{ [m}^2\text{]} \quad (7.85)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 0,9.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 0,9 \cdot 13,88 + 58,00 = 70,50 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (7.86)$$

### Součinitel prostupu tepla

$\psi$  je součinitel tepelné efektivity, pro spalování plynu odpovídá hodnotě 0,85 u všech ploch.

$$k = \psi \cdot \alpha_s = 0,85 \cdot 70,50 = 59,92 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7.87)$$

### Teplo přijaté membránovou stěnou v oblasti OK2

$$Q_{ms}^{OK} = k \cdot S_{ST} \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 59,92 \cdot 25,02 \cdot 586,91 \cdot 10^{-3} = 880,06 [kW] \quad (7.88)$$

### Teplotní logaritmický spád

$\Delta t_v$  je větší z rozdílů teplot spalin a média a  $\Delta t_m$  je menším z rozdílů.

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{598,00 - 575,96}{\ln \frac{598,00}{575,96}} = 586,91 [^\circ C] \quad (7.89)$$

### 7.10. Tepelný výpočet přehříváku P0 v oblasti OK2

Přehřívák P0 tvoří v oblasti OK2 strop a zadní stěnu. Je zapojen souprůdě se spalinami. Je tvořen membránovou stěnou s roztečí 80 mm, shodnou s membránovou stěnou výparníku, a trubkami o průměru 38 mm.

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,038	[m]
Tloušťka stěny	t	0,004	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,030	[m]
Příčná rozteč	$s_1$	0,08	[m]
Délka trubek v úseku	$l_e$	3,68	[m]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	64	[-]

Tabulka 17: Geometrie přehříváku P0

	Vstup	Výstup	Střední hodnota
Tlak [MPa]	11,175	11,150	11,1625
Teplota [°C]	323,27	331,22	327,24
Entalpie [kJ/kg]	2732,88	2783,08	2745,76
Měrný objem v $[m^3 \cdot kg^{-1}]$	0,0162	0,0173	0,0168
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$			0,0832
Dynamická viskozita $\eta [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$			$2,12 \cdot 10^{-5}$
Prandtlovo číslo Pr [-]			1,74

Tabulka 18: Parametry páry v přehříváku P0

### Součinitel přestupu tepla ze strany páry

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0832}{0,03} \left( \frac{9,42 \cdot 0,03}{21,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0159} \right)^{0,8} \cdot 1,74^{0,4} = 4202,89 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (7.90)$$

### **Střední rychlost proudění páry**

$$w_p = \frac{M_{pp}^{P0} \cdot v}{F_p} = \frac{25,39 \cdot 0,0159}{0,05} = 9,42 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (7.91)$$

### **Průtočný průřez pro páru**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,03}{4} \cdot 64 = 0,05 [m^2] \quad (7.92)$$

### **Součinitel přestupu konvekcí tepla ze strany spalin**

Je shodný se součinitelem přestupu tepla u membránových stěn.

$$\alpha_k = 13,88 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

### **Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalin**

Hodnoty  $a_{st}$ ,  $a$ ,  $T_{stř}$  jsou shodné jako ve výpočtu membránových stěn.

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,14 \cdot (906,42 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{352,24 + 273,15}{906,42 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{352,24 + 273,15}{906,42 + 273,15} \right)} \quad (7.93)$$

$$\alpha_{sál} = 58,53 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

### **Teplota nánosu na straně spalin**

Vypočtena opět jako u membránových stěn, pouze se změnou teploty média.

$$t_z = t_m + \Delta t = 327,24 + 25 = 352,24 [^{\circ}C] \quad (7.94)$$

### **Celkový součinitel přestupu tepla**

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 0,9.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 0,9 \cdot 13,88 + 58,53 = 71,02 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (7.95)$$

### **Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 \cdot 71,02}{1 + \frac{71,02}{4202,89}} = 59,36 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (7.96)$$

### **Teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{594,16 - 564,18}{\ln \frac{594,16}{564,18}} = 579,04 [^{\circ}C] \quad (7.97)$$

### Skutečná plocha

$$S = a \cdot b + h \cdot a = 5,2 \cdot 3,68 + 3,40 \cdot 5,2 = 38,82 \text{ [m}^2\text{]} \quad (7.98)$$

### Teplo přijaté přehřívákem P0 v oblasti OK2

$$\begin{aligned} Q_{P0}^{OK2} &= k \cdot S \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 59,36 \cdot 38,82 \cdot 579,04 \cdot 10^{-3} \\ Q_{p0}^{OK2} &= 1265,52 \text{ [kW]} \end{aligned} \quad (7.99)$$

### 7.11. Celková tepla v oblasti OK2

#### Měrná entalpie spalin na výstupu z oblasti OK2

$$i_{OK2}^{sp} = \frac{Q_{OK2}^{sp}}{M_{pal}} = \frac{80575,02}{4,69} = 17173,80 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \right] \quad (7.100)$$

Což odpovídá volené teplotě na začátku výpočtu oblasti s odchylkou 0,12 °C.

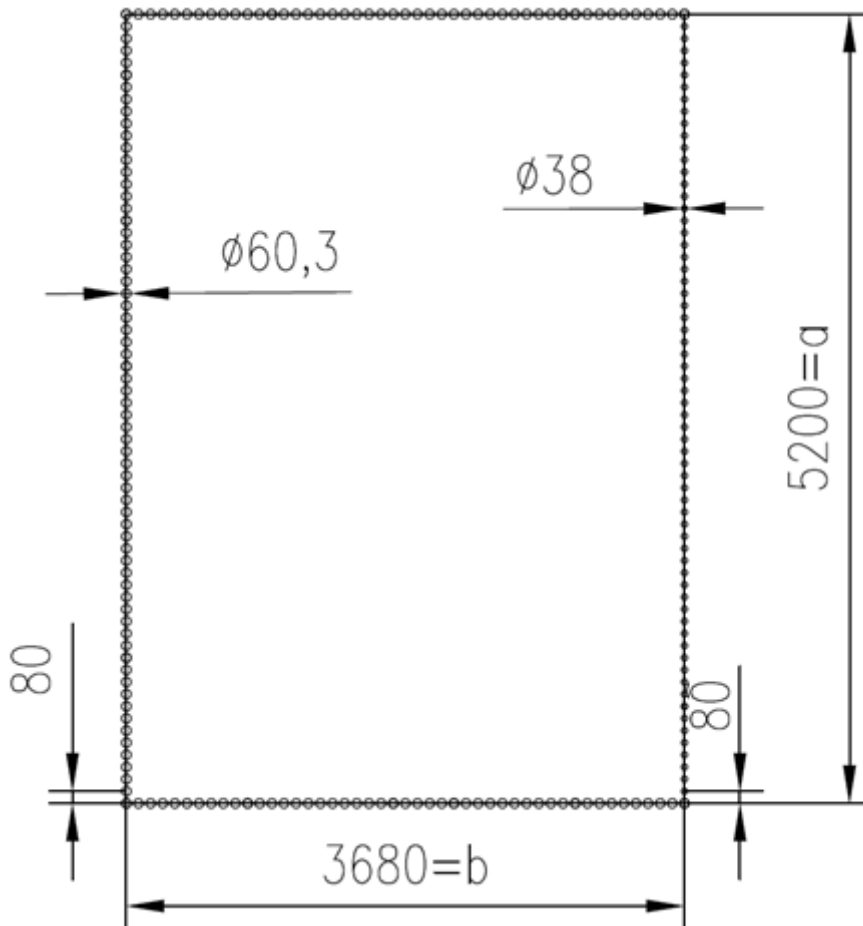
#### Teplo spalin na výstupu z oblasti OK2 a změna tepla spalin

$$\begin{aligned} Q_{OK2}^{sp} &= Q_{Mříž}^{sp} - Q_{ms}^{OK2} - Q_{P0}^{OK2} = 82720,60 - 880,06 - 1265,52 \\ Q_{OK2}^{sp} &= 80575,02 \text{ [kW]} \\ \Delta Q_p^{sp} &= Q_{Mříž}^{sp} - Q_{OK2}^{sp} = 82720,60 - 80575,02 = 2145,59 \text{ [kW]} \end{aligned} \quad (7.101)$$

## 8. Návrh druhého tahu

Druhý tahu má stěny tvořeny membránovými stěnami výparníku a přehříváku P0, nacházejí se v něm přehřívák P1 a ekonomizér EKO1. Z důvodu nižších teplot již není potřeba podpora pro svazky výměníků ve formě závěsných trubek. Metodika výpočtu je dle [1].

Rozměry prvního tahu jsou shodné s rozměry prvního tahu. Při výpočtech opět zanedbávám vyhnutí membránových stěn z důvodu průchodů svazkových výměníků.

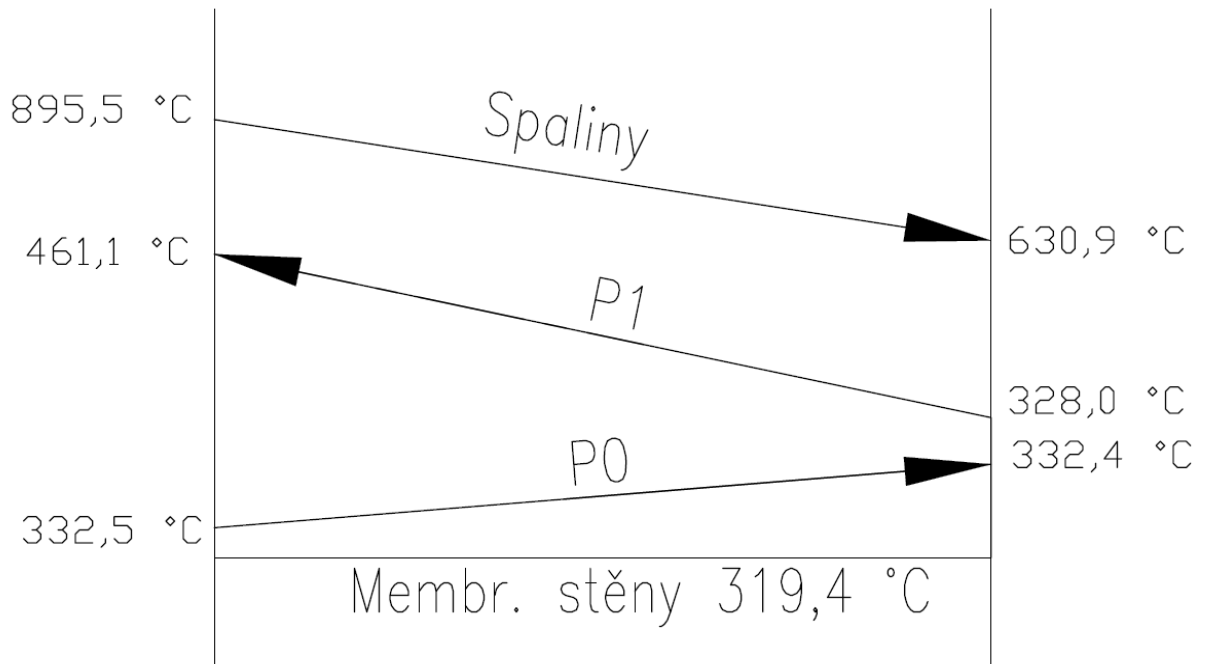


Obrázek 15: Rozměry druhého tahu

### 8.1. Návrh oblasti přehříváku P1

Oblast vstupního přehříváku P1 se skládá z membránových stěn a přehříváků P1 a P0. P1 je řešen jako protiproudý z důvodu lepšího přestupu tepla, je zároveň uspořádán za sebou z technologických důvodů. P0 pokračuje dále souprůdě ze stropu obrátových prostor se stejnou geometrií. Výška svazku činí 1,71 m a výška oblasti je 2,21 m, 5 cm nad svazkem a 45 cm pod svazkem.





Obrázek 16: Teploty v oblasti P1

**Teplotu spalin na výstupu z části P1 volím  $t_{P10}^{SP} = 630,86$  [°C]**

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř} = \frac{t_{OK20}^{SP} + t_{P10}^{SP}}{2} = \frac{895,52 - 630,86}{2} = 763,13 \text{ [°C]} \quad (8.1)$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = a \cdot b - n_{tr} \cdot D \cdot l_e$$

$$F_{sp} = 5,2 \cdot 3,68 - 64 \cdot 0,0337 \cdot 3,52 = 11,54 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8.2)$$

**Střední rychlost proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{\dot{V}_{SP}^{skut}}{F_{sp}} = \frac{236,52}{14,82} = 20,49 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (8.3)$$

**Skutečný objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{SP}^{skut} = \dot{V}_{sp} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = 62,34 \cdot \frac{273,15 + 760,13}{273,15} = 236,52 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (8.4)$$

### Objemový průtok spalín

$$\dot{V}_{sp} = O_{SV}^r \cdot M_{pal} = 13,29 \cdot 4,69 = 62,34 \left[ \frac{Nm^3}{s} \right] \quad (8.5)$$

### 8.2. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti P1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalín

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m =$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0973}{0,188} \left( \frac{20,49 \cdot 0,188}{135,0 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,63^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 36,27 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (8.6)$$

kde  $c_t, c_l, c_m$  jsou opravné koeficienty dle [1] a v tomto případě jsou rovny 1.  
 $\lambda, \nu, Pr$  jsou určeny pro střední hodnotu spalín v oblasti OK2 dle [2].

#### Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 11,54}{245,20} = 0,1883 [m] \quad (8.7)$$

#### Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b) + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D)$$

$$O = 2 \cdot (5,2 + 3,68) + 2 \cdot 32 \cdot (3,52 + 0,038) = 245,20 [m] \quad (8.8)$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalín

Pro čisté spaliny při spalování plynu platí vztah

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,13 \cdot (760,13 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{760,13 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{760,13 + 273,15} \right)} \quad (8.9)$$

$$\alpha_{sál} = 15,59 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

kde  $a_{st}$  je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu  $a_{st} = 0,8$  dle [1].

#### Stupeň černosti proudu spalín při teplotě $T_{P3Stř}^{SP}$

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,14} = 0,13 [-] \quad (8.10)$$

#### Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s = 29,68 \cdot 0,27 \cdot 0,1 \cdot 0,17 = 0,14 [-] \quad (8.11)$$

#### Efektivní tloušťka sálové vrstvy

Určuji pro svazek hladkých trubek P1. Rozteče a průměr viz následující podkapitola.

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4 s_1 \cdot s_2}{\pi D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0337 \cdot \left( \frac{4 \cdot 0,08 \cdot 0,0750}{\pi \cdot 0,038} - 1 \right) = 0,17 [m] \quad (8.12)$$

### Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,17}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{760,13 + 273,15}{1000} \right) = 16,97 [-] \quad (8.13)$$

### Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

Určuji pouze jednou, dále je vždy stejná.

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18 + 0,09 = 0,27 [-] \quad (8.14)$$

### Objemová koncentrace vodní páry a dalších tříatomových plynů ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2Omin}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{1,99930 + (1,016 - 1) \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,57071}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384} = 0,18 [-] \quad (8.15)$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2min} + O_{SO_2min}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}} = \frac{1,01693 + 0}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384}$$

$$r_{RO_2} = 0,09 [-] \quad (8.16)$$

### Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18 + 0,09 = 0,27 [-] \quad (8.17)$$

### Teplota nánosů na straně spalin

$$t_z = t_m + \Delta t = 319,44 + 25 = 344,44 [^{\circ}C] \quad (8.18)$$

kde  $t_m$  je teplota média v trubkách a  $\Delta t$  se pro spalování plynu volí u všech ploch  $25 \text{ }^{\circ}C$  dle [1].

### Celková výhřevná plocha membránových stěn v oblasti P1

$$S_{ST} = 2 \cdot b \cdot h + a \cdot h = 2 \cdot 3,68 \cdot 2,21 + 5,2 \cdot 2,21 = 27,76 [m^2] \quad (8.19)$$

### Součinitel přestupu tepla ze strany média

Pro jeho velikost je uvažován pouze u přehřáté páry a u vzduchu v OVZ. Tedy u membránových stěn je možné jej bezchybně zanedbat.

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 0,95.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 0,95 \cdot 36,27 + 15,59 = 51,08 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8.20)$$

### Součinitel prostupu tepla

$\psi$  je součinitel tepelné efektivity, pro spalování plynu odpovídá hodnotě 0,85 u všech ploch.

$$k = \psi \cdot \alpha_s = 0,85 \cdot 51,08 = 43,42 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8.21)$$

### Teplo přijaté membránovou stěnou v oblasti P1

$$Q_{ms}^{P1} = k \cdot S_{ST} \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 43,42 \cdot 27,76 \cdot 430,22 \cdot 10^{-3} = 518,47 [kW] \quad (8.22)$$

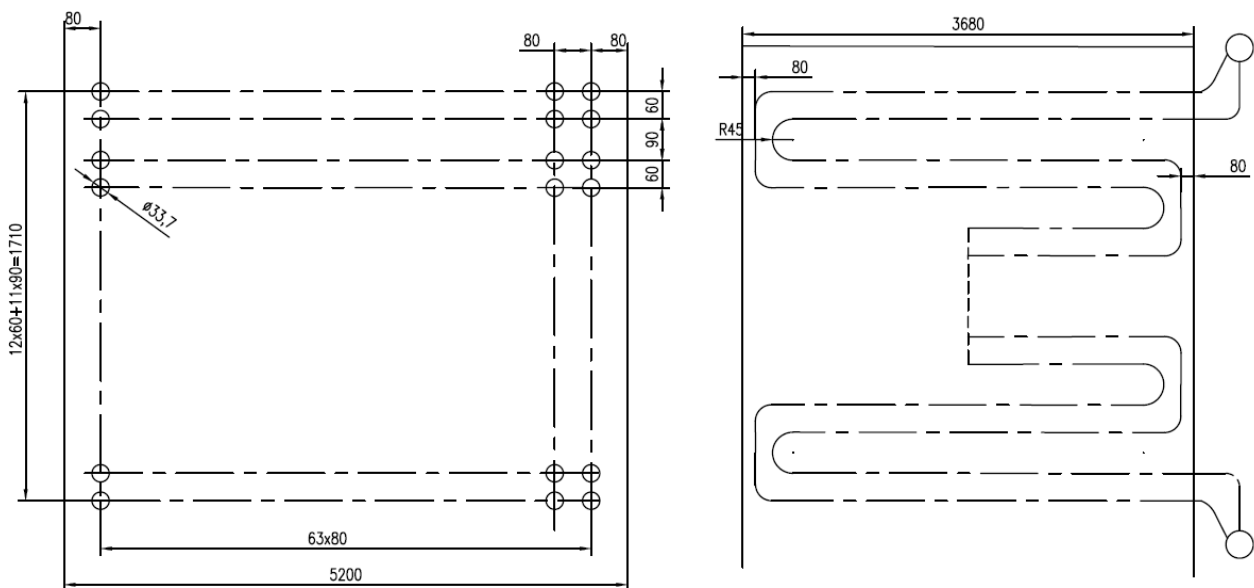
### Teplotní logaritmický spád

$\Delta t_v$  je větším z rozdílů teplot spalin a média a  $\Delta t_m$  je menším z rozdílů.

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{575,95 - 311,43}{\ln \frac{575,95}{311,43}} = 430,22 [^\circ C] \quad (8.23)$$

## 8.2. Tepelný výpočet přehříváku P1

První přehřívák je řešen jako protiproudý dvojhád s hladkými trubkami za sebou.



Obrázek 17: Přehřívák 1

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,0337	[m]
Tloušťka stěny	t	0,004	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,0257	[m]
Příčná rozteč	$s_1$	0,080	[m]
Střední podélná rozteč	$s_2$	0,075	[m]
Efektivní délka trubek	$l_e$	3,52	[m]
Počet řad	$n_{řad}$	12	[-]
Počet hadů	$n_{had}$	2	[-]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	64	[-]

Tabulka 19: Geometrie přehříváku P1

	Vstup	Výstup	Střední hodnota
Tlak [MPa]	11,1	10,9	11,0
Teplota [°C]	327,99	461,05	394,52
Entalpie [kJ/kg]	2769,43	3258,74	3014,09
Měrný objem v [m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]	0,01709	0,02502	0,02106
Součinitel tepelné vodivosti λ [W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]			0,0692
Dynamická viskozita η [kg · m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> ]			2,33 · 10 <sup>-5</sup>
Prandtlovo číslo Pr [-]			1,26

Tabulka 20: Parametry páry v přehříváku P1

### Součinitel přestupu tepla ze strany páry

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0692}{0,0257} \left( \frac{16,10 \cdot 0,0257}{2,33 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0211} \right)^{0,8} \cdot 0,99^{0,4} = 3740,48 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8.24)$$

### Střední rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pp}^{P1} \cdot v}{F_p} = \frac{50,83 \cdot 0,0313}{0,09} = 16,10 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (8.25)$$

### Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{had} = \frac{\pi \cdot 0,0257^2}{4} \cdot 64 \cdot 2 = 0,03 [m^2] \quad (8.26)$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin

$$\alpha_k = 0,02 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \left( \frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33}$$

$$\alpha_k = 0,02 \cdot 1 \cdot 1,01 \cdot \frac{0,0973}{0,0337} \left( \frac{20,49 \cdot 0,0337}{135,0 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,63^{0,33} = 128,29 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8.27)$$

kde korekční součinitele  $C_z, C_s$  jsou vypočteny dle [1].

$\lambda, \nu, Pr$  jsou určeny pro střední hodnotu spalin v oblasti P1 dle [2].

### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalin

Hodnoty  $a_{st}, a, T_{stř}$  jsou shodné jako ve výpočtu membránových stěn.

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)}$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,13 \cdot (763,13 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{419,52 + 273,15}{763,13 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{419,52 + 273,15}{763,13 + 273,15} \right)} \quad (8.28)$$

$$\alpha_{sál} = 17,21 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### Teplota nánosu na straně spalin

Vypočtena opět jako u membránových stěn, pouze se změnou teploty média.

$$t_z = t_m + \Delta t = 394,52 + 25 = 419,52 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.29)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 1.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 1 \cdot 128,29 + 17,21 = 145,50 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (8.30)$$

### Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 \cdot 145,50}{1 + \frac{145,50}{3740,48}} = 119,04 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (8.31)$$

### Teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{434,35 - 302,87}{\ln \frac{434,35}{302,87}} = 364,67 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.32)$$

### Plocha jedné řady trubek

$$S_{\text{řada}} = \pi \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{had} \cdot D = \pi \cdot 3,52 \cdot 64 \cdot 2 \cdot 0,0337 = 47,70 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8.33)$$

### Skutečná plocha

$$S_{skut} = S_{\text{řada}} \cdot n_{\text{řad}} = 47,70 \cdot 12 = 572,42 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8.34)$$

### Teplu přijaté přehřívákem P1

$$Q^{P1} = k \cdot S_{skut} \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 119,04 \cdot 572,42 \cdot 364,67 \cdot 10^{-3} \\ Q^{P1} = 24849,61 \text{ [kW]} \quad (8.35)$$

### 8.3. Tepelný výpočet přehříváku P0 v oblasti P1

Přehřívák P0 tvoří v oblasti P1 zadní stěnu. Je zapojen souproudě se spalinami. Je tvořen membránovou stěnou s roztečí 80 mm, shodnou s membránovou stěnou výparníku, a trubkami o průměru 38 mm.

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,038	[m]
Tloušťka stěny	t	0,004	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,030	[m]
Příčná rozteč	$s_1$	0,08	[m]
Délka trubek v úseku	$l_e$	3,68	[m]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	64	[-]

Tabulka 21: Geometrie přehříváku P0

	Vstup	Výstup	Střední hodnota
Tlak [MPa]	11,150	11,125	11,138
Teplota [°C]	331,22	332,49	331,86
Entalpie [kJ/kg]	2282,72	2790,99	2786,86
Měrný objem $v$ [ $m^3 \cdot kg^{-1}$ ]	0,0173	0,0175	0,0174
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]			0,0831
Dynamická viskozita $\eta$ [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ]			$2,12 \cdot 10^{-5}$
Prandtlovo číslo $Pr$ [-]			1,74

Tabulka 22: Parametry páry v přehříváku P0

### Součinitel přestupu tepla ze strany páry

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0831}{0,03} \left( \frac{9,78 \cdot 0,03}{21,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0174} \right)^{0,8} \cdot 1,74^{0,4} = 4330,22 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8.36)$$

### Střední rychlost proudění páry

$$w_p = \frac{M_{pp}^{P0} \cdot v}{F_p} = \frac{25,39 \cdot 0,0174}{0,05} = 9,78 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (8.37)$$

### Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,03}{4} \cdot 64 = 0,05 [m^2] \quad (8.38)$$

### Součinitel přestupu konvekcí tepla ze strany spalin

Je shodný se součinitelem přestupu tepla u membránových stěn.

$$\alpha_k = 36,27 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalin

Hodnoty  $a_{st}$ ,  $a$ ,  $T_{stř}$  jsou shodné jako ve výpočtu membránových stěn.

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,14 \cdot (763,13 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{356,86 + 273,15}{763,13 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{356,86 + 273,15}{763,13 + 273,15} \right)} \quad (8.39)$$

$$\alpha_{sál} = 15,85 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

### Teplota nánosů na straně spalin

Vypočtena opět jako u membránových stěn, pouze se změnou teploty média.

$$t_z = t_m + \Delta t = 331,86 + 25 = 356,86 [°C] \quad (8.40)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 0,9.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 0,9 \cdot 36,27 + 15,85 = 52,11 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (8.41)$$

### Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 \cdot 52,11}{1 + \frac{52,11}{4330,22}} = 43,77 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (8.42)$$

### Teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{564,18 - 298,37}{\ln \frac{564,18}{298,37}} = 417,26 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.43)$$

### Skutečná plocha

$$S = h \cdot a = 2,21 \cdot 5,2 = 11,49 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8.44)$$

### Tepllo přijaté přehřívákem P0 v oblasti P1

$$Q_{P0}^{P1} = k \cdot S \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 43,77 \cdot 11,49 \cdot 417,26 \cdot 10^{-3} \\ Q_{p0}^{P1} = 209,88 \text{ [kW]} \quad (8.45)$$

## 8.4. Celková tepla v oblasti P1

### Měrná entalpie spalín na výstupu z oblasti P1

$$i_{P1}^{sp} = \frac{Q_{P1}^{sp}}{M_{pal}} = \frac{54997,06}{4,70} = 11722,10 \left[ \frac{kJ}{Nm^3} \right] \quad (8.46)$$

Ta odpovídá volené teplotě na začátku výpočtu oblasti s odchylkou 0,08 °C.

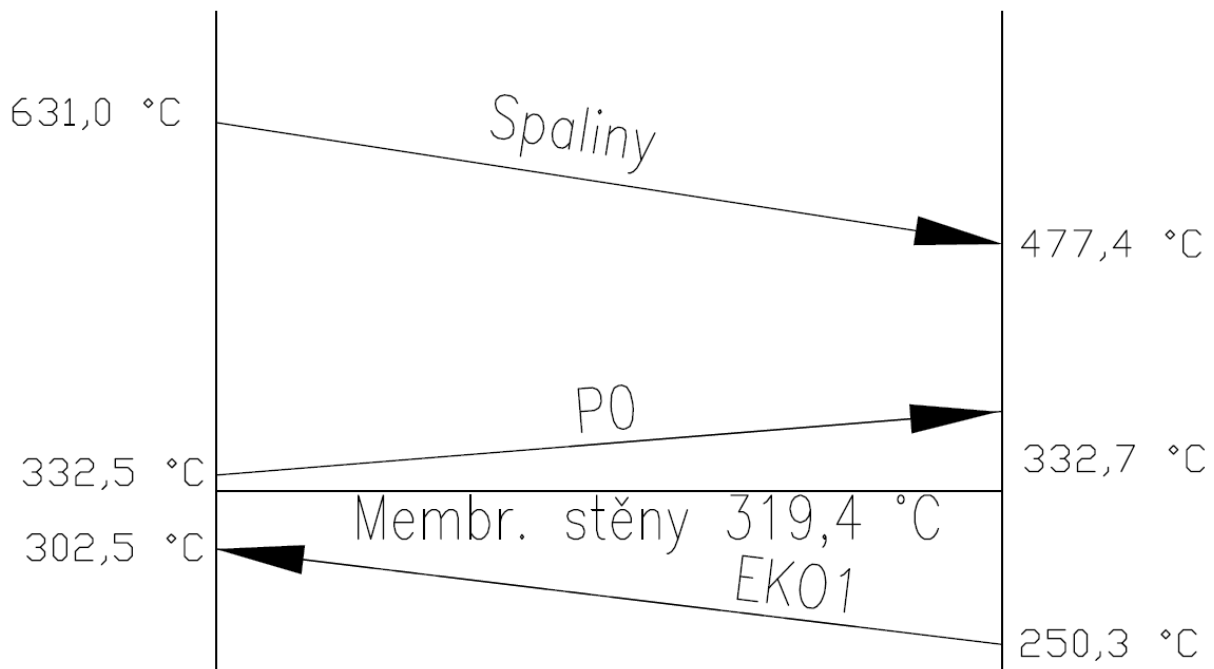
### Tepllo spalín na výstupu z oblasti P1 a změna tepla spalín

$$Q_{P1}^{sp} = Q_{OK2}^{sp} - Q_{ms}^{P1} - Q_{P0}^{P1} - Q^{P1} = 80575,02 - 518,47 - 209,88 - 24849,61 \\ Q_{OK2}^{sp} = 54997,06 \text{ [kW]} \\ \Delta Q_p^{sp} = Q_{OK2}^{sp} - Q_{P1}^{sp} = 80575,02 - 54997,06 = 25577,96 \text{ [kW]} \quad (8.47)$$

## 8.5. Návrh oblasti ekonomizéru EKO1

Ekonomizér EKO1 je zařazen do oblasti s chlazenými stěnami z důvodu snížení teploty spalín pod 500 °C před jejich zavedením do nechlazeného plechového kanálu. Ekonomizér je řešen jako protiproudý dvojhad, trubky jsou uspořádány za sebou. Boční a přední stěny jsou stále výparníkové membránové stěny a zadní je přehřívák P0. Výška svazku činí 1,41 m a výška oblasti 2,09 m.





Obrázek 18: Teploty v oblasti EKO1

**Teplotu spalin na výstupu z části EKO1 volím**

$$t_{EKO10}^{SP} = 477,45 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř} = \frac{t_{P10}^{SP} + t_{EKO10}^{SP}}{2} = \frac{630,98 - 477,45}{2} = 554,15 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.48)$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = a \cdot b - n_{tr} \cdot D \cdot l_e$$

$$F_{sp} = 5,2 \cdot 3,68 - 64 \cdot 0,0337 \cdot 3,52 = 11,54 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8.48)$$

**Střední rychlost proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{\dot{V}_{SP}^{skut}}{F_{sp}} = \frac{188,82}{14,82} = 16,36 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (8.49)$$

**Skutečný objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{SP}^{skut} = \dot{V}_{sp} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = 62,34 \cdot \frac{273,15 + 554,15}{273,15} = 188,82 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (8.50)$$

**Objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{sp} = O_{SV}^r \cdot M_{pal} = 13,29 \cdot 4,69 = 62,34 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right] \quad (8.51)$$

### 8.6. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti EKO1 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalín

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m =$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0789}{0,188} \left( \frac{16,36 \cdot 0,188}{135,0 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,66^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 33,07 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (8.52)$$

kde  $c_t, c_l, c_m$  jsou opravné koeficienty dle [1] a v tomto případě jsou rovny 1.  
 $\lambda, \nu, Pr$  jsou určeny pro střední hodnotu spalín v oblasti EKO1 dle [2].

#### Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 11,54}{245,20} = 0,1883 [m] \quad (8.53)$$

#### Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b) + 2 \cdot n_{tr} \cdot (l_e + D)$$

$$O = 2 \cdot (5,2 + 3,68) + 2 \cdot 32 \cdot (3,52 + 0,038) = 245,20 [m] \quad (8.54)$$

#### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalín

Pro čisté spaliny při spalování plynu platí vztah

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)}$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,15 \cdot (554,15 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{554,15 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{554,15 + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_{sál} = 10,87 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (8.55)$$

kde  $a_{st}$  je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu  $a_{st} = 0,8$  dle [1].

#### Stupeň černosti proudu spalín při teplotě $T_{P3Stř}^{SP}$

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,14} = 0,15 [-] \quad (8.56)$$

#### Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s = 33,40 \cdot 0,27 \cdot 0,1 \cdot 0,17 = 0,16 [-] \quad (8.57)$$

#### Efektivní tloušťka sálové vrstvy

Určuji pro svazek hladkých trubek P1. Rozteče a průměr viz následující podkapitola.

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4 s_1 \cdot s_2}{\pi D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0337 \cdot \left( \frac{4 \cdot 0,08 \cdot 0,0750}{\pi \cdot 0,038} - 1 \right) = 0,17 [m] \quad (8.58)$$

#### Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stř} + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,17}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{554,15 + 273,15}{1000} \right) = 33,40 [-] \quad (8.59)$$

### Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách

Určuji pouze jednou, dále je vždy stejná.

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18 + 0,09 = 0,27 [-] \quad (8.60)$$

### Objemová koncentrace vodní páry a dalších tříatomových plynů ve spalínách

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2Omin}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad (8.61)$$

$$r_{H_2O} = \frac{1,99930 + (1,016 - 1) \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,57071}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384} = 0,18 [-]$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2min} + O_{SO_2min}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}} = \frac{1,01693 + 0}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384} \quad (8.62)$$

$$r_{RO_2} = 0,09 [-]$$

### Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18 + 0,09 = 0,27 [-] \quad (8.63)$$

### Teplota nánosů na straně spalin

$$t_z = t_m + \Delta t = 319,44 + 25 = 344,44 [^{\circ}C] \quad (8.64)$$

kde  $t_m$  je teplota média v trubkách a  $\Delta t$  se pro spalování plynu volí u všech ploch  $25^{\circ}C$  dle [1].

### Celková výhřevná plocha membránových stěn v oblasti EKO1

Výška oblasti je spočtena jako výška svazku  $+0,73$  m, z čehož je  $0,45$  m nad svazkem.

$$S_{ST} = 2 \cdot b \cdot h + a \cdot h = 2 \cdot 3,68 \cdot 2,09 + 5,2 \cdot 2,09 = 26,25 [m^2] \quad (8.65)$$

### Součinitel přestupu tepla ze strany média

Pro jeho velikost je uvažován pouze u přehřáté páry a u vzduchu v OVZ. Tedy u membránových stěn je možné jej bezchybně zanedbat.

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen  $0,95$ .

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 0,95 \cdot 33,07 + 10,87 = 43,39 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (8.66)$$

### Součinitel prostupu tepla

$\psi$  je součinitel tepelné efektivity, pro spalování plynu odpovídá hodnotě  $0,85$  u všech ploch.

$$k = \psi \cdot \alpha_s = 0,85 \cdot 43,39 = 36,88 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (8.67)$$

### Teplu přijaté membránovou stěnou v oblasti EKO1

$$Q_{ms}^{EKO1} = k \cdot S_{ST} \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 36,88 \cdot 26,25 \cdot 226,11 \cdot 10^{-3} = 218,92 [kW] \quad (8.68)$$

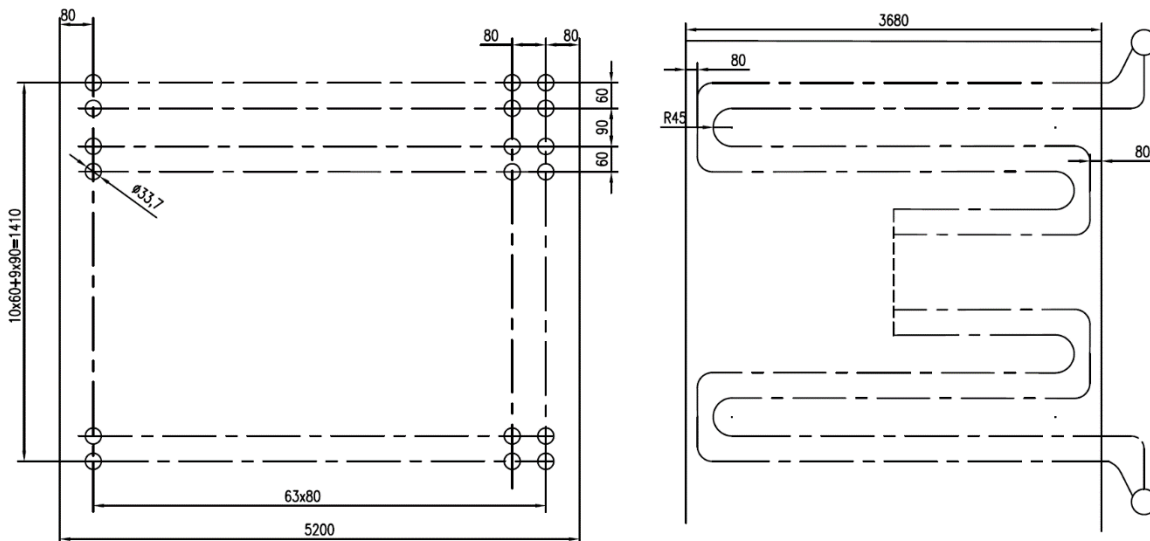
### Teplotní logaritmický spád

$\Delta t_v$  je větším z rozdílů teplot spalin a média a  $\Delta t_m$  je menším z rozdílů.

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{311,43 - 158,01}{\ln \frac{311,43}{158,01}} = 226,11 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.69)$$

### 8.7. Tepelný výpočet ekonomizéru EKO1

Ekonomizér EKO1 je řešen shodně jako přehřívák P1, tedy jako dvojhad z hladkých trubek uspořádaných za sebou. Jak již bylo psáno na začátku této části, EKO1 má funkci snížení teploty spalin pod 500 °C, aby bylo možné je zavést do nechlazeného plechového kanálu.



Obrázek 19: Ekonomizér EKO1

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,0337	[m]
Tloušťka stěny	t	0,004	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,0257	[m]
Příčná rozteč	$s_1$	0,080	[m]
Střední podélná rozteč	$s_2$	0,075	[m]
Efektivní délka trubek	$l_e$	3,52	[m]
Počet řad	$n_{řad}$	10	[-]
Počet hadů	$n_{had}$	2	[-]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	64	[-]

Tabulka 23: Geometrie přehříváku P1

	Vstup	Výstup	Střední hodnota
Tlak [MPa]	11,30	11,20	11,25
Teplota [°C]	250,23	302,52	276,76
Entalpie [kJ/kg]	1086,97	1360,18	1223,58
Měrný objem v [m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]	0,00141	0,00123	0,00132

Tabulka 24: Parametry vody v EKO1

### Součinitel přestupu tepla na straně vody

Součinitel přestupu tepla na straně vody lze pro jeho velikost zanedbat.

### Střední rychlost proudění vody

$$w_w = \frac{M_{pp}^{EKO1} \cdot v}{F_p} = \frac{50,83 \cdot 0,00132}{0,03} = 1,01 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (8.70)$$

### Průtočný průřez pro vodu

$$F_w = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{had} = \frac{\pi \cdot 0,0257^2}{4} \cdot 64 \cdot 2 = 0,03 [m^2] \quad (8.71)$$

### Součinitel přestupu konvekcí tepla ze strany spalin

$$\alpha_k = 0,02 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \left( \frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33}$$

$$\alpha_k = 0,02 \cdot 1 \cdot 1,01 \cdot \frac{0,0789}{0,0337} \left( \frac{16,36 \cdot 0,0337}{95,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,66^{0,33} = 114,45 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8.72)$$

kde korekční součinitele  $C_z, C_s$  jsou vypočteny dle [1].

$\lambda, \nu, Pr$  jsou určeny pro střední hodnotu spalin v oblasti EKO1 dle [2]

### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalin

Hodnoty  $a_{st}, a, T_{stř}$  jsou shodné jako ve výpočtu membránových stěn.

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)}$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,15 \cdot (554,15 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{301,38 + 273,15}{554,15 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{301,38 + 273,15}{554,15 + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_{sál} = 10,12 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8.73)$$

### Teplota nánosu na straně spalin

Vypočtena opět jako u membránových stěn, pouze se změnou teploty média.

$$t_z = t_m + \Delta t = 276,38 + 25 = 301,38 [^\circ C] \quad (8.74)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 1.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 1 \cdot 114,45 + 10,12 = 124,57 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8.75)$$

### Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \alpha_s = 0,85 \cdot 124,57 = 105,89 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8.76)$$

### Teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{328,35 - 227,21}{\ln \frac{328,35}{227,21}} = 274,68 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.77)$$

### Plocha jedné řady trubek

$$S_{1řada} = \pi \cdot l_e \cdot n_{tr} \cdot n_{had} \cdot D = \pi \cdot 3,52 \cdot 64 \cdot 2 \cdot 0,0337 = 47,70 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8.78)$$

### Skutečná plocha

$$S_{skut} = S_{1řada} \cdot n_{řad} = 47,70 \cdot 10 = 477,02 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8.79)$$

### Teplo přijaté ekonomizérem EKO1

$$Q^{EKO1} = k \cdot S_{skut} \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 105,89 \cdot 477,02 \cdot 274,68 \cdot 10^{-3} \\ Q^{EKO1} = 13873,94 \text{ [kW]} \quad (8.80)$$

## 8.8. Tepelný výpočet přehříváku P0 v oblasti EKO1

Přehřívák P0 tvoří v oblasti EKO1 zadní stěnu. Je zapojen souproudě se spaliny. Je tvořen membránovou stěnou s roztečí 80 mm, shodnou s membránovou stěnou výparníku, a trubkami o průměru 38 mm.

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,038	[m]
Tloušťka stěny	t	0,004	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,030	[m]
Příčná rozteč	$s_1$	0,08	[m]
Délka trubek v úseku	$l_e$	3,68	[m]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	64	[-]

Tabulka 25: Geometrie přehříváku P0

	Vstup	Výstup	Střední hodnota
Tlak [MPa]	11,125	11,1	11,113
Teplota [°C]	332,49	332,74	332,62
Entalpie [kJ/kg]	2790,99	2794,37	2792,68
Měrný objem v [m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]	0,0175	0,0175	0,0174
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]			0,0832
Dynamická viskozita $\eta$ [kg · m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> ]			$2,12 \cdot 10^{-5}$
Prandtlovo číslo Pr [-]			1,74

Tabulka 26: Parametry páry v přehříváku P0

### Součinitel přestupu tepla ze strany páry

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \\ \alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,0832}{0,03} \left( \frac{9,82 \cdot 0,03}{21,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0174} \right)^{0,8} \cdot 1,74^{0,4} = 4346,40 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8.81)$$

### **Střední rychlost proudění páry**

$$w_p = \frac{M_{pp}^{P0} \cdot v}{F_p} = \frac{25,37 \cdot 0,0174}{0,05} = 9,82 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (8.82)$$

### **Průtočný průřez pro páru**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,03}{4} \cdot 64 = 0,05 [m^2] \quad (8.83)$$

### **Součinitel přestupu konvekcí tepla ze strany spalin**

Je shodný se součinitelem přestupu tepla u membránových stěn.

$$\alpha_k = 33,07 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

### **Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalin**

Hodnoty  $a_{st}$ ,  $a$ ,  $T_{stř}$  jsou shodné jako ve výpočtu membránových stěn.

$$\begin{aligned} \alpha_{sál} &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{stř}} \right)} = \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,14 \cdot (554,15 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{3356,86 + 273,15}{554,15 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{3356,86 + 273,15}{554,15 + 273,15} \right)} \end{aligned} \quad (8.84)$$

$$\alpha_{sál} = 11,11 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

### **Teplota nánosu na straně spalin**

Vypočtena opět jako u membránových stěn, pouze se změnou teploty média.

$$t_z = t_m + \Delta t = 332,62 + 25 = 356,86 [^{\circ}C] \quad (8.85)$$

### **Celkový součinitel přestupu tepla**

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 0,9.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 0,9 \cdot 33,07 + 11,11 = 44,17 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (8.86)$$

### **Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_s}{1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = \frac{0,85 \cdot 44,17}{1 + \frac{44,17}{4346,40}} = 37,17 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (8.87)$$

### **Teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{298,37 - 144,71}{\ln \frac{298,37}{144,71}} = 212,35 [^{\circ}C] \quad (8.88)$$

### Skutečná plocha

$$S = h \cdot a = 2,09 \cdot 5,2 = 10,87 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8.89)$$

### Teplo přijaté přehřívákem P0 v oblasti OK2

$$\begin{aligned} Q_{P0}^{EKO1} &= k \cdot S \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 37,17 \cdot 10,87 \cdot 212,35 \cdot 10^{-3} \\ Q_{p0}^{EKO1} &= 85,78 \text{ [kW]} \end{aligned} \quad (8.90)$$

## 8.9. Celková tepla v oblasti EKO1

### Měrná entalpie spalin na výstupu z oblasti EKO1

$$i_{P1}^{sp} = \frac{Q_{EKO1}^{sp}}{M_{pal}} = \frac{40818,42}{4,69} = 8700,06 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \right] \quad (8.91)$$

Což odpovídá volené teplotě na začátku výpočtu oblasti s odchylkou 0,11 °C.

### Teplo spalin na výstupu z oblasti EKO1 a změna tepla spalin

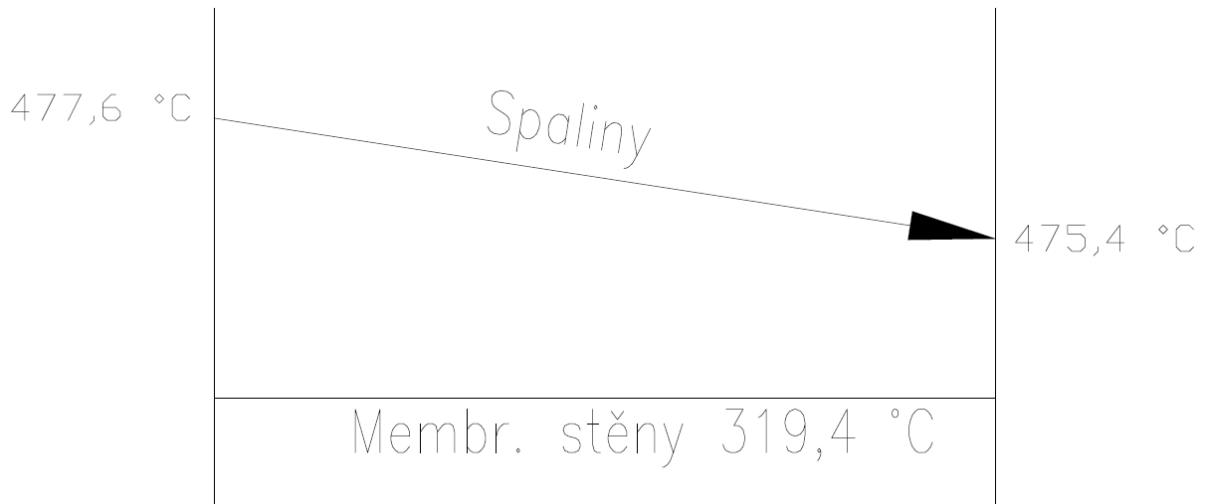
$$\begin{aligned} Q_{EKO1}^{sp} &= Q_{P1}^{sp} - Q_{ms}^{EKO1} - Q_{P0}^{EKO1} - Q^{EKO1} \\ Q_{EKO1}^{sp} &= 11722,10 - 218,92 - 85,78 - 13873,94 = 40818,42 \text{ [kW]} \\ \Delta Q_p^{sp} &= Q_{P1}^{sp} - Q_{EKO1}^{sp} = 11722,10 - 8700,06 = 14178,64 \text{ [kW]} \end{aligned} \quad (8.92)$$



## 9. Návrh obrátového výstupního prostoru

### 9.1. Návrh obrátové komory OK3

Obrátová komora OK3 slouží jako výstup z chlazené části kotle. obsahuje pouze membránovou stěnu. Výška výstupního okna  $c$  je 2,2 m.



Obrázek 20: Teploty v OK3

**Teplotu spalin na výstupu z části OK3 volím**

$$t_{OK3}^{SP} = 475,36 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř} = \frac{t_{EKO10}^{SP} + t_{OK30}^{SP}}{2} = \frac{477,57 - 475,36}{2} = 476,40 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.1)$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = \frac{a \cdot b + a \cdot c}{2}$$

$$F_{sp} = \frac{5,2 \cdot 3,68 + 5,2 \cdot 2,2}{2} = 15,29 \text{ [m}^2\text{]} \quad (9.2)$$

**Střední rychlost proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{\dot{V}_{SP}^{skut}}{F_{sp}} = \frac{171,08}{14,82} = 11,19 \text{ [} \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{]} \quad (9.3)$$

**Skutečný objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{SP}^{skut} = \dot{V}_{sp} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = 62,34 \cdot \frac{273,15 + 476,4}{273,15} = 171,08 \text{ [} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{]} \quad (9.4)$$

**Objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{sp} = O_{SV}^r \cdot M_{pal} = 13,29 \cdot 4,69 = 62,34 \text{ [} \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \text{]} \quad (9.5)$$

## 9.2. Tepelný výpočet membránových stěn v oblasti OK3 Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalín

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m =$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0788}{3,76} \left( \frac{11,19 \cdot 3,76}{95,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,66^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 13,41 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (9.6)$$

kde  $c_t, c_l, c_m$  jsou opravné koeficienty dle [1] a v tomto případě jsou rovny 1.  
 $\lambda, \nu, Pr$  jsou určeny pro střední hodnotu spalín v oblasti OK3 dle [2].

### Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 15,29}{16,28} = 3,76[m] \quad (9.7)$$

### Obvod průřezu kanálu

$$O = \frac{2 \cdot (a + b) + 2 \cdot (a + c)}{2}$$

$$O = \frac{2 \cdot (5,2 + 3,68) + 2 \cdot (5,2 + 2,2)}{2} = 16,28[m] \quad (9.8)$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním ze strany spalín

Pro čisté spaliny při spalování plynu platí vztah

$$\alpha_{sál} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{Stř} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{T_z}{T_{Stř}} \right)}$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,44 \cdot (476,40 + 273,15) \cdot \frac{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{476,40 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{344,44 + 273,15}{476,40 + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_{sál} = 36,63 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (9.9)$$

kde  $a_{st}$  je stupeň černosti povrchu stěn, při výpočtu  $a_{st} = 0,8$  dle [1].

### Stupeň černosti proudu spalín při teplotě $T_{P3Stř}^{SP}$

$$a = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-0,59} = 0,44[-] \quad (9.10)$$

### Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = k_s \cdot r_s \cdot p \cdot s = 8,63 \cdot 0,27 \cdot 0,1 \cdot 2,49 = 0,59 [-] \quad (9.11)$$

### Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

Určuji pro svazek hladkých trubek P1. Rozteče a průměr viz následující podkapitola.

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{2,2 \cdot 3,68 \cdot 0,5 \cdot 5,2}{5,2 \cdot 3,68 + 427,75 \cdot 5,2 + 5,2 \cdot 2,2} = 2,49 [m] \quad (9.12)$$

### Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,18}{3,16 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 0,249}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{476,40 + 273,15}{1000} \right) = 8,63[-] \quad (9.13)$$

### Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

Určuji pouze jednou, dále je vždy stejná.

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18 + 0,09 = 0,27 [-] \quad (9.14)$$

### Objemová koncentrace vodní páry a dalších tříatomových plynů ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2Omin}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{1,99930 + (1,016 - 1) \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,57071}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384} = 0,18 [-] \quad (9.15)$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2min} + O_{SO_2min}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}} = \frac{1,01693 + 0}{10,58222 + (1,05 - 1) \cdot 9,72384}$$

$$r_{RO_2} = 0,09 [-] \quad (9.16)$$

### Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18 + 0,09 = 0,27 [-] \quad (9.17)$$

### Teplota nánosu na straně spalin

$$t_z = t_m + \Delta t = 319,44 + 25 = 344,44 [^{\circ}C] \quad (9.18)$$

kde  $t_m$  je teplota média v trubkách a  $\Delta t$  se pro spalování plynu volí u všech ploch  $25^{\circ}C$  dle [1].

### Celková výhřevná plocha membránových stěn v oblasti EKO1

$$S_{ST} = a \cdot \sqrt{b^2 + c^2} = 5,2 \cdot 427,75 = 30,3884 [m^2] \quad (9.19)$$

### Součinitel přestupu tepla ze strany média

Pro jeho velikost je uvažován pouze u přehřáté páry a u vzduchu v OVZ. Tedy u membránových stěn je možné jej bezchybně zanedbat.

### Celkový součinitel přestupu tepla

$\omega$  je součinitel omývání plochy, po konzultaci volen 0,90.

$$\alpha_s = \omega \cdot \alpha_k + \alpha_{sál} = 0,90 \cdot 13,41 + 36,63 = 46,38 \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (9.20)$$

### Součinitel prostupu tepla

$\psi$  je součinitel tepelné efektivity, pro spalování plynu odpovídá hodnotě 0,85 u všech ploch.

$$k = \psi \cdot \alpha_s = 0,85 \cdot 46,38 = 39,42 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (9.21)$$

### Teplo přijaté membránovou stěnou v oblasti EKO1

$$Q_{ms}^{OK3} = k \cdot S_{ST} \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 39,42 \cdot 30,38 \cdot 156,96 \cdot 10^{-3} = 188,04 [kW] \quad (9.22)$$

### Teplotní logaritmický spád

$\Delta t_v$  je větším z rozdílů teplot spalin a média a  $\Delta t_m$  je menším z rozdílů.

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{158,01 - 155,92}{\ln \frac{158,01}{155,92}} = 156,96 [^\circ C] \quad (9.23)$$

### 9.3. Celková tepla v oblasti OK3

#### Měrná entalpie spalin na výstupu z oblasti OK3

$$i_{P1}^{sp} = \frac{Q_{OK3}^{sp}}{M_{pal}} = \frac{40630,38}{4,69} = 8659,98 \left[ \frac{kJ}{Nm^3} \right] \quad (9.24)$$

Což odpovídá volené teplotě na začátku výpočtu oblasti s odchylkou 0,12 °C.

#### Teplo spalin na výstupu z oblasti OK3 a změna tepla spalin

$$\begin{aligned} Q_{OK3}^{sp} &= Q_{EKO1}^{sp} - Q_{ms}^{OK3} \\ Q_{OK3}^{sp} &= 40818,42 - 188,04 = 40630,38 [kW] \\ \Delta Q_p^{sp} &= Q_{EKO1}^{sp} - Q_{OK3}^{sp} = 40818,42 - 40630,38 = 188,04 [kW] \end{aligned} \quad (9.25)$$

## 10. Návrh plechového kanálu

Plechový kanál je nechlazená část spalinovodu, ve které leží ekonomizér EKO2 a ohřívák vzduchu OVZ. Plechový kanál má rozměry: hloubku  $a = 4,8 \text{ m}$  a šířku  $b = 4,06 \text{ m}$ .

### 10.1. Návrh oblasti ekonomizéru EKO2

Ekonomizér EKO2 je tvořen žebrovanými trubkami uspořádanými za sebou ve dvojřadu. Žebra jsou kruhová s konstantní tloušťkou. Tyto trubky procházejí celým tahem a obrát je za stěnou. EKO2 je rozdělen na dvě části, ale počítán jako jeden, protože rozdělení je v plechovém kanále, kde nemá vliv. Rozdělení je z důvodu prostoru pro možnou pozdější instalaci SCR technologie pro redukci emisí NOx z důvodu zvyšujících se legislativních požadavků. První část EKO2A je tvořena třemi řadami a druhá část EKO2B je tvořena čtyřmi řadami trubek.



Obrázek 21: Teploty v oblasti EKO2

**Teplotu spalin na výstupu z části EKO2 volím**

$$t_{EKO2P}^{SP} = 125,90 [^{\circ}C]$$

**Střední teplota spalin**

$$t_{Stř} = \frac{t_{OK30}^{SP} + t_{EKO20}^{SP}}{2} = \frac{475,48 - 125,90}{2} = 300,63 [^{\circ}C] \quad (10.1)$$

**Světlý průřez spalin**

$$\begin{aligned} F_{sp} &= a \cdot b - n_{tr} \cdot (b \cdot D + n_z \cdot b \cdot t_z \cdot h_z \cdot 2) \\ F_{sp} &= 4,80 \cdot 4,06 - 53 \cdot (4,06 \cdot 0,038 + 250 \cdot 4,06 \cdot 0,001 \cdot 0,015 \cdot 2) \\ F_{sp} &= 9,70 [m^2] \end{aligned} \quad (10.2)$$

**Střední rychlost proudění spalin**

$$w_{sp} = \frac{\dot{V}_{SP}^{skut}}{F_{sp}} = \frac{131,30}{9,70} = 13,50 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (10.3)$$

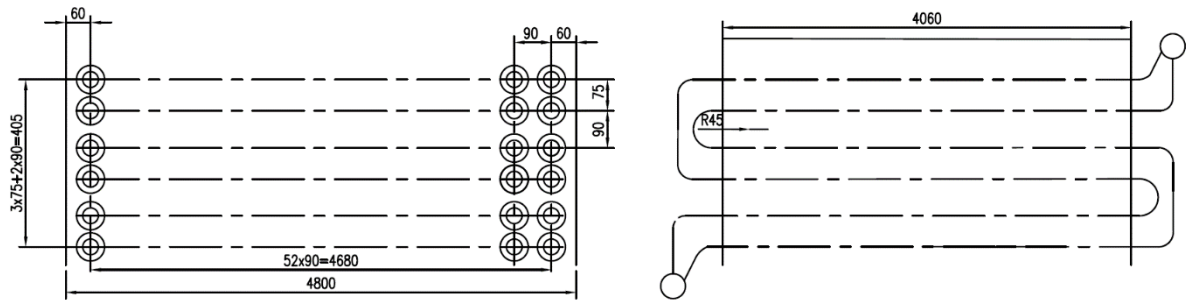
**Skutečný objemový průtok spalin**

$$\dot{V}_{SP}^{skut} = \dot{V}_{sp} \cdot \frac{273,15 + t_{Stř}}{273,15} = 62,34 \cdot \frac{273,15 + 300,63}{273,15} = 130,96 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (10.4)$$

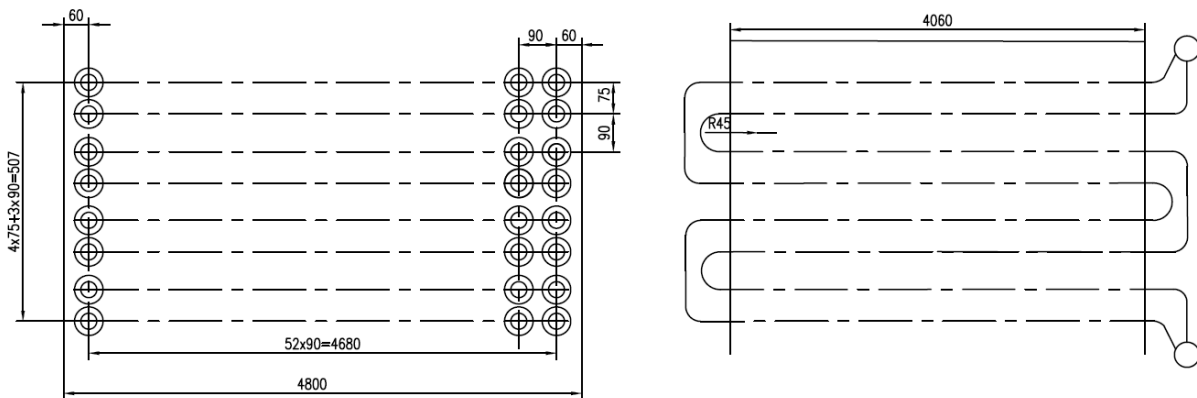
### Objemový průtok spalin

$$\dot{V}_{sp} = O_{SV}^r \cdot M_{pal} = 13,29 \cdot 4,69 = 62,34 \left[ \frac{Nm^3}{s} \right] \quad (10.5)$$

### 10.2. Tepelný výpočet ekonomizéru EKO2



Obrázek 22: Ekonomizér EKO2A



Obrázek 23: Ekonomizér EKO2B

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,038	[m]
Tloušťka stěny	t	0,004	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,03	[m]
Průměr žebra	$D_z$	0,068	[m]
Výška žebra	$h_z$	0,015	[m]
Tloušťka žebra	$t_z$	0,001	[m]
Počet žeber na metr	$n_z$	250	[1/m]
Rozteč žeber	$s_z$	0,004	[m]
Příčná rozteč	$s_1$	0,090	[m]
Střední podélná rozteč	$s_2$	0,0825	[m]
Efektivní délka trubek	$l_e$	4,06	[m]
Počet řad	$n_{řad}$	7	[-]
Počet hadů	$n_{had}$	2	[-]
Počet trubek v řadě	$n_{tr}$	53	[-]

Tabulka 27: Geometrie EKO2

	Vstup	Výstup	Střední hodnota
Tlak [MPa]	11,4	11,3	11,35
Teplota [°C]	115	250,23	182,62
Entalpie [kJ/kg]	490,62	1087,97	789,08
Měrný objem v [m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]	0,00105	0,00123	0,00114

Tabulka 28: Parametry vody v EKO2

### Redukovaný součinitel přestupu konvekce tepla ze strany spalin

$$\alpha_{sr} = \left[ \frac{S_z}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S} \right] \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k}$$

$$\alpha_{sr} = [0,75 \cdot 0,6 \cdot 1 + 0,25] \cdot \frac{0,85 \cdot 772,53}{1 + 0,0043 \cdot 0,85 \cdot 772,53} = 120,12 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (10.6)$$

$\psi_z$  je součinitel charakterizující nerovnoměrné rozdělení  $\alpha_k$  po povrchu žebra, pro kruhová žebra platí  $\psi_z = 0,85 [-]$ .

$\varepsilon$  je součinitel zanesení, pro spalování plynu se bere  $\varepsilon = 0,0043 [m^2 \cdot K/W]$ .

$\mu$  je součinitel rozšíření žebra, pro nerozšiřující se žebra je  $\mu = 1 [-]$ .

### Podíl výhřevných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalin

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z}{D} - \frac{t_z}{D}\right)} = \frac{\left(\frac{0,068}{0,038}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0,068}{0,038}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0,004}{0,038} - \frac{0,001}{0,038}\right)} \quad (10.7)$$

$$\frac{S_z}{S} = 0,75 [-]$$

### Podíl volných částí trubky, kde nejsou žebra, a celkové plochy ze strany spalin

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S} = 1 - 0,75 = 0,25 [-] \quad (10.8)$$

### Součinitel efektivnosti žebra

Určuje se z nomogramu závislosti  $\beta \cdot h_z$  a  $\frac{D_z}{D}$ , který je k nalezení v [1].

$$\beta = \sqrt{\frac{\psi_z \cdot \alpha_k \cdot 2}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k)}} = \sqrt{\frac{0,85 \cdot 772,53 \cdot 2}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,0043 \cdot 0,85 \cdot 772,53)}} \quad (10.9)$$

$$\beta = 92,67 [-]$$

$$E = 0,6 [-] \quad (10.10)$$

### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalín

$$\alpha_k = 0,105 \cdot C_Z \cdot C_S \cdot \frac{\lambda}{s_z} \cdot \left(\frac{D}{s_z}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z}{s_z}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{W \cdot s_z}{\nu}\right)^{0,72}$$

$$\alpha_k = 0,105 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,050}{0,004} \cdot \left(\frac{0,068}{0,004}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,015}{0,004}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{13,50 \cdot 0,004}{32,6 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,72} \quad (10.11)$$

$$\alpha_k = 772,53 \left[\frac{W}{m^2K}\right]$$

$C_Z$  a  $C_S$  jsou opravné koeficienty určené dle [1].

### Součinitel prostupu tepla

$\psi$  je součinitel tepelné efektivity, pro spalování plynu odpovídá hodnotě 0,85 u všech ploch.

$$k = \psi \cdot \alpha_{Sr} = 0,85 \cdot 120,12 = 102,10 \left[\frac{W}{m^2K}\right] \quad (10.12)$$

### Plocha jednoho žebra

$$S_{1z} = \frac{2\pi \cdot (D_z^2 - D^2)}{4} + \pi \cdot D_z \cdot t_z$$

$$S_{1z} = \frac{2\pi \cdot (0,068^2 - 0,038^2)}{4} + \pi \cdot 0,068 \cdot 0,001 = 0,0052 [m^2] \quad (10.13)$$

### Plocha jednoho metru žebrovaných trubek pro jednohad

$$S_{1m} = \pi \cdot D \cdot (1 - n_z \cdot t_z) + n_z \cdot S_{1z}$$

$$S_{1m} = \pi \cdot 0,038 \cdot (1 - 250 \cdot 0,001) + 250 \cdot 0,0052 = 1,39 [m^2] \quad (10.14)$$

### Plocha jedné řady dvojhadu

$$S_{1řada} = b \cdot n_{tr} \cdot n_{had} \cdot S_{1m} = 4,06 \cdot 53 \cdot 2 \cdot 1,39 = 598,94 [m^2] \quad (10.15)$$

### Celková plocha EKO2

$$S_{celk} = n_{řad} \cdot S_{1řada} = 7 \cdot 598,94 = 4192,60 [m^2] \quad (10.16)$$

### Teplo přijaté ekonomizérem EKO2

$$Q^{EKO2} = k \cdot S_{celk} \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 102,10 \cdot 4192,60 \cdot 70,75 \cdot 10^{-3}$$

$$Q^{EKO2} = 30284,57 [kW] \quad (10.17)$$

### Teplotní logaritmický spád

$\Delta t_v$  je větším z rozdílů teplot spalín a média a  $\Delta t_m$  je menším z rozdílů.

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{225,12 - 10,90}{\ln \frac{225,12}{10,90}} = 70,75 [°C] \quad (10.18)$$



### 10.3. Celková tepla v oblasti EKO2

#### Měrná entalpie spalin na výstupu z oblasti EKO2

$$i_{P1}^{sp} = \frac{Q_{EKO2}^{sp}}{M_{pal}} = \frac{10345,81}{4,69} = 2205,11 \left[ \frac{kJ}{Nm^3} \right] \quad (10.19)$$

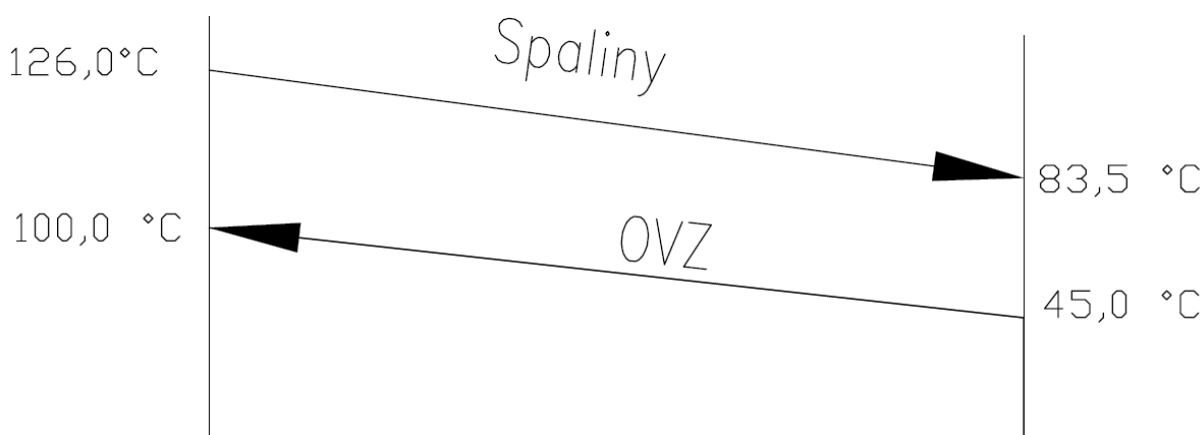
Což odpovídá volené teplotě na začátku výpočtu oblasti s odchylkou 0,12 °C.

#### Teplota spalin na výstupu z oblasti EKO2 a změna tepla spalin

$$\begin{aligned} Q_{EKO2}^{sp} &= Q_{OK3}^{sp} - Q^{EKO2} = 40630,38 - 30284,57 = 10345,81 [kW] \\ \Delta Q^{sp} &= Q_{OK3}^{sp} - Q_{EKO2}^{sp} = 40630,38 - 10345,81 = 30284,57 [kW] \end{aligned} \quad (10.20)$$

### 10.4. Návrh ohříváku vzduchu OVZ

Ohřívák je řešen jako trubkový, se spalinami uvnitř trubek. Uspořádání je vystřídání. Ohřátí vzduchu probíhá z 45 °C na 100 °C. Vyšší ohřátí není vhodné z důvodu vyšších emisí NOx. Ohřívák je jednostupňový. Spalovací vzduch je na vstupní teplotu předeříván v POV-paním ohříváku vzduchu. Výška OVZ je vypočtena na 2,77 m.



Obrázek 24: Teploty v OVZ

#### Teplotu spalin na výstupu z části OVZ volím

$$t_{OVZO}^{sp} = 83,46 [^{\circ}C]$$

#### Střední teplota spalin

$$t_{stř} = \frac{t_{EKO2O}^{sp} + t_{OVZO}^{sp}}{2} = \frac{126,02 + 83,46}{2} = 104,68 [^{\circ}C] \quad (10.21)$$

#### Střední rychlost proudění spalin

$$w_{sp} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{SP}^{skut}}{n_{tr} \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 86,23}{5917 \cdot \pi \cdot 0,0405^2} = 11,70 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (10.22)$$

#### Skutečný objemový průtok spalin

$$\dot{V}_{SP}^{skut} = \dot{V}_{sp} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = 62,34 \cdot \frac{273,15 + 104,68}{273,15} = 86,23 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (10.23)$$

### Objemový průtok spalín

$$\dot{V}_{sp} = O_{SV}^r \cdot M_{pal} = 13,29 \cdot 4,69 = 62,34 \left[ \frac{Nm^3}{s} \right] \quad (10.24)$$

### Střední teplota spalovacího vzduchu

$$t_{stř}^{vz} = \frac{t_{out}^{vz} + t_{in}^{vz}}{2} = \frac{100 + 45}{2} = 72,50 [^{\circ}C] \quad (10.25)$$

### Střední rychlost proudění spalovacího vzduchu

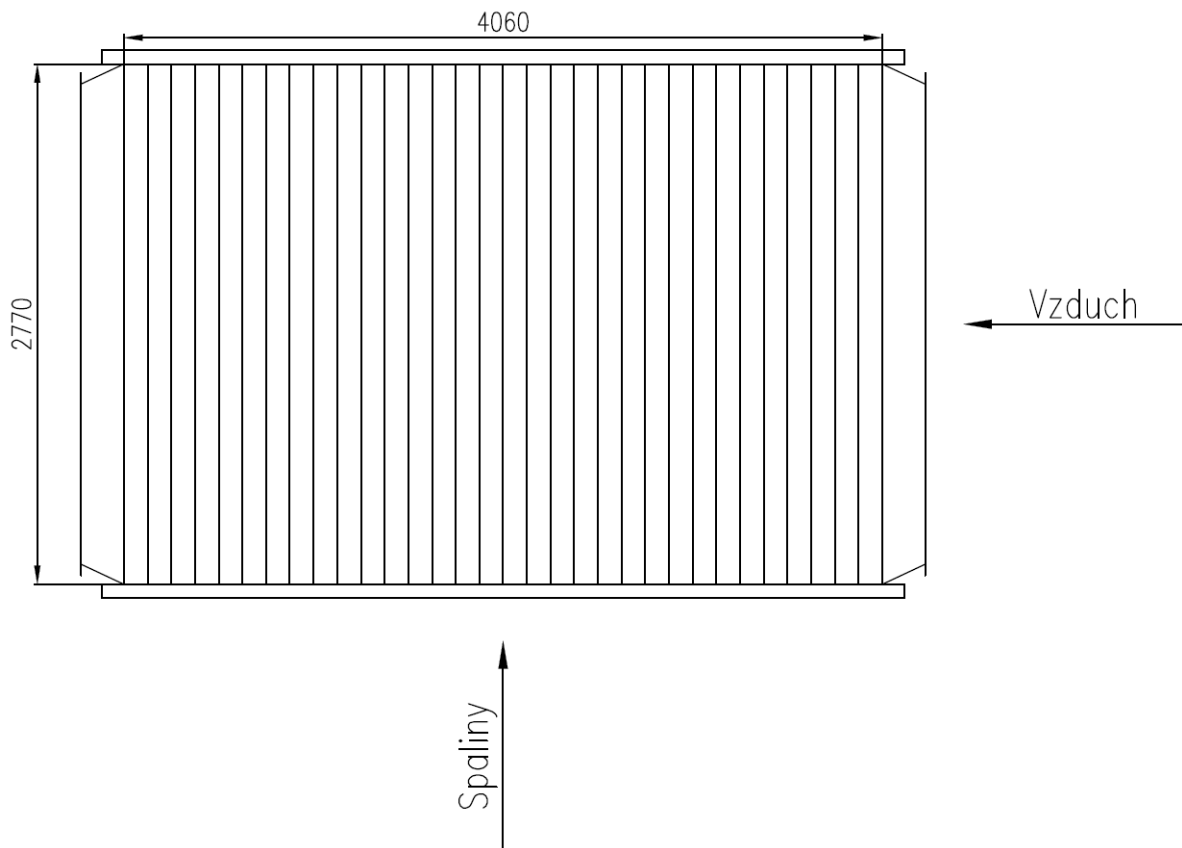
$$w_v = \frac{V_v \cdot s_1}{a \cdot h \cdot (s_1 - D)} = \frac{60,62 \cdot 0,07}{4,8 \cdot 2,77 \cdot (0,07 - 0,0445)} = 12,51 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (10.26)$$

### Skutečný objemový průtok spalovacího vzduchu

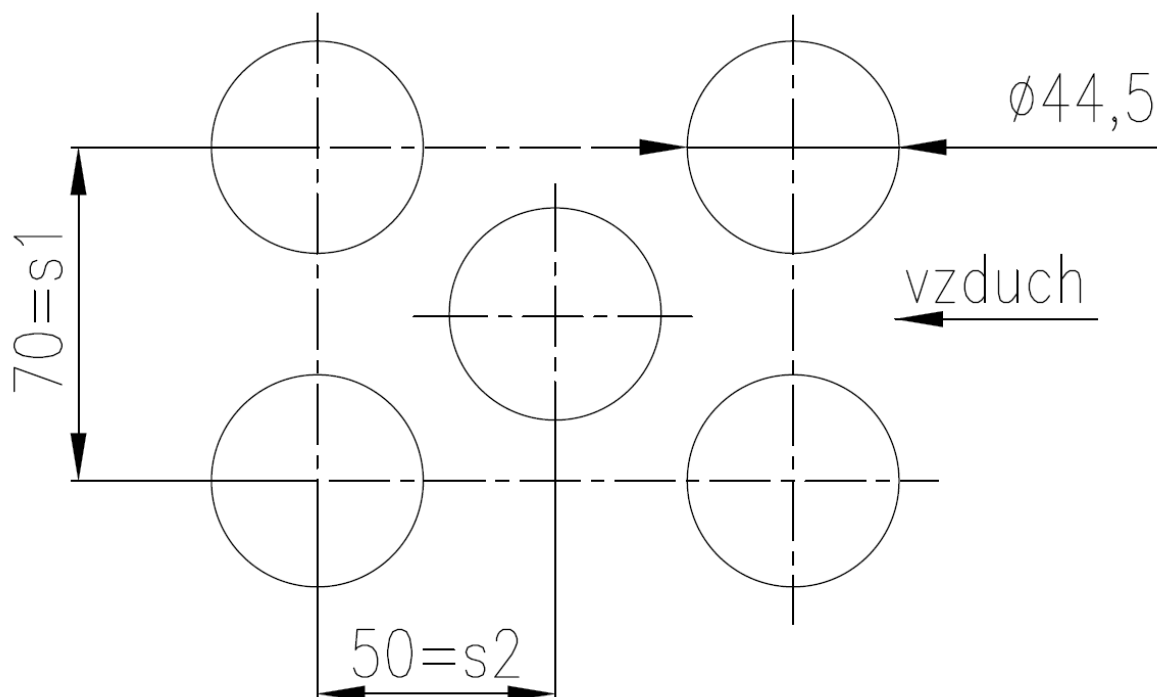
$$V_v = O_{VV} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}^{vz}}{273,15} \cdot M_{pal} = 10,210 \cdot \frac{273,15 + 72,50}{273,15} \cdot 4,69$$

$$V_v = 60,62 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (10.27)$$

## 10.4. Tepelný výpočet ohříváku vzduchu OVZ



Obrázek 25: Ohřívák vzduchu OVZ



Obrázek 26: Geometrické uspořádání OVZ

	Značení	Rozměr	Jednotka
Vnější průměr trubky	D	0,0445	[m]
Tloušťka stěny	t	0,002	[m]
Vnitřní průměr trubky	d	0,0405	[m]
Střední průměr trubky	$d_s$	0,0425	[m]
Příčná rozteč	$s_1$	0,090	[m]
Střední podélná rozteč	$s_2$	0,0825	[m]
Počet trubek v řadě	$z_1$	97	[-]
Počet řad trubek	$z_2$	59	[-]
Výška	H	2,77	[m]

Tabulka 29: Geometrie OVZ

### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalovacího vzduchu

$$\alpha_{kv} = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \left( \frac{w_v \cdot D}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

$$\alpha_{kv} = 1 \cdot 0,36 \cdot \frac{0,0299}{0,0445} \left( \frac{12,52 \cdot 0,0445}{20,3 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,70^{0,4} = 98,21 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (10.28)$$

$C_z$  a  $C_s$  jsou opravné koeficienty určené dle [1].

$\lambda, \nu, Pr$  jsou součinitel tepelné vodivosti, kinematická viskozita, Prandtlovo číslo. Jsou určeny pro střední teplotu vzduchu dle [2].

### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (10.29)$$

$$\alpha_{ks} = 0,023 \cdot \frac{0,0325}{0,0405} \left( \frac{11,70 \cdot 0,0405}{19,9 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,73^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 51,53 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

kde  $c_t, c_l, c_m$  jsou opravné koeficienty dle [1] a v tomto případě jsou jejich hodnoty rovny 1.

$\lambda, \nu, Pr$  jsou určeny pro střední hodnotu spalin v OVZ dle [2].

### Součinitel prostupu tepla

$\xi$  je opravný součinitel využití plochy, pro spalování plynu odpovídá hodnotě 0,85.

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{kv} \cdot \alpha_{ks}}{\alpha_{kv} + \alpha_{ks}} = 0,85 \cdot \frac{98,21 \cdot 51,53}{98,21 + 51,53} = 28,73 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (10.30)$$

### Teplotní logaritmický spád s korekcí na křížový proud

$\Delta t_v$  je větším z rozdílů teplot spalin a média a  $\Delta t_m$  je menším z rozdílů.

$\psi$  je součinitel přechodu od protiproudého zapojení ke kombinovanému, je určen z nomogramů v [1],  $\psi = 0,94$ .

$$\Delta t_{ln} = \Delta t_{ln,protiproud} \cdot \psi = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} \cdot \psi = \frac{80,90 - 45,00}{\ln \frac{80,90}{45,00}} \cdot 0,94 \quad (10.31)$$

$$\Delta t_{ln} = 57,70 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### Celková plocha OVZ

$$S_{celk} = H \cdot \pi \cdot d_s \cdot n_{tr} = 2,77 \cdot \pi \cdot 0,0425 \cdot 97 \cdot 59 = 2116,62 \text{ [m}^2\text{]} \quad (10.32)$$

### Teplu přijaté ohřívákem vzduchu

$$Q^{OVZ} = k \cdot S_{celk} \cdot \Delta t_{ln} \cdot 10^{-3} = 28,73 \cdot 2116,62 \cdot 57,70 \cdot 10^{-3} \quad (10.33)$$

$$Q^{OVZ} = 3508,84 \text{ [kW]}$$

## 10.5. Celková tepla v oblasti OVZ

### Měrná entalpie spalin na výstupu z oblasti OVZ

$$i_{p1}^{sp} = \frac{Q_{OVZ}^{sp}}{M_{pal}} = \frac{6836,97}{4,69} = 1457,23 \left[ \frac{kJ}{Nm^3} \right] \quad (10.34)$$

Což odpovídá volené teplotě na začátku výpočtu oblasti. Tato teplota rovněž odpovídá teplotě při určování účinnosti kotle s odchylkou 0,54 °C.

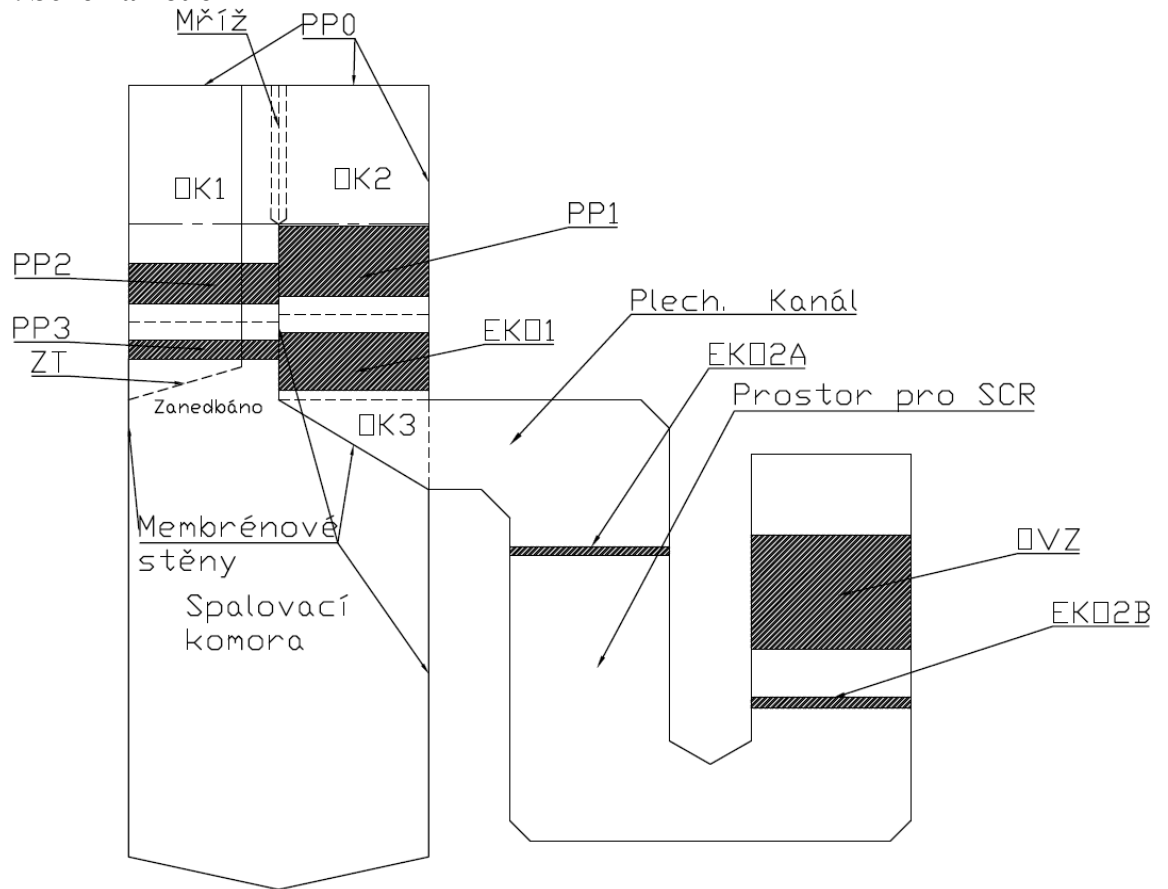
### Teplu spalin na výstupu z oblasti OVZ a změna tepla spalin

$$Q_{OVZ}^{sp} = Q^{EKO2} - Q^{OVZ} = 10345,81 - 3508,84 = 6836,97 \text{ [kW]} \quad (10.35)$$

$$\Delta Q^{sp} = Q_{EKO2}^{sp} - Q_{OVZ}^{sp} = 10345,81 - 6836,97 = 3508,84 \text{ [kW]}$$

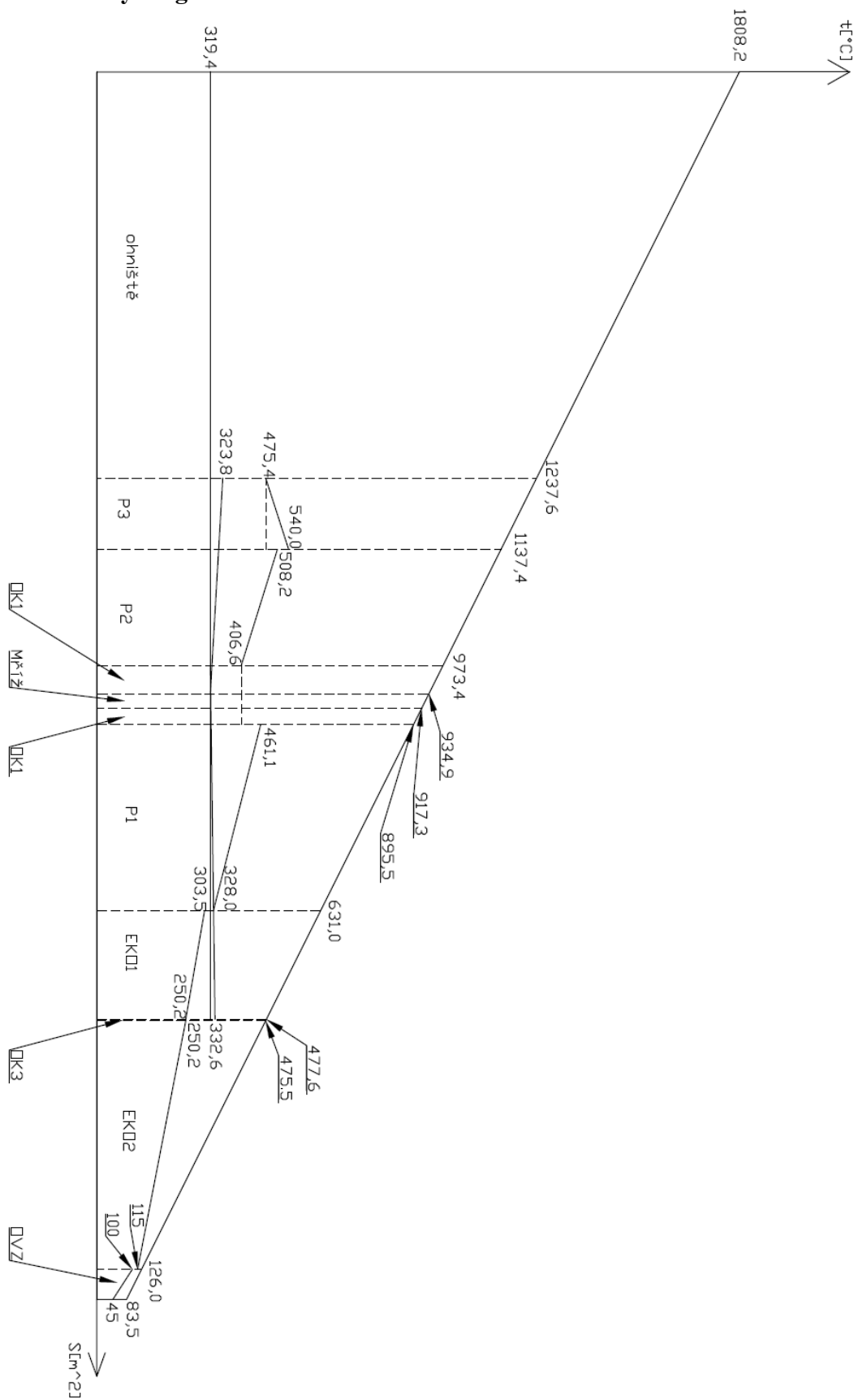
## 11. Schéma kotle, pilový diagram a kontrolní výpočty

### 11.1. Schéma kotle



Obrázek 27: Schéma kotle

### 11.2. Pilový diagram



Obrázek 28: Pilový diagram

**11.3. Kontrolní výpočty**  
**Kontrola výkonu výparníku**  
**Bilanční výkon výparníku**

$$Q_{v\acute{y}p} = 68158,74 \text{ [kW]} \quad (11.1)$$

**Součtový výkon výparníku**

$$Q_{vyp} = Q_o + \sum Q_{ms}$$
$$Q_{vyp} = 60489,79 + 721,47 + 948,79 + 2396,68 + 1799,97 + 880,06 + 518,47 + 218,92 + 188,04 \quad (11.2)$$

$$Q_{vyp} = 68162,20 \text{ [kW]}$$

**Rozdíl**

$$\frac{Q_{v\acute{y}p} - Q_{vyp}}{Q_{v\acute{y}p}} = \frac{68158,74 - 68162,20}{68158,74} = -0,005 \text{ [%]} \quad (11.1)$$

**Bilanční výkon kotle**

$$Q_{v\acute{y}r} = 165612,45 \text{ [kW]} \quad (11.1)$$

**Součtový výkon kotle**

$$Q_{vyr} = Q_{P3} + Q_{P2} + Q_{P1} + Q_{vyp} + Q_{P0} + Q_{EKO1} + Q_{EKO2} + Q_{zt}$$
$$Q_{vyr} = 9469,02 + 15557,03 + 24849,61 + 68162,20 + 2344,74 + 13873,94 + 30284,57 + 1060,22 \quad (11.2)$$

$$Q_{vyr} = 165601,32 \text{ [kW]}$$

**Rozdíl**

$$\frac{Q_{v\acute{y}r} - Q_{vyr}}{Q_{v\acute{y}r}} = \frac{165612,45 - 165601,32}{165612,45} = 0,0067 \text{ [%]} \quad (11.1)$$

## 12. Diskuse

Do výpočtů nebyla zahrnuta část závěsných trubek, které po průchodu přehřívákem P3 míří šikmo do membránových stěn výparníku. Toto zanedbání bylo možné kvůli malému počtu ZT a malé délce, je ovšem pravda, že tato část ZT leží v oblasti největší teploty. Dále bylo ve všech oblastech zanedbáno vyhnutí membránových stěn pro vstup a výstup trubkových svazků konvekčních ploch.

Při ověřovacích výpočtech je možné vidět, že návrhový a skutečný výkon jsou téměř totožné. Pro úplnost uvedu, že na počátku odhadovaná komínová ztráta a vypočtená jsou rozdílné o 0,54 °C, což je dostatečná přesnost.

Při rychlém ověřovacím výpočtu teploty stěny OVZ bylo zjištěno, že na studeném konci je jen o cca 2,5 °C vyšší, než je teplota rosného bodu. Je tedy na uvaženu, zda lze bodově rosný bod podkročit a smířit se s korozí. [1] uvádí, že při mírném podkročení rosného bodu je postup koroze 0,1 až 0,2 mm za rok. To by odpovídalo životnosti 10 až 20 let při dané tloušťce stěny 2 mm. Je také možné se smířit s nižší účinností a zvýšit množství paliva a tím i teplotu spalin na konci OVZ, a zamezit tak kondenzaci vodních par ve spalinách. Toto rozhodnutí by vyžadovalo ekonomickou analýzu, kterou se však tato práce nezaobírala.



### 13. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá návrhem plynového parního kotle s parním výkonem 200 t/h a párou o tlaku 10,5 MPa a teplotě 540 °C. Napájecí voda má zadanou teplotu 115 °C. Návrh byl vyhotoven s ohledem na co možná nejvyšší účinnost parního kotle a zároveň s ohledem na emise NO<sub>x</sub>. Právě z důvodů emisí je v návrhu recirkulace spalin (15 %) s cílem snížení teploty nechlazeného plamene, a tedy potlačení vzniku NO<sub>x</sub>. S přihlédnutím k této specifikaci byl rozdělen ekonomizér v nechlazené části spalinového traktu tak, aby bylo možné v budoucnu vložit technologii SCR do oblasti spalin s přibližnou teplotou 300°C. Dále bylo specifikováno, že kotel má mít tři parní přehříváky, mezi nimiž jsou vstříky napájecí vody z důvodu dobrých dynamických vlastností.

Cílem této práce bylo provést stechiometrické výpočty, provést tepelný výpočet kotle včetně rozměrového návrhu kotle, stanovit účinnost kotle, stanovit teplotu rosného bodu spalin a vypracovat výkresovou dokumentaci. Tyto cíle byly postupně v rámci práce naplněny.

V rámci kontrolních výpočtů bylo zjištěno, že takto navržený kotel má o 0,0067 % menší výkon než požadovaný, při nepřesnosti odhadu komínové ztráty o velikosti 0,54 °C. Tato přesnost je více než postačující, avšak skutečnost by prokázalo až garanční měření kotle.

## **14. Seznam použitých zdrojů**

- [1] DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 212 s. : il., tabulky, grafy, schéma. ISBN 80-01-02591-8.
- [2] BUDAJ, Florian. Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet. 4. přeprac. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992, 200 s. : il., tabulky. ISBN 80-214-0426-4.
- [3] HOLMGREN, Magnus. *X Steam version 2.6*. Excel Steam Tables.

## 15. Seznam použití symbolů a zkratek

Značení odpovídá značení použitému ve zdrojích [1] a [2].

Symbol	Veličina	Jednotka
$\alpha$	součinitel přebytku vzduchu	—
$\alpha_k$	součinitel přestupu tepla konvekcí	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\alpha_{sál}$	součinitel přestupu tepla sáláním	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\alpha_s$	celkový součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\eta$	dynamický viskozita	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
$\eta_k$	účinnost kotle	—
$\nu$	kinematická viskozita	$m^2 \cdot s$
$\sigma$	poměrná rozteč	—
$\xi$	součinitel využití plochy	—
$\zeta$	součinitel zanešení ohniště	—
$\omega$	součinitel omývání plochy	—
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\varepsilon$	součinitel zanesení plochy	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
$\psi$	součinitel tepelné efektivity ohniště	—
$a, b, c$	rozměry tahu a výška výstupního okna z chlazené části	—
$a_o$	stupeň černosti ohniště	—
$a_{pl}$	stupeň černosti plamene	—
$a_{sv}$	stupeň černosti svítivé části plamene	—
$a_{ns}$	stupeň černosti nesvítivé části plamene	—
$Bo$	Boltzmannovo číslo	—
$d_e$	ekvivalentní průměr průřezu	$m$
$d_s$	střední průměr	$m$
$F_{sp}, F_p$	světlý průřez pro spaliny a pro páru	$m^2$
$h$	výška	$m$
$i$	měrná entalpie	$J/Nm^3$
$I$	entalpie	$J$
$k$	součinitel prostupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$M$	hmotnostní průtok	$kg \cdot s^{-1}$
$M$	součinitel průběhu teploty v ohništi	—
$M_{pal}$	množství paliva přivedeného do kotle	$Nm^3 \cdot s^{-1}$
$M_{pp}$	průtok přehřáté páry	$kg \cdot s^{-1}$
$n_{had}$	počet hadů	—
$n_{tr}$	počet trubek	—
$O$	obvod	$m$
$O$	objem na jednotku paliva	$Nm^3 \cdot Nm^{-3}$
$p$	tlak	$Pa$

$Q$	tepelný výkon	$W$
$q$	tepelný tok	$W \cdot m^2$
$Q_{cz}$	teplo přivedené cizím zdrojem	$J \cdot Nm^{-3}$
$Q_i$	výhřevnost paliva	$J \cdot Nm^{-3}$
$Q_{i\ red}$	redukováná výhřevnost	$J \cdot Nm^{-3}$
$q_s$	plošné zatížení ohniště	$W \cdot m^2$
$Q_u$	užitečné teplo uvolněné v ohništi	$J \cdot Nm^{-3}$
$r$	měrná plynová konstanta	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
$s$	účinná tloušťka sálavé vrstvy	$m$
$S$	plocha	$m^2$
$s_1$	příčná rozteč svazku	$m$
$s_2$	podélná rozteč svazku	$m$
$S_{ús}$	účinná sálavá plocha stěn ohniště	$m^2$
$S_{ús\ vo}$	účinná sálavá plocha výstupního okna	$m^2$
$t$	teplota	$^{\circ}C$
$T$	teplota	$K$
$v$	měrný objem	$m^3 \cdot kg^{-1}$
$V$	objem	$m^3$
$V$	objemový průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
$V_o$	aktivní objem ohniště	$m^3$
$x$	úhlový součinitel osálení plochy	—
$x_h$	poměrná výška hořáků v ohništi	—
$x_{pl}$	poměrná poloha maximální teploty plamene	—
$Z_k$	ztráta komínová	—
$Z_{sv}$	ztráta sáláním tepla do okolí	—

	Dolní indexy
min	minimální
nv	napájecí voda
np	nechlazený plamen
pr	protiproud
r	redukovaný
S	spaliny
SS	spaliny suché
SV	spaliny vlhké
ok	stav na výstupní okně z ohniště
st	stěna
w	voda
vo	výstupní okno
V	vzduch
vp	vodní pára
VS	vzduch suchý
VV	vzduch vlhký

	Horní indexy
r	recirkulované spaliny
S	spaliny
V	vzduch

## **Seznam příloh**

- 1 Schématický výkres kotle