



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE**

## **NAVRHNĚTE ROŠTOVÝ PARNÍ KOTEL NA SPALOVÁNÍ DŘEVA A HNĚDÉHO UHLÍ(POMĚR MÍSENÍ 30/70-DŘEVO)**

**STEAM BOILER WITH GRATE FIRING BURNING MIX COAL AND WOOD (MIXING RATIO  
30/70-WOOD)**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. ALEŠ DVOŘÁK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**doc. Ing. ZDENĚK SKÁLA, CSc.**

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Aleš Dvořák

který/která studuje v magisterském navazujícím studijním programu

obor: Energetické inženýrství (2301T035)

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

**Navrhnete roštový parní kotel na spalování dřeva a hnědého uhlí(poměr mísení 30/70-dřevo)**

v anglickém jazyce:

**Steam boiler with grate firing burning mix coal and wood (mixing ratio 30/70-wood)**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Parametr páry: výkon 60t/h, tlak přehřáté páry 7 MPa, teplota přehřáté páry 490°C, teplota napájecí vody 125°C

palivo: dřevo  $Q_{ir} = 7,8 \text{ MJ/kg}$

$C_r = 24,2\%$

$N_r = 0,23\%$

$S_r = 0,01\%$

$A_r = 1,5\%$

$H_r = 3,06\%$

$O_r = 21,0\%$

$W = 50\%$

$Cl_r = \text{max } 0,02\%$

hnědé uhlí:  $Q_{ir} = 14,0 \text{ MJ/kg}$

Cíle diplomové práce:

Navrh parního kotle s přirozenou cirkulací, tepelný výpočet a domenzování výhřevných ploch

Seznam odborné literatury:

Černý ,Janeba,Teysler: Parní kotle,technický průvodce,SNTL Praha 1992  
Budaj,F.: Parní kotle,podklady pro tepelný výpočet, skriptum VUT v Brně,  
Basu.Kefa,Jestin: Boilers and Burners,Design and Theory.Springer 2000

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

---

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

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se věnuje návrhu parního roštového kotle na spalování dřeva a hnědého uhlí v poměru (30/70-dřevo) o výkonu 60t/h, parametry výstupní páry  $p=7\text{MPa}$ ,  $t=490^\circ\text{C}$ . Práce je rozdělena do několika kapitol. Ze začátku provedu stechiometrické výpočty a entalpické výpočty vzduchu a spalin. Následně vypočtu tepelnou bilanci, ztráty kotle a stanovím tepelnou účinnost kotle. Poté navrhnu spalovací komoru kotle a udělám její tepelný výpočet. Po určení spalovací komory si stanovím rozměry tahů a výhřevné plochy. V poslední části překontroluji tepelnou bilanci. V příloze je výkresová dokumentace parního kotle.

## **Klíčová slova**

parní kotel, rošt, spalovací komora, přehřívák, membránová stěna, ekonomizér

## **ABSTRACT**

This diploma work attends to presentation of steam grid boiler for wood and brown coal burning in scale (30/70-wood) in load 60t/h, with parametres of outgoing vapour  $p=7\text{MPa}$ ,  $t=490^\circ\text{C}$ . The work is splitted to several chapters. At the beginning I'm going to make stechiometric calculation and entalpic calculations of air and compustion gas. After that I'm going to calculate heat balance, losses of boiler and set heat efficiency of boiler. Then I'm going to suggest combustion chamber of boiler and make heat calculation. After suggestion of combustion chamber I'm going to set proportions of pulls and heat-delivery surface. In last chapter I'm giong to check heat balance. Inclosure of my work contains drawing documentation of steam boiler.

## **Key words**

heat boiler, grid, combustion chamber, overheater, membrane wall, flue-gas preheater

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DVOŘÁK, A. *Navrhněte roštový parní kotel na spalování dřeva a hnědého uhlí (poměr mísení 30/70-dřevo)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 98 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma roštový parní kotel na spalování dřeva a hnědého uhlí (poměr mísení 30/70-dřevo), vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. Zdeňka Skály CSc. a specializovaného konzultanta Ing. Pavla Křemínského a s použitím uvedené literatury. roštový parní kotel na spalování dřeva a hnědého uhlí (poměr mísení 30/70-dřevo)

Jméno a příjmení: Aleš Dvořák

Podpis.....

Datum: 21.05.2014

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto chci poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Skálovi CSc. a odbornému konzultantovi Ing. Pavlu Křeminskému za odborné rady a cenné připomínky. V neposlední řadě děkuji celé své rodině za podporu.



## OBSAH

1 Úvod.....	13
2 Složení paliva.....	14
3 Stechiometrické výpočty.....	15
3.1 Minimální objemy vzduchu a spalin z prvkového rozboru paliva.....	15
3.2 Množství vzduchu a spalin.....	17
3.3 Entalpie vzduchu a produktů spalování.....	18
4 Tepelná bilance kotle.....	20
4.1 Teplo přivedené do kotle.....	20
4.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost.....	20
4.2.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích.....	21
4.2.2 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků.....	21
4.2.3 Ztráta hořlavinou ve spalinách ( chemický nedopal).....	22
4.2.4 Ztráta fyzickým teplem spalin komínová ztráta.....	22
4.2.5 Ztráta sdílením tepla do okolí sáláním a vedením.....	22
4.2.6 Tepelná účinnost kotle.....	22
4.3 Výrobní teplo páry a množství paliva.....	23
4.3.1 Výrobní teplo páry (tepelný výkon kotle).....	23
4.3.2 Množství paliva.....	23
5 Výpočet spalovací komory.....	24
5.1 Rozměry spalovací komory.....	24
5.2 Tepelný výpočet ohniště.....	25
5.2.1 Určení adiabatické teploty v ohništi.....	25
5.2.2 Poměrná teplota spalin.....	26
5.2.3 Součinitel M.....	27
5.2.4 Boltzmanovo číslo.....	27
5.2.5 Stupeň černosti ohniště.....	28
5.3 Množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn.....	29
6 Výpočet teplosměnných ploch.....	30
6.1 Tlak napájecí vody.....	31
6.2 Rozdělení tepelného výkonu na výhřevné plochy.....	31
6.2.1 Přehřívák 3.....	31
6.2.2 Přehřívák 2.....	32
6.2.3 Přehřívák 1.....	33
6.2.4 Závěsné trubky.....	34
6.2.5 Výparník.....	34
6.2.6 Ekonomizér.....	35
6.3 Celkové potřebné teplo.....	35
7 Výpočet I. tahu.....	36

8 Mříž.....	37
8.1 Tepelný výpočet.....	38
8.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekci.....	38
8.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním pro zaprášené spaliny .....	38
8.3 Výsledná teplota spalín na výstupu z mříže.....	40
9 Výpočet II. tahu .....	41
9.1 Součinitel přestupu tepla pro membránové stěny .....	42
9.1.1 Konvekci pro podélné proudění .....	42
9.1.2 Sáláním pro zaprášené spaliny .....	43
9.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla .....	44
9.2 Součinitel prostupu tepla.....	44
9.3 Výsledná teplota spalín na výstupu z II. tahu .....	44
10 Výpočet III. tahu.....	45
10.1 Výpočet hloubky III tahu .....	45
11 Výpočet výsyvky mezi II. a III. tahem .....	46
11.1 Součinitel přestupu tepla pro membránové stěny .....	47
11.1.1 Konvekci pro podélné proudění .....	47
11.1.2 Sáláním pro zaprášené spaliny .....	47
11.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla .....	49
11.2 Součinitel prostupu tepla.....	49
11.3 Výsledná teplota spalín na výstupu z II. tahu .....	49
12 Výpočet III. tahu - 1. část .....	50
12.1 Přehřívák 3 .....	50
12.1.1 Součinitele přestupu tepla ze strany spalín.....	52
12.1.2 Součinitel pro přestup tepla sáláním pro zaprášené spaliny.....	53
12.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla .....	54
12.1.4 Součinitel prostupu tepla .....	54
12.2 Výpočet membránových stěn.....	55
12.2.1 Konvekci pro podélné proudění .....	55
12.2.2 Sáláním pro zaprášené spaliny .....	56
12.2.3 Celkový součinitel přestupu tepla .....	57
12.2.4 Součinitel prostupu tepla .....	57
12.3 Výpočet závěsných trubek .....	57
12.3.1 Konvekci pro podélné proudění .....	58
12.3.2 Sáláním pro zaprášené spaliny .....	58
12.3.3 Celkový součinitel přestupu tepla .....	59
12.3.4 Součinitel prostupu tepla .....	59
12.4 Výsledná teplota spalín na výstupu z 1. Části III. Tahu .....	60
13 Výpočet III. tahu - 2. část .....	61
13.1 Přehřívák II .....	61

13.1.1	Součinitele přestupu tepla ze strany spalin.....	63
13.1.2	Součinitel pro přestup tepla sáláním pro zaprášené spaliny .....	64
13.1.3	Celkový součinitel přestupu tepla .....	65
13.1.4	Součinitel prostupu tepla .....	65
13.2	Výpočet membránových stěn .....	66
13.2.1	Konvekcí pro podélné proudění .....	66
13.2.2	Sáláním pro zaprášené spaliny .....	67
13.2.3	Celkový součinitel přestupu tepla .....	68
13.2.4	Součinitel prostupu tepla .....	68
13.3	Výpočet závěsných trubek .....	68
13.3.1	Konvekcí pro podélné proudění .....	69
13.3.2	Sáláním pro zaprášené spaliny .....	69
13.3.3	Celkový součinitel přestupu tepla .....	70
13.3.4	Součinitel prostupu tepla .....	70
13.4	Výsledná teplota spalin na výstupu z 1. Části III. Tahu.....	71
14	Výpočet III. tahu a IV tahu - 3. část.....	72
14.1	Přehřívák I.....	72
14.1.1	Součinitele přestupu tepla ze strany spalin.....	74
14.1.2	Součinitel pro přestup tepla sáláním pro zaprášené spaliny .....	75
14.1.3	Celkový součinitel přestupu tepla .....	76
14.1.4	Součinitel prostupu tepla .....	76
14.2	Výpočet membránových stěn .....	77
14.2.1	Konvekcí pro podélné proudění .....	78
14.2.2	Sáláním pro zaprášené spaliny .....	78
14.2.3	Celkový součinitel přestupu tepla .....	79
14.2.4	Součinitel prostupu tepla .....	79
14.3	Výpočet závěsných trubek .....	80
14.3.1	Konvekcí pro podélné proudění .....	81
14.3.2	Sáláním pro zaprášené spaliny .....	81
14.3.3	Celkový součinitel přestupu tepla .....	82
14.3.4	Součinitel prostupu tepla .....	82
14.4	Výsledná teplota spalin na výstupu z 3. Části III. Tahu.....	82
14.4.1	Výsledná teplota spalin za přehřívákem I .....	83
15	Výpočet IV. a V. tahu .....	85
15.1	Ekonomizér .....	85
15.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin .....	87
15.2	Součinitel prostupu tepla.....	88
15.3	Výsledná teplota spalin na výstupu z ekonomizéru .....	89
16	Kontrola tepelné bilance .....	90
17	Závěr .....	91
18	Seznam použité literatury .....	92

19 Seznam použitých veličin a symbolů .....	93
20 Seznam příloh .....	98

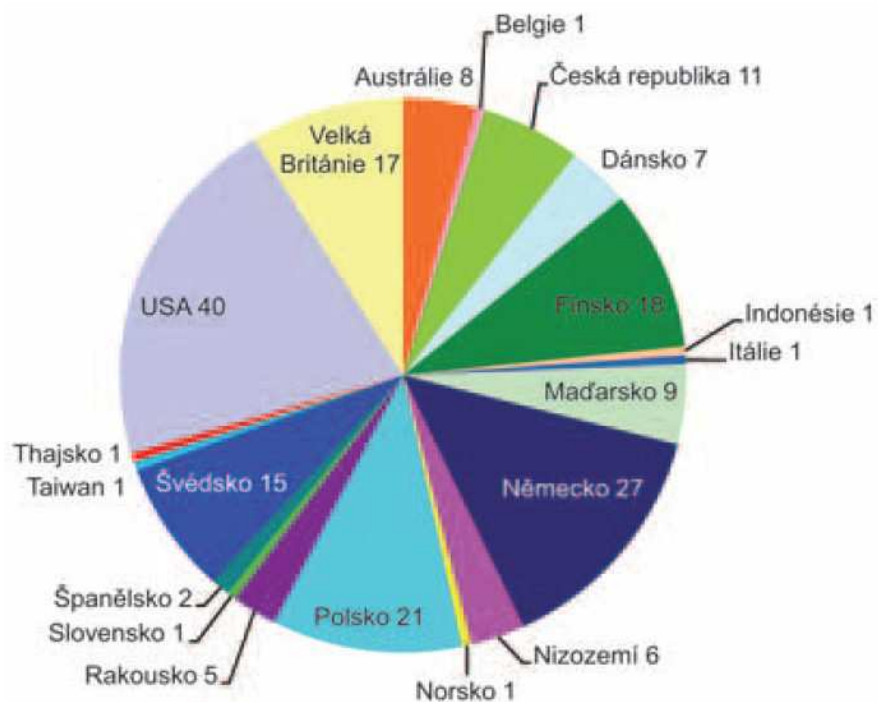
## 1 Úvod

Členské země evropské unie se snaží zvýšit nárůst podílu obnovitelných zdrojů v energetické bilanci. Vytvořili legislativu, která se snaží podpořit podíl větší výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů. Spoluspalování biomasy s fosilními palivy v elektrárnách a teplárnách vede ke zvýšení výroby energie z obnovitelných zdrojů. Proces spoluspalování paliva je rozšířen v mnoha státech a také v České republice, kde podniky dostávají dotace na spalování biomasy tzv. zelené bonusy.

Postupem času vznikají různé projekty přivádějící na trh nové poznatky o technologii spoluspalování biomasy s neobnovitelnými zdroji a dodávce biomasy do elektrárny. Projekty vychází z dostupných technologií a praktických zkušeností ze samotných závodů.

Spoluspalování fosilních paliv s biomasou má pozitivní vliv na snižování emisí CO<sub>2</sub>. Produkce CO<sub>2</sub> ze spalování biomasy je minimální a dá se srovnat s množstvím CO<sub>2</sub>, vázaného zpětně do rostlin. Dochází ke snížení plyných a pevných škodlivin, vypuštěných do ovzduší.

Biomasa se charakterizuje podobnými vlastnostmi a složením, ale nalezneme zásadní rozdíly ve vlhkosti, obsahu popeloviny a výhřevnosti. Biomasa může obsahovat alkalické kovy uvolňující se při spalování, vedoucí k zanášení teplosměnných ploch. Z tohoto vyplývá, že zvolení vhodného druhu biomasy a fosilních paliv pro spoluspalování není jednoduchá záležitost. Všechny zmíněné vlastnosti mají zásadní vliv na výběr vhodného výrobního procesu. [4]



Obr. 1 Počty energetických zdrojů ve světě se zkušeností se spoluspalováním biomasy [4]

## 2 Složení paliva

Parní kotel je navrhnout jako roštový na spalování dřeva a hnědého uhlí v poměru mísení (30/70-dřevo).

Složení dřeva:

$Q_i^r$	$C^r$	$N^r$	$S^r$	$A^r$	$H^r$	$O^r$	$W$	$Cl^r$
[MJ/kg]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
7,8	24,2	0,23	0,01	1,5	3,06	21	50	max.0,02

*Tab. 2.1. Složení dřeva*

Složení hnědého uhlí:

$Q_i^r$	$C^r$	$N^r$	$S^r$	$A^r$	$H^r$	$O^r$	$W$
[MJ/kg]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
14	35,52	0,45	0,79	20,52	2,99	11,73	28

*Tab. 2.2. Složení hnědého uhlí*

Složení nového vzorku paliva se stanoví ze zadaného poměru 70/30 (dřevo/ uhlí).

Složení nového vzorku paliva:

$Q_i^r$	$C^r$	$N^r$	$S^r$	$A^r$	$H^r$	$O^r$	$W$	$Cl^r$
[MJ/kg]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
9,66	27,6	0,296	0,244	7,2	3,039	18,22	43,4	0.014

*Tab. 2.3. Složení nového vzorku paliva*

$Q_i^r$	Výhřevnost paliva [MJ/kg]
$C^r$	Obsah uhlíku v palivu [%]
$N^r$	Obsah dusíku v palivu [%]
$S^r$	Obsah síry v palivu [%]
$A^r$	Obsah popela v palivu [%]
$H^r$	Obsah vodíku v palivu [%]
$O^r$	Obsah kyslíku v palivu [%]
$W$	Obsah vody v palivu [%]
$Cl^r$	Obsah chloru v palivu [%]

### 3 Stechiometrické výpočty

Objemy a entalpie jsou vztaženy na 1 kg spáleného tuhého paliva za normálních podmínek, (tj. při teplotě 0°C a tlaku 0,1 MPa).

#### 3.1 Minimální objemy vzduchu a spalin z prvkového rozboru paliva

**Minimální množství kyslíku ke spálení 1 kg paliva**

$$O_{O_2min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O_2^r}{32} \right) \quad (3.1)$$

$$O_{O_2min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{27,6}{12,01} + \frac{3,039}{4,032} + \frac{0,244}{32,06} - \frac{18,22}{32} \right) = 0,5575 m^3/kg \quad (3.2)$$

$C^r$	Obsah uhlíku v původním palivu
$H_2^r$	Obsah vodíku v původním palivu
$S^r$	Obsah síry v původním palivu
$O_2^r$	Obsah kyslíku v původním palivu

**Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg paliva**

$$O_{VZmin}^S = \frac{100}{21} \cdot O_{O_2min} = \frac{100}{21} \cdot 0,5575 = 2,6549 m^3/kg \quad (3.3)$$

**Objem vodní páry na 1m<sup>3</sup> suchého vzduchu**

$$V_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p''}{p_c - p''} = 0,7 \cdot 0,024 = 0,0168 \quad (3.4)$$

$\varphi$	relativní vlhkost vzduchu [70%]
$p''$	absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu
$p_c$	celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu

$$\frac{p''}{p_c - p''} = 0,024 \text{ pro teplotu } 20^\circ C \quad (3.5)$$

**Součinitel f pro výpočet minimálního množství vlhkého vzduchu**

$$f = 1 + \varphi \cdot \frac{p''}{p_c - p''} = 1 + 0,7 \cdot 0,024 = 1,0168 \quad (3.6)$$

**Minimální množství vlhkého vzduchu ke spálení 1kg paliva**

$$O_{VZmin} = f \cdot O_{VZmin}^S = 1,0168 \cdot 2,6549 = 2,6995 m^3/kg \quad (3.7)$$

**Objem CO<sub>2</sub> ve spalínách**

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{VZ_{min}}^S \quad (3.8)$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{27,6}{12,01} + 0,0003 \cdot 2,6549 = 0,5124 m^3/kg \quad (3.9)$$

**Objem SO<sub>2</sub> ve spalínách**

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S^r}{32,06} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,244}{32,06} = 0,0017 m^3/kg \quad (3.10)$$

**Objem dusíku ve spalínách**

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{VZ_{min}}^S \quad (3.11)$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{0,296}{28,016} + 0,7805 \cdot 2,6549 = 2,0745 m^3/kg$$

**Objem argonu ve spalínách**

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VZ_{min}}^S = 0,0092 \cdot 2,6549 = 0,0244 m^3/kg \quad (3.12)$$

**Minimální množství suchých spalin**

Vznikne dokonalým spálením paliva při minimálním množství vzduchu, tj. bez přebytku vzduchu ( $\alpha = 1$ ).

$$O_{spmin}^S = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar_2} \quad (3.13)$$

$$O_{spmin}^S = 0,5124 + 0,0017 + 2,0745 + 0,0244 = 2,613 m^3/kg$$

**Maximální množství CO<sub>2</sub> ve spalínách**

$$(CO_2)_{max} = \frac{O_{CO_2}}{O_{spmin}^S} \cdot 100 = \frac{0,5124}{2,613} \cdot 100 = 19,6081\% \quad (3.14)$$

**Minimální objem vodní páry**

$$O_{H_2Omin} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{22,4}{100} + \frac{W_t^r}{18,016} + (f - 1) \cdot O_{VZ_{min}}^S \quad (3.15)$$

$$O_{H_2Omin} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{3,039}{4,032} + \frac{22,4}{100} + \frac{43,4}{18,016} + (1,0168 - 1) \cdot 2,6549 = 0,9219 m^3/kg$$



**Minimální množství vlhkých spalin**

$$O_{spmin} = O_{spmin}^S + O_{H_2min} = 2,613 + 0,9219 = 3,5348 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.16)$$

**3.2. Množství vzduchu a spalin****Skutečné množství vzduchu s přebytkem vzduchu  $\alpha=1,3$** 

$$O_{VZ} = \alpha \cdot O_{VZmin} = 1,3 \cdot 2,6995 = 3,5093 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.17)$$

**Skutečné množství spalin s přebytkem vzduchu  $\alpha=1,3$** 

$$O_{SP} = O_{SPmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VZmin} = 3,5348 + (1,3 - 1) \cdot 2,6995 = 4,3447 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3.18)$$

**Skutečné množství vodní páry**

$$O_{H_2O} = O_{H_2Omin} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VZmin}^S \quad (3.19)$$

$$O_{H_2O} = 0,9219 + (1,0168 - 1) \cdot (1,3 - 1) \cdot 2,6549 = 0,9353 \text{ m}^3/\text{kg}$$

**Objemové části tříatomových plynů**

$$R_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{SP}} = \frac{0,0017 + 0,5124}{4,3447} = 0,1183 \quad (3.20)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{0,9353}{4,3447} = 0,2153 \quad (3.21)$$

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,1183 + 0,2153 = 0,3336 \quad (3.22)$$

**Koncentrace popílku ve spalinách**

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{SP}} \cdot \frac{x_u}{100} = \frac{10 \cdot 7,2}{4,3447} \cdot \frac{50}{100} = 8,2860 \text{ g/m}^3 \quad (3.23)$$

$\alpha$ [-]	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$O_{VZ}$ [m <sup>3</sup> /kg]	2,6995	2,9695	3,2394	3,5094	3,7793	4,0493
$O_{SP}$ [m <sup>3</sup> /kg]	3,5348	3,80475	4,0747	4,34465	4,6146	4,88455
$O_{H_2O}$ [m <sup>3</sup> /kg]	0,9219	0,92644	0,93097	0,93551	0,94004	0,94458
$r_{RO_2}$ [-]	0,1455	0,1352	0,1262	0,1184	0,1115	0,1053
$r_{H_2O}$ [-]	0,2608	0,2435	0,2285	0,2153	0,2037	0,1934
$r_{SP}$ [-]	0,4063	0,3787	0,3547	0,3337	0,3152	0,2987
$\mu$ [g/m <sup>3</sup> ]	10,1845	9,4619	8,8350	8,2861	7,8013	7,3702

Tab. 3.2.1. Hodnoty produktů spalování

### 3.3 Entalpie vzduchu a produktů spalování

Entalpie minimálního množství spalin pro  $\alpha=1,2$ ,  $t=400\text{ }^\circ\text{C}$

$$I_{SPmin} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2Omin} \cdot i_{H_2O} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad (3.24)$$

$$I_{SPmin} = 0,5124 \cdot 772 + 0,0017 \cdot 836 + 2,0745 \cdot 527 + 0,9219 \cdot 626 + 0,0244 \cdot 372 = 2076,39 \text{ kJ/kg}$$

Entalpie minimálního množství vzduchu

$$c = c_s + 0,0016 \cdot d \cdot c_{H_2O} = 1,329 + 0,0016 \cdot 10,4464 \cdot 1,565 = 1,3552 \text{ kJ/m}^3 \cdot K \quad (3.25)$$

$$d = (f - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = 10,4464 \text{ g/kg} \quad (3.26)$$

$c_s$  měrné teplo suchého vzduchu ( $400^\circ\text{C}$ ),  $c_s=1,329 \text{ kJ/m}^3 \cdot K$

$c_{H_2O}$  měrné teplo vodní páry ( $400\text{ }^\circ\text{C}$ ),  $c_{H_2O} = 1,565 \text{ kJ/m}^3 \cdot K$

$$I_{VZmin} = O_{VZmin}^S (c \cdot t)_{VZ} = 2,6549 \cdot (1,3552 \cdot 400) = 1439,1 \text{ kJ/kg} \quad (3.27)$$

Entalpie spalin při teplotě ( $t=400\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\alpha=1,2$ ,  $f=1,0168$ )

$$I_{SP} = I_{SPmin} + (\alpha - 1) \cdot I_{VZmin} + I_p = 2076,39 + (1,2 - 1) \cdot 1439,1 = 2364,21 \text{ kJ/kg} \quad (3.28)$$

Entalpie popílku  $I_p$  se nezapočítává, protože neplatí následující podmínka

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_i^r}{41,8 \cdot x_p} = \frac{6 \cdot 9700}{41,8 \cdot 50} \quad (3.29)$$

$$7,2 > 27,85$$

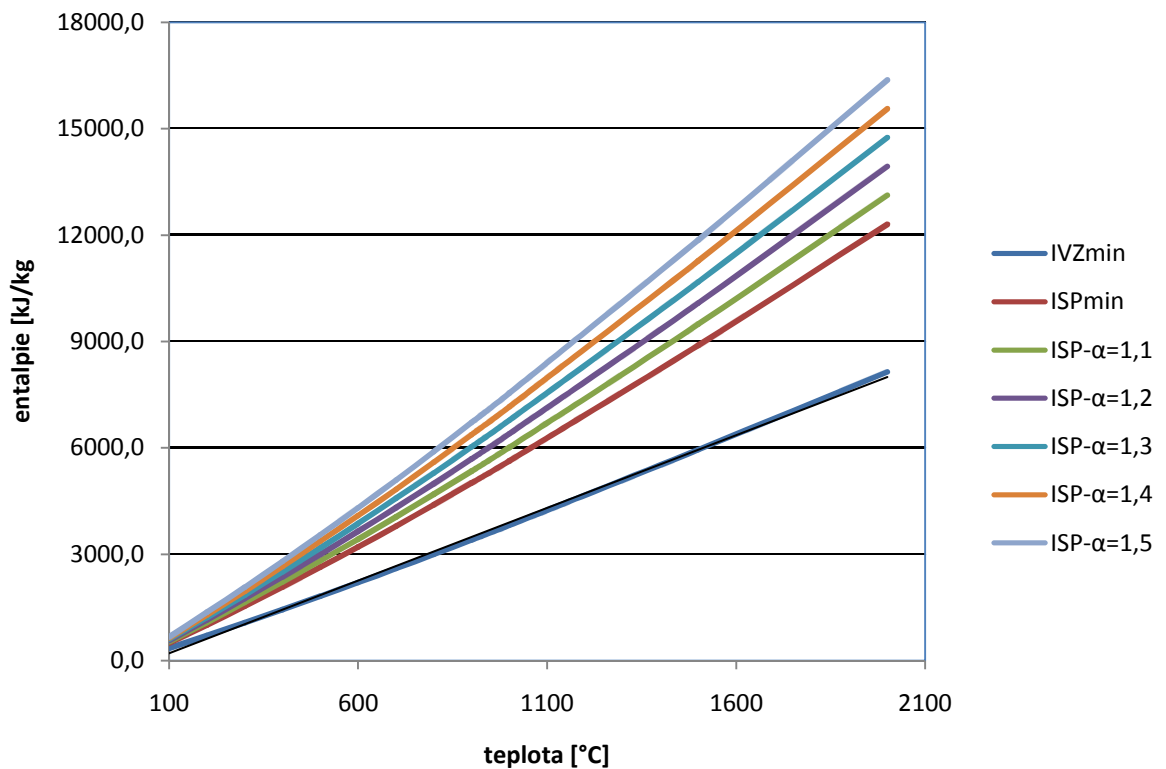
- nerovnost neplatí,  $I_p$  nezapočítávám

teplota t [ $^\circ\text{C}$ ]	Entalpie složek spalin					Měrné teplo	
	CO <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ]	N <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ]	H <sub>2</sub> O [kJ/m <sup>3</sup> ]	SO <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ]	Ar [kJ/m <sup>3</sup> ]	C <sub>s</sub> [kJ/m <sup>3</sup> K]	C <sub>H<sub>2</sub>O</sub> [kJ/m <sup>3</sup> K]
100	170	130	150	189	93	1,3	1,505
200	357	260	304	392	186	1,307	1,522
300	559	392	463	610	278	1,317	1,542
400	772	527	626	836	372	1,329	1,565
500	994	666	795	1070	465	1,343	1,59
600	1225	804	969	1310	557	1,356	1,615
700	1462	948	1149	1550	650	1,371	1,641
800	1705	1094	1334	1800	743	1,384	1,688
900	1952	1242	1526	2050	834	1,398	1,696
1000	2204	1392	1723	2305	928	1,41	1,723
1500	3504	2166	2779	3590	1390	1,462	1,853
2000	4844	2965	3926	4890	1855	1,5	1,963

Tab. 3.3.1 Entalpie složek spalin a měrné teplo

t	$I_{VZmin}$	$I_{SPmin}$	$I_{SP \alpha=1}$	$I_{SP \alpha=1,1}$	$I_{SP \alpha=1,2}$	$I_{SP \alpha=1,3}$	$I_{SP \alpha=1,4}$	$I_{SP \alpha=1,5}$
[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]
100	351,8	497,7	497,7	532,8	568,0	603,2	638,4	673,6
200	707,5	1007,7	1007,7	1078,5	1149,2	1220,0	1290,7	1361,5
300	1069,4	1534,3	1534,3	1641,2	1748,2	1855,1	1962,0	2069,0
400	1439,1	2076,4	2076,4	2220,3	2364,2	2508,1	2652,0	2795,9
500	1818,0	2637,0	2637,0	2818,8	3000,6	3182,4	3364,2	3546,0
600	2202,9	3204,7	3204,7	3425,0	3645,2	3865,5	4085,8	4306,1
700	2598,8	3793,4	3793,4	4053,3	4313,2	4573,1	4832,9	5092,8
800	2999,3	4394,1	4394,1	4694,0	4993,9	5293,9	5593,8	5893,7
900	3408,0	5007,3	5007,3	5348,1	5688,9	6029,7	6370,5	6711,3
1000	3819,7	5631,9	5631,9	6013,9	6395,9	6777,8	7159,8	7541,8
1500	5945,3	8890,6	8890,6	9485,1	10079,7	10674,2	11268,7	11863,3
2000	8138,6	12305,6	12305,6	13119,5	13933,4	14747,2	15561,1	16375,0

Tab. 3.3.2 Entalpie produktů spalování



Graf 3.3.1 I-t diagram spalín

## 4 Tepelná bilance kotle

Úkolem tepelné bilance je určit účinnost kotle a spotřebu paliva pro dosažení požadovaného tepelného výkonu.

### 4.1 Teplo přivedené do kotle

$$Q_p^p = Q_i^r + i_p = 9660 + 51,09 = 9711,09 \text{ kJ/kg} \quad (4.1)$$

$Q_i^r$       Výhřevnost paliva  
 $i_p$         Fyzické teplo paliva

Fyzické teplo se počítá tehdy, jestliže se palivo přehřívá mimo kotel a nebo v případě, že palivo není přehříváno cizím zdrojem, se fyzické teplo uvažuje jen u paliv s obsahem vody splňující podmínku:

$$W_t^r \geq \frac{Q_r^i}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \quad (4.2)$$

$$43,4 \geq \frac{9,66}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$

$$43,4 \geq 15,37$$

-podmínka je splněna, teplota paliva se bere  $t_p=20 \text{ }^\circ\text{C}$

### Fyzické teplo paliva

$$i_p = c_p \cdot t_p = 2,5543 \cdot 20 = 51,09 \text{ kJ/kg} \quad (4.3)$$

$c_p$         měrné teplo paliva  
 $t_p$         teplota paliva

Určení  $c_p$

$$c_p = c_w \cdot \frac{W_t^r}{100} + c_{su} \cdot \frac{100 - W_t^r}{100} = 4,19 \cdot \frac{43,4}{100} + 1,3 \cdot \frac{100 - 43,4}{100} = 2,5543 \text{ kJ/kg} \quad (4.4)$$

$c_w=4,19 \text{ kJ/kg}$  . K- měrné teplo vody

$c_{su}= 1,3 \text{ kJ/kg}$  . K - měrné teplo sušiny paliva

### 4.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

Tepelná účinnost se vypočte ze ztrát kotle

Druhy tepelných ztrát u kotle

- ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)
- ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
- ztráta hořlavinou ve spalinách (chemický nedopal)
- ztráta fyzickým teplem spalin ( komínová ztráta)
- ztráta sdílením tepla do okolí sáláním a vedením

### 4.2.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

Ztráta se určí součtem jednotlivých ztrát hořlavinou v tuhých zbytcích, které zahrnují část uhlíku zůstane v popílku ve spalinách v úletu ( $ú$ ) a část uhlíku propadá roštem ( $r$ ). Předpokládám s návratem tuhých zbytků zpět do spalovací komory z jednotlivých tahů. [1]

$$z_{cMNr} = \frac{c_r}{100 - c_r} \cdot \frac{x_r}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_c \quad (4.5)$$

$$z_{cMNr} = \frac{5}{100 - 5} \cdot \frac{60}{100} \cdot \frac{7,2}{9711,09} \cdot 32600 = 0,76\%$$

$$z_{cú2/3} = \frac{c_{2/3}}{100 - c_{2/3}} \cdot \frac{x_{2/3}}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_c \quad (4.6)$$

$$z_{cú2/3} = \frac{30}{100 - 30} \cdot \frac{15}{100} \cdot \frac{7,2}{9711} \cdot 32600 = 1,55\%$$

$$z_{cú4/5} = \frac{c_{4/5}}{100 - c_{4/5}} \cdot \frac{x_{4/5}}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_c \quad (4.7)$$

$$z_{cú4/5} = \frac{25}{100 - 25} \cdot \frac{10}{100} \cdot \frac{7,2}{9711,09} \cdot 32600 = 0,8\%$$

$$z_{cú} = \frac{c_{ú}}{100 - c_{ú}} \cdot \frac{x_{ú}}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_c \quad (4.8)$$

$$z_{cú} = \frac{20}{100 - 20} \cdot \frac{15}{100} \cdot \frac{7,2}{9711,09} \cdot 32600 = 0,9\%$$

$$z_c = z_{cMNr} + z_{cú2/3} + z_{cú4/5} + z_{cú} = 0,76 + 1,55 + 0,8 + 0,9 = 4,01\% \quad (4.9)$$

$c_i$	Obsah uhlíku v tuhých zbytcích, voleno dle konzultací
$x_i$	Poměr hmotnosti popela v tuhých zbytcích ku hmotnosti popela v surovém palivu
$A^r$	Obsah popela v palivu
$Q_p^p$	Teplu přivedené do kotle 1 kilogramem paliva
$Q_c$	Výhřevnost uhlíku v uvažovaném druhu tuhých zbytků

### 4.2.2 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Ztráta je dána součtem jednotlivých ztrát v nevyužitém teple tuhých zbytků v úletu a propadem na roštu. [1]

$$z_{frr} = \frac{x_r}{100 - c_r} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_r \cdot t_{ú} = \frac{60}{100 - 5} \cdot \frac{7,2}{9711,09} \cdot 0,917 \cdot 500 = 0,21\% \quad (4.10)$$

$$z_{fú2/3} = \frac{x_{ú2/3}}{100 - c_{ú2/3}} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_{ú2/3} \cdot t_{s2/3} = \frac{15}{100 - 30} \cdot \frac{7,2}{9711,09} \cdot 0,9 \cdot 400 = 0,057\% \quad (4.11)$$

$$z_{fú4/5} = \frac{x_{ú4/5}}{100 - c_{ú4/5}} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_{ú4/5} \cdot t_{s4/5} = \frac{10}{100 - 25} \cdot \frac{7,2}{9711,09} \cdot 0,8895 \cdot 350 = 0,03\% \quad (4.12)$$

$$z_{fú} = \frac{x_{ú}}{100 - C_{ú}} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_{ú} \cdot t_{sú} = \frac{15}{100 - 20} \cdot \frac{7,2}{9711,09} \cdot 0,823 \cdot 140 = 0,016\% \quad (4.13)$$

$$z_f = z_{fr} + z_{fú2/3} + z_{fú4/5} + z_{fú} = 0,21 + 0,057 + 0,030 + 0,016 = 0,31\% \quad (4.14)$$

$C_i$  měrné teplo tuhých zbytků

$t_i$  teplota uvažovaného druhu tuhých zbytků

### 4.2.3 Ztráta hořlavinou ve spalínách ( chemický nedopal)

$$\text{Voleno } z_{CO} = 0,2\% \quad (4.15)$$

### 4.2.4 Ztráta fyzickým teplem spalín komínová ztráta

Do komína odchází nevyužitá část tepla ve spalínách , nejvyšší podíl na ztrátách. [1]

Teplota spalín za kotlem  $t_{sp}$  = a součinitel přebytku vzduchu  $\alpha=1,3$

$$z_k = (100 - z_c) \cdot \frac{I_{sp \ 140^\circ\text{C}} - \alpha \cdot O_{Vz_{min}} \cdot c_{VVz20} \cdot t_{20}}{Q_p^p} \quad (4.16)$$

$$= (100 - 4,01) \cdot \frac{849,9 - 1,3 \cdot 2,6995 \cdot 1,32 \cdot 20}{9711,09} = 7,49\%$$

$I_{sp \ 140^\circ\text{C}}$  Entalpie na konci kotle

$\alpha$  Součinitel přebytku vzduchu

$O_{Vz_{min}}$  Minimální objem vlhkého vzduchu

$c_{VVz20}$  Měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu při 20°C

$t_{vz}$  Teplota nasávaného vzduchu

$t_{20}$  Teplota okolí

$Q_p^p$  Teplo přivedené do kotle

$z_c$  Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

### 4.2.5 Ztráta sdílením tepla do okolí sáláním a vedením

Velikost ztráty hořlavinou ve spalínách závisí na parním výkonu a druhu nátěru. U větších kotlů používá hliníkový nátěr oplechování. [1]

$$\text{Voleno } z_{so} = 0,9\% \quad (4.17)$$

### 4.2.6 Tepelná účinnost kotle

Odečtením jednotlivých tepelných ztrát je možné vypočítat tepelnou účinnost nepřímou metodou.

$$\eta_k = 100 - \sum z_i = 100 - 12,91 = 87,09\% \quad (4.18)$$

$$\sum z = z_c + z_f + z_{co} + z_k + z_{so} = 4,01 + 0,31 + 0,2 + 7,49 + 0,9 = 12,91\% \quad (4.19)$$

## 4.3 Výrobní teplo páry a množství paliva

### 4.3.1 Výrobní teplo páry (tepelný výkon kotle)

$$Q_v = M_p \cdot (i_{pp} - i_{nv}) = 16,666 \cdot (3386,9 - 530,51) = 47,604 \text{ MW} \quad (4.20)$$

$M_p$  Parní výkon kotle

$i_{pp}$  Entalpie přehřáté páry při 7 Mpa a 490°C

$i_{nv}$  Entalpie napájecí vody při 125°C

### 4.3.2 Množství paliva

$$M_{pp} = \frac{Q_v}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_k}{100}} = \frac{47604}{9711,09 \cdot \frac{87,09}{100}} = 5,63 \text{ kg/s} \quad (4.21)$$

Množství paliva skutečně spáleného

$$M_{pv} = M_{pp} \cdot \left(1 - \frac{z_c}{100}\right) = 5,63 \cdot \left(1 - \frac{4,01}{100}\right) = 5,40 \text{ kg/s} \quad (4.22)$$

## 5 Výpočet spalovací komory

Stanovení rozměrů šířky a hloubky spalovací komory určím z výpočtového průřezu. Průřez je závislý na plošném zatížení, které volím na základě konzultací  $q=2000\text{W}/\text{m}^2$ . Výška spalovací komory je závislá na tepelném výpočtu, která souvisí s volením výstupní teploty na konci spalovací komory.[1,2]

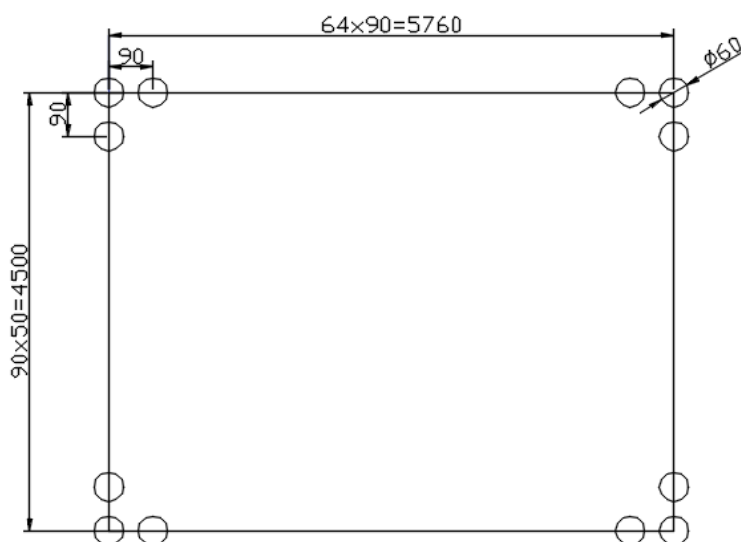
$$q_s = \frac{M_{pv} \cdot Q_i^r}{S} \Rightarrow S = \frac{M_{pv} \cdot Q_i^r}{q_s} = \frac{5,51 \cdot 9660}{2000} = 26,082\text{m}^2 \quad (5.1)$$

### 5.1 Rozměry spalovací komory

Šířka spalovací komory (a) 4,5m

Hloubka spalovací komory (b) 5,76m

Výška spalovací komory (h) 15m



Obr. 5.1 Scéma spalovací komory

#### Povrch stěn ohniště včetně výstupního otvoru

$$F_{st} = [2 \cdot (a \cdot h) + 2 \cdot (b \cdot h) + (a \cdot b)] \quad (5.2)$$

$$F_{st} = [2 \cdot (4,5 \cdot 15) + 2 \cdot (5,76 \cdot 15) + (4,5 \cdot 5,76)] = 333,72 \text{ m}^2$$

#### Účinná sálavá plocha stěn ohniště

$$F_{ús} = F_{st} \cdot x_{st} = 333,72 \cdot 0,95 = 317,034 \text{ m}^2 \quad (5.3)$$

$F_{st}$  plocha otrubkované stěny včetně výstupního otvoru  
 $x_{st}$  úhlový součinitel trubkové stěny



**Aktivní objem ohniště**

$$V_o = a \cdot b \cdot h = 4,5 \cdot 5,76 \cdot 15 = 388,8 \text{ m}^3 \quad (5.4)$$

**5.2 Tepelný výpočet ohniště****5.2.1 Určení adiabatické teploty v ohništi****Entalpie spalin ve spalovací komoře**

$$I_{sp} = \frac{Q_{vz} + Q_p}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{1090,515 + 52164}{4,3447 \cdot 5,4} = 2254,671 \text{ kJ/m}^3 \quad (5.5)$$

**Teplo dodané vzduchem**

$$Q_{vz} = O_{vz} \cdot M_{pv} \cdot I_{vz} = 3,5093 \cdot 5,4 \cdot 38,7 = 733,373 \text{ kW} \quad (5.6)$$

$$I_{vz} = c \cdot t = 1,29 \cdot 30 = 38,7 \text{ kJ/m}^3 \quad (5.7)$$

c měrné teplo vzduchu při teplotě nasávaného vzduchu [1]

**Teplo vzniklé spálením paliva**

$$Q_p = M_{pv} \cdot Q_i^r = 5,4 \cdot 9660 = 52164 \text{ kW} \quad (5.8)$$

Pro určení entalpie spalin je potřeba určit dané složení spalin, uvažujeme přebytek vzduchu v ohništi  $\alpha=1,3$

**Procentuální složení spalin pro jednotlivé složky**

Dusík

$$w_{N_2} = \frac{O_{N_2}}{O_{sp}} = \frac{2,0745}{4,3447} = 0,4775 \quad (5.9)$$

Voda

$$w_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{sp}} = \frac{0,9353}{4,3447} = 0,2153 \quad (5.10)$$

Oxid uhličitý

$$w_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{sp}} = \frac{0,5124}{4,3447} = 0,1179 \quad (5.11)$$

Argon

$$w_{Ar} = \frac{O_{Ar}}{O_{sp}} = \frac{0,0244}{4,3447} = 0,0056 \quad (5.12)$$

Oxid siřičitý

$$w_{SO_2} = \frac{O_{SO_2}}{O_{sp}} = \frac{0,0017}{4,3447} = 0,0004 \quad (5.13)$$

Vzduch

$$w_{vz} = \frac{(\alpha - 1) \cdot O_{vz_{min}}}{O_{sp}} = \frac{(1,3 - 1) \cdot 2,6995}{4,3447} = 0,1864 \quad (5.14)$$

**Entalpie spalin pro 1000 °C**

$$\begin{aligned} I_{sp}^{1000} &= \sum w_i \cdot i_i = \\ &= w_{N_2} \cdot i_{N_2} + w_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + w_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + w_{Ar} \cdot i_{Ar} + w_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + w_{vz} \cdot c_p \cdot t \\ &= 0,4775 \cdot 1392 + 0,2153 \cdot 1723 + 0,1179 \cdot 2204 + 0,0056 \cdot 928 + 0,0004 \cdot 2305 \\ &\quad + 0,1864 \cdot 1,41 \cdot 1000 = 1564,4 \text{ kJ/m}^3 \end{aligned} \quad (5.15)$$

**Entalpie spalin pro 1500 °C**

$$\begin{aligned} I_{sp}^{1500} &= \sum w_i \cdot i_i = \\ &= w_{N_2} \cdot i_{N_2} + w_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + w_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + w_{Ar} \cdot i_{Ar} + w_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + w_{vz} \cdot c_p \cdot t \\ &= 0,4775 \cdot 2166 + 0,2153 \cdot 2779 + 0,1179 \cdot 3504 + 0,0056 \cdot 1390 + 0,0004 \cdot 3590 \\ &\quad + 0,1864 \cdot 1,493 \cdot 1500 = 2472,31 \text{ kJ/m}^3 \end{aligned} \quad (5.16)$$

Z vypočtené entalpie spalin v ohništi se určí adiabatická teplota ve spalovací komoře pomocí interpolace z entalpií pro teploty 1000 °C a 1500 °C. Byla zjištěna adiabatická teplota ve spalovací komoře 1380,15°C.

**5.2.2 Poměrná teplota spalin**

$$\theta_0 = \frac{\vartheta_0}{\vartheta_a} = \frac{1}{1 + M \cdot \left(\frac{\alpha_0}{B_0}\right)^{0,6}} \quad (5.17)$$

$\vartheta_0$	absolutní teplota spalin na výstupu z ohniště [K]
$\vartheta_a$	teoretická teplota při adiabatickém spalování [K]
$B_0$	Boltzmanovo číslo
$\alpha_0$	stupeň černosti ohniště
$M$	součinitel charakterizující průběh teploty po výšce ohniště

**Teplota spalin na výstupu z ohniště**

Teoretická teplota  $\vartheta_a$  [°C] se určí z užitečného tepla uvolněného při spalování  $I_u$  [kJ/kg], které se rovná entalpii spalin při teplotě teoretické a součiniteli přebytku vzduchu na konci ohniště  $\alpha_0$ . [1]

Musíme zvolit teplotu  $\vartheta_0$  [°C], aby bylo možné dopočíst závislé chybějící veličiny na této teplotě. Volím tedy teplotu  $\vartheta_0 = 850^\circ\text{C}$ . Následně se pomocí zvolené teploty dopočítají neznámé údaje potřebné k výpočtu teploty na konci ohniště. Zvolená a vypočtená teplota by se neměly lišit o více jak 50 °C, nastane-li odchylka větší než zmíněná teplota je potřeba zvolit novou teplotu na výstupu z ohniště nebo upravit výšku spalovací komory. V mém výpočtu je odchylka 4,6 °C, jsme tedy v intervalu. [1,2]

$$\vartheta_0 = \frac{\vartheta_a + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{\alpha_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273,15 = \frac{1380,15 + 273,15}{1 + 0,59 \cdot \left(\frac{0,7653}{1,1339}\right)^{0,6}} = 854,6 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.18)$$

### 5.2.3 Součinitel M

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot x_0 = 0,59 - 0,5 \cdot 0 = 0,59 \quad (5.19)$$

$x_0$  u spalování na roštu je jeho hodnota 0. [1]

### 5.2.4 Boltzmanovo číslo

$$B_0 = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp} \cdot c}}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \psi \cdot F_{st} \cdot Ta^3} = \frac{0,9898 \cdot 5,4 \cdot 7,797}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,4275 \cdot 333,72 \cdot 1653,294^3} = 1,134 \quad (5.20)$$

$\varphi$	součinitel uchování tepla
$M_{pv}$	množství paliva skutečně spáleného
$\overline{O_{sp} \cdot c}$	střední celkové měrné teplo spalin
$\psi$	střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn
$F_{st}$	celkový povrch stěn ohniště
$Ta$	teoretická teplota plamene

#### Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{z_{so}}{\eta_k + z_{so}} = 1 - \frac{0,9}{87,09 + 0,9} = 0,9898 \quad (5.21)$$

$z_{so}$	ztráta sáláním do okolí
$\eta_k$	účinnost kotle

#### Střední celkové měrné teplo spalin

$$\overline{O_{sp} \cdot c} = \frac{I_u - I_0}{\vartheta_a - \vartheta_0} = \frac{9795,3043 - 5661,8}{1380,15 - 850} = 7,797 \text{ kJ/kgK} \quad (5.22)$$

$I_u$	užitečné teplo uvolněné v ohništi
$I_0$	entalpie spalin na výstupu z ohniště pro $\vartheta_0$
$\vartheta_a$	adiabatická teplota plamene
$\vartheta_0$	teplota spalin na výstupu z ohniště

#### Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - z_{co} - z_c - z_f}{100 - z_c} + Q_{vz} = 9711,09 \cdot \frac{100 - 4,01 - 0,31 - 0,2}{100 - 4,01} + 135,8098$$

$$I_u = 9795,3043 \text{ kJ/kg} \quad (5.23)$$

$z_{co}$	ztráta chemickým nedopalem
$z_c$	ztráta mechanickým nedopalem
$z_f$	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
$Q_p^p$	teplo přivedené do kotle
$Q_{vz}$	teplo přivedené do kotle se vzduchem

**Teplo přivedené do kotle se vzduchem**

$$Q_{vz} = \frac{Q_{vz}}{M_{pv}} = \frac{733,373}{5,4} = 1358098 \text{ kJ/kg} \quad (5.24)$$

**Součinitel tepelné efektivity stěn**

$$\psi = x \cdot \xi = 0,95 \cdot 0,45 = 0,4275 \quad (5.25)$$

$x$  úhlový součinitel trubkový stěny [1]

$\xi$  součinitel zanesení stěn ohniště [1]

**5.2.5 Stupeň černosti ohniště**

$$a_0 = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{R}{F_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \psi) \cdot \left(1 - \frac{R}{F_{st}}\right)} \quad (5.26)$$

$$a_0 = \frac{0,5470 + (1 - 0,5470) \cdot \frac{25,92}{33,72}}{1 - (1 - 0,5470) \cdot (1 - 0,4275) \cdot \left(1 - \frac{25,92}{33,72}\right)} = 0,7653$$

$a_{pl}$  efektivní stupeň černosti plamene

$R$  plocha hořící vrstvy na roštu

$F_{st}$  celkový povrch stěn ohniště

$\psi$  střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn

**Plocha hořící vrstvy paliva na roštu**

$$R = a \cdot b = 4,5 \cdot 5,76 = 25,92 \text{ m}^2 \quad (5.27)$$

$a, b$  šířka a hloubka ohniště

**Efektivní stupeň černosti plamene**

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,864 \cdot 0,1 \cdot 4,1942} = 0,5471 \quad (5.28)$$

$k$  součinitel zeslabení sáláním

$p$  tlak v ohništi, u kotlů bez přetlaků  $p=0,1$  MPa

$s$  účinná tloušťka sálavé vrstvy

**Účinná tloušťka sálavé vrstvy**

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{388,8}{333,72} = 4,1942 \text{ m} \quad (5.29)$$

$V_0$  aktivní objem ohniště

$F_{st}$  celkový povrch stěn ohniště

**Součinitel zeslabení sálání**

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot \chi_1 \cdot \chi_2 \quad (5.30)$$

$$k = 1,66 + 0,054 + 10 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,03 = 1,864 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$k_{sp} \cdot r_{sp}$  součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$k_p \cdot \mu$  součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$k_k$  součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi,  $k_k = 1$

$\chi_1$  hodnota závislá na druhu paliva,  $\chi_1 = 0,5$  [1]

$\chi_2$  hodnota závislá na způsobu spalování,  $\chi_2 = 0,03$  [1]

**Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi**

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_0^2 \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1123,15^2 \cdot 20^2}} = 0,0540 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.31)$$

$\mu$  koncentrace popílku ve spalinách

$d$  střední efektivní průměr částiček popílku,  $d = 20 \mu\text{m}$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (5.32)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,0337 \cdot 4,1942}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1123,15}{1000} \right) \cdot 0,3337$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 1,66 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{sp}$  objemová část tříatomových plynů

$T_0$  teplota na konci ohniště

$s$  účinná tloušťka sálavé vrstvy

$p_{sp}$  celkový parciální tlak

**5.3 Množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn**

$$Q_s = \varphi \cdot (I_u - I_0) = 0,9898 \cdot (9795,304 - 5661,8) = 4091,225 \text{ kJ/k} \quad (5.33)$$

$\varphi$  součinitel uchování tepla

$I_u$  teplo uvolněné v ohništi

$I_0$  entalpie spalin na výstupu z ohniště (pro 854,6°C)

### Střední tepelné zatížení stěn ohniště

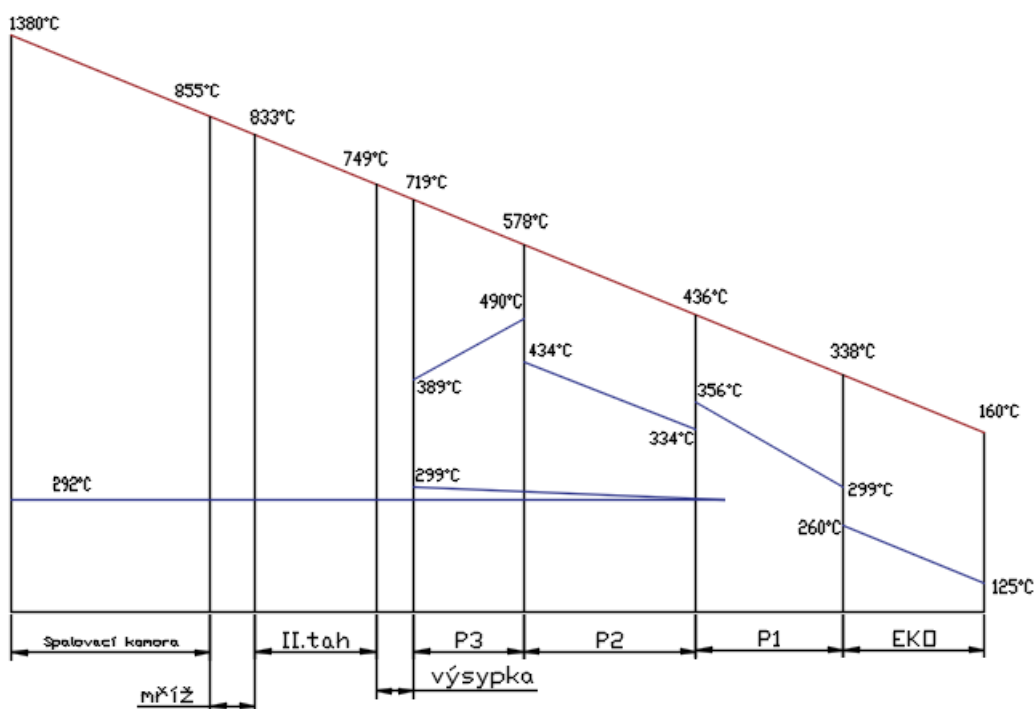
$$\bar{q} = \frac{Q_s \cdot M_{pv}}{F_{\dot{u}s}} = \frac{4091,225 \cdot 5,4}{317,034} = 69,6853 \text{ kW/m}^2 \quad (5.34)$$

$M_{pv}$  množství paliva skutečně spáleného

$F_{\dot{u}s}$  účinná sálavá plocha stěn ohniště

## 6 Výpočet teplosměnných ploch

Pro návrh teplosměnných ploch jsem vycházel ze zadaných parametrů kotle, což je tlak a teplota přehřáté páry, teplota napájecí vody a teplota na konci ohniště. Na základě zadaných údajů jsem vypracoval tepelnou bilanci páry, vody, vzduchu a spalin a získané údaje zaznamenal do pilového diagramu. Při určení neznámých parametrů jsem použil program X Steam.[1,2]



Obr. 6 Pilový diagram

Název	MPa
Tlaková ztráta v ekonomizéru	0,5
Tlaková ztráta ve výparníku	0
Tlaková ztráta v závěsných trubkách	0,05
Tlaková ztráta v přehříváku 1.	0,2
Tlaková ztráta v přehříváku 2.	0,2
Tlaková ztráta v přehříváku 3.	0,2

Tab. 6 Tlakové ztráty ve výhřevných plochách

## 6.1 Tlak napájecí vody

Hodnotu tlakové ztráty je nutné stanovit zpočátku, jelikož podle ní navrhujeme napájecí čerpadlo. Tlak napájecí vody se stanoví z výstupního tlaku páry, ke kterému přičteme jednotlivé ztráty z teplosměnných ploch.

### Tlak napájecí vody

$$p_{nv} = p_p + \Delta p_{p3} + \Delta p_{p2} + \Delta p_{p1} + \Delta p_{zt} + \Delta p_{výp} + \Delta p_{eko} \quad (6.1)$$

$$p_{nv} = 7 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,05 + 0 + 0,5 = 8,15 \text{ MPa}$$

### Teplota napájecí vody

$$t_{nv} = 125 \text{ }^\circ\text{C}$$

### Entalpie napájecí vody

$$i_{nv} = 530,54 \text{ kJ/kg}$$

## 6.2 Rozdělení tepelného výkonu na výhřevné plochy

### 6.2.1 Přehřívák 3

Uvažuji entalpický spád  $\Delta i_{p3} = 265 \text{ kJ/kg}$

#### Tlak páry na výstupu

$$p_{p3out} = 7 \text{ MPa}$$

#### Teplota páry na výstupu

$$t_{p3out} = 490 \text{ }^\circ\text{C}$$

#### Entalpie páry na výstupu

$$i_{p3out} = 3386,93 \text{ kJ/kg}$$

#### Tlak páry na vstupu

$$p_{p3in} = 7,2 \text{ MPa}$$

#### Entalpie páry na vstupu

$$i_{p3in} = i_{p3out} - \Delta i_{p3} = 3386,93 - 265 = 3121,93 \text{ kJ/kg} \quad (6.2)$$

#### Teplota páry na vstupu

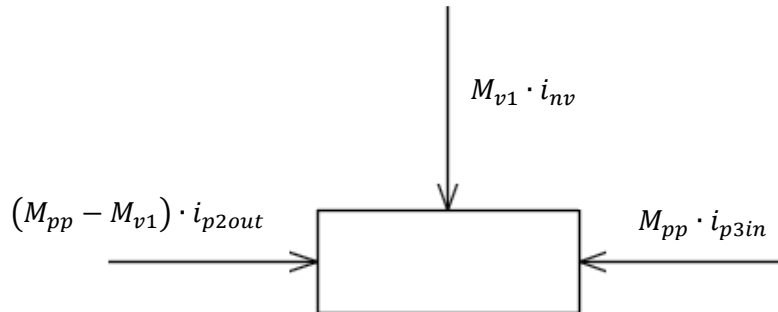
$$t_{p3in} = 387,84 \text{ }^\circ\text{C}$$

#### Spotřebované teplo

$$Q_{p3} = M_{pp} \cdot \Delta i_{p3} = 16,666 \cdot 265 = 4416,667 \text{ kW} \quad (6.3)$$

## 6.2.2 Přehřívák 2

Uvažuji entalpický spád  $\Delta i_{p2} = 291 \text{ kJ/kg}$ . Na výstupu z přehříváku 2 bude umístěna regulace teploty přehřáté páry, které se uskuteční vstřikem napájecí vody. Množství vstřiku napájecí vody budu uvažovat 4,5 % z celkového množství přehřáté páry.



Obr. 6.2.2 Vstřik napájecí vody mezi  $P_3$  a  $P_2$

### Tlak páry na výstupu

$$p_{p2out} = 7,2 \text{ MPa}$$

### Entalpie páry na výstupu

#### Množství vstřiku napájecí vody

$$M_{v1} = 0,03 \cdot M_{pp} = 0,045 \cdot 16,666 = 0,75 \text{ kg/s} \quad (6.4)$$

#### Bilanční rovnice

$$(M_{pp} - M_{v1}) \cdot i_{p2out} + M_{v1} \cdot i_{nv} = M_{pp} \cdot i_{p3in} \quad (6.5)$$

$$i_{p2out} = \frac{M_{pp} \cdot i_{p3in} - M_{v1} \cdot i_{nv}}{M_{pp} - M_{v1}} = \frac{16,666 \cdot 3121,93 - 0,75 \cdot 530,54}{16,666 - 0,75} = 3244,037 \text{ kJ/kg}$$

### Teplota páry na výstupu

$$t_{p2out} = 433,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

### Tlak páry na vstupu

$$p_{p2in} = 7,4 \text{ MPa}$$

### Entalpie páry na vstupu

$$i_{p2in} = 3248,47 - 291 = 2953,037 \text{ kJ/kg} \quad (6.6)$$

### Teplota páry na vstupu

$$t_{p2in} = 334 \text{ }^\circ\text{C}$$

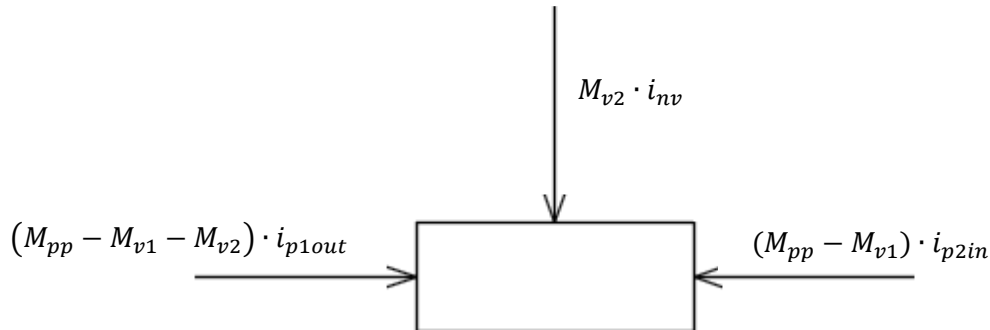
### Spotřebované teplo

$$Q_{p2} = (M_{pp} - M_{v1}) \cdot \Delta i_{p2} = (16,666 - 0,75) \cdot 291 = 4631,75 \text{ kJ/kg} \quad (6.7)$$



### 6.2.3 Přehřívák 1

Uvažuji entalpický spád  $\Delta i_{p1} = 218,9 \text{ kJ/kg}$ . Na výstupu z přehříváku 2 bude umístěna regulace teploty přehřáté páry, které se uskuteční vstřikem napájecí vody. Množství vstřiku napájecí vody budu uvažovat 2,7% z celkového množství přehřáté páry.



Obr. 6.2.3 Vstřík napájecí vody mezi  $P_2$  a  $P_1$

#### Tlak páry na výstupu

$$p_{p1out} = 7,4 \text{ MPa}$$

#### Entalpie páry na výstupu

#### Množství vstřiku napájecí vody

$$M_{v2} = 0,04 \cdot M_{pp} = 0,027 \cdot 16,666 = 0,45 \text{ kJ/kg} \quad (6.8)$$

#### Bilanční rovnice

$$(M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot i_{p1out} + M_{v2} \cdot i_{nv} = (M_{pp} - M_{v1}) \cdot i_{p2in} \quad (6.9)$$

$$i_{p1out} = \frac{(M_{pp} - M_{v1}) \cdot i_{p2in} - M_{v2} \cdot i_{nv}}{M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}}$$

$$i_{p1out} = \frac{(16,666 - 0,75) \cdot 2953,037 - 0,450 \cdot 530,4}{16,666 - 0,75 - 0,450} = 3023,52 \text{ kJ/kg}$$

#### Teplota páry na výstupu

$$t_{p1out} = 355,74^\circ\text{C}$$

#### Tlak páry na vstupu

$$p_{p1in} = 7,6 \text{ MPa}$$

#### Entalpie páry na vstupu

$$i_{p1in} = i_{zt} = 2804,615 \text{ kJ/kg}$$

#### Teplota páry na vstupu

$$t_{p1in} = t_{zt} = 299,1^\circ\text{C}$$

**Spotřebované teplo**

$$Q_{p1} = (M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot \Delta i_{p1} = (16,666 - 0,75 - 0,45) \cdot 218,9 = 3385,72 \text{ kW} \quad (6.10)$$

**6.2.4 Závěsné trubky**

Závěsné trubky se používají k zavěšení trubkových svazků přehříváků.

**Tlak páry na výstupu**

$$p_{ztout} = 7,6 \text{ MPa}$$

**Teplota páry na výstupu**

$$t_{ztout} = 299,1 \text{ °C}$$

**Entalpie páry na výstupu**

$$i_{ztout} = 2804,615 \text{ kJ/kg}$$

**Tlak páry na vstupu**

$$p_{ztin} = 7,65 \text{ MPa}$$

**Teplota páry na vstupu**

$$t_{ztin} = 291,9 \text{ °C}$$

**Entalpie páry na vstupu**

$$i_{ztin} = 2763,7 \text{ kJ/kg}$$

**Spotřebované teplo**

$$Q_{zt} = (M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot (i_{ztout} - i_{ztin}) = 634,18 \text{ kW} \quad (6.11)$$

**6.2.5 Výparník**

Ve výparníku dochází k fázové přeměně syté kapaliny na sytou páru za konstantní teploty a tlaku. Výparník je tvořený membránovými stěnami v I, II a III tahu.

**Tlak páry na vstupu**

$$p_{výp} = 7,65 \text{ MPa}$$

**Teplota páry na vstupu a výstupu**

$$t_{výp} = 291,9 \text{ °C}$$

**Entalpie syté páry na výstupu**

$$i''_{výp} = 2763,7 \text{ kJ/kg}$$

**Entalpie syté kapaliny na vstupu**

$$i'_{výp} = 1300,1 \text{ kJ/kg}$$

**Spotřebované teplo**

$$Q_{výp} = (M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot (i''_{výp} - i'_{výp}) = (16,666 - 0,5 - 0,666) \cdot (2763,7 - 1300,1) = 22685,8 \text{ kW} \quad (6.12)$$

### 6.2.6 Ekonomizér

V ekonomizéru se předeřívá voda před vstupem do výparníku.

**Tlak vody na výstupu**

$$p_{eko,out} = 7,65 \text{ MPa}$$

**Teplota vody na výstupu**

$$t_{eko,out} = 260 \text{ °C}$$

**Entalpie vody na výstupu**

$$i_{eko,out} = 1134,4 \text{ kJ/kg}$$

**Tlak páry na vstupu**

$$p_{eko,in} = 8,15 \text{ MPa}$$

**Teplota páry na vstupu**

$$t_{eko,in} = 125 \text{ °C}$$

**Entalpie páry na vstupu**

$$i_{eko,in} = 530,5 \text{ kJ/kg}$$

**Spotřebované teplo**

$$Q_{eko} = (M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot \Delta i_{eko} = (16,666 - 0,5 - 0,666) \cdot (1134,4 - 530,5) = 9360 \text{ kW}$$

(6.13)

### 6.3 Celkové potřebné teplo

$$Q_c = Q_{p1} + Q_{p2} + Q_{p3} + Q_{zt} + Q_{vyp} + Q_{eko}$$

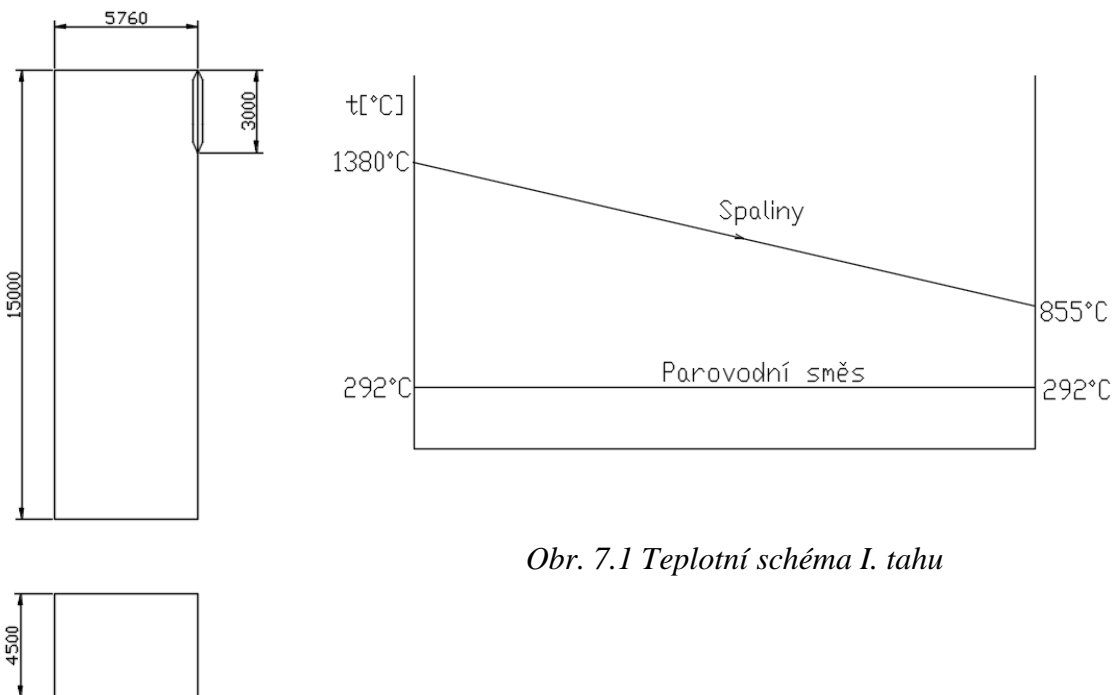
(6.14)

$$Q_c = 3385,72 + 4631,75 + 4416,7 + 634,18 + 22685,8 + 9360 = 45114,1 \text{ kW}$$

Teplosměnná plocha		Teplota	Tlak	Entalpie	Entalpický spád	Potřebné teplo
		[°C]	[Mpa]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kW]
Ekonomizér	výstup	260	7,65	1134,4	603,9	9360
	vstup	125	8,15	530,5		
Výparník	výstup	291,9	7,65	2763,7	1463,6	22685,8
	vstup	291,9	7,65	1300,1		
Závěsné trubky	výstup	299,1	7,6	2804,6	40,9	634,18
	vstup	291,9	7,65	2763,7		
Přehřívák I	výstup	356	7,4	3023,5	218,9	3385,7
	vstup	299,1	7,6	2804,6		
Přehřívák II	výstup	434	7,2	3244	291	4631,8
	vstup	334	7,4	2953		
Přehřívák III	výstup	490	7	3386,9	265	4416,7
	vstup	388	7,2	3121,9		

Tab. 6.3.1 Přehled výhřevných ploch

## 7 Výpočet I. tahu



*Obr. 7.1 Teplotní schéma I. tahu*

*Obr. 7 Rozměry I. tahu*

### Rozměry I. tahu

Šířka spalovací komory:	a=4,5m
Hloubka spalovací komory:	b=5,76m
Výška spalovací komory:	h=15m
Výška mřížce:	c=3m

### Teplota a entalpie v ohništi

$$t_{sp1} = 1380,15^{\circ}\text{C}$$

$$I_{sp1} = 2254,67 \text{ kJ/kg}$$

### Teplota a entalpie na konci I. tahu

$$t_{sp2} = 854,6^{\circ}\text{C}$$

$$I_{sp2} = 1314,6^{\circ}\text{C}$$

### Střední teplota spalin

$$t_{stř} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{1380,15 + 854,6}{2} = 1117,37^{\circ}\text{C} \quad (7.1)$$

### Rychlost proudění spalin

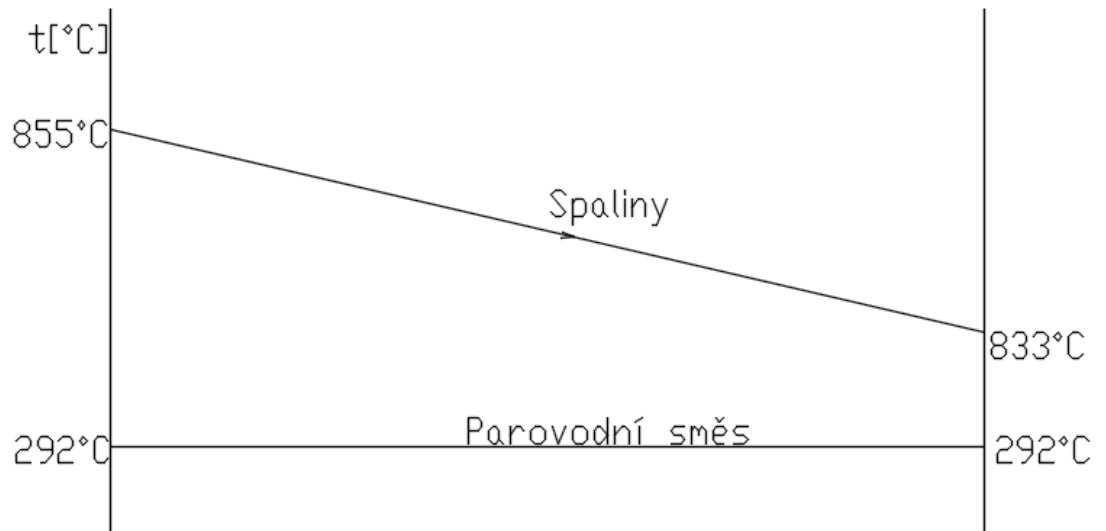
$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{a \cdot b} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = \frac{4,3447 \cdot 5,4}{4,5 \cdot 5,76} \cdot \frac{273,15 + 1117,37}{273,15} = 4,61 \text{ m/s} \quad (7.2)$$

### Teplu předané ve výparníku

$$Q = O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot (I_{sp1} - I_{sp2}) = 4,3447 \cdot 5,4 (2254,67 - 1314,6) = 22055,09 \text{ kW} \quad (7.3)$$

## 8 Mříž

Mříž nebo kotlový svazek je přechod mezi I. a II. tahem, který se nachází v horní části spalovací komory. Mříž tvoří část výparníku, vznikne rozvolněním trubek v membránové stěně.[1]



*Obr.8 Tepelné schéma mříže*

### Teplota a entalpie spalin na vstupu

$$t_{sp1} = 854,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_{sp1} = 1314,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### Teplota spalin na výstupu z mříže

$$t_{sp2} = 833 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### Střední teplota spalin

$$t_{stř} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{854,6 + 833}{2} = 843,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.1)$$

Uvažuji rychlost proudění spalin

$$w=9 \text{ m/s}$$

Počet trubek v jedné řadě

$$n_{tr}=15$$

Počet řad trubek

$$n_{řad} = 3$$

Průměr trubek membránové stěny

$$d=0,0063$$

### Výpočet výšky rozvolnění mříže

$$c_m = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{w_{sp} \cdot (a - n_{tr} \cdot d)} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} \quad (8.2)$$

$$c_m = \frac{4,3447 \cdot 5,4}{9 \cdot (4,5 - 15 \cdot 0,06)} \cdot \frac{273,15 + 843,8}{273,15} = 2,96 \text{ m}$$

Volím výšku mříže  $c_m = 3\text{m}$

**Přepočet rychlosti proudění spalin skrz mříž**

$$w_{sp} = \frac{4,3447 \cdot 5,4}{3 \cdot (4,5 - 15 \cdot 0,06)} \cdot \frac{273,15 + 843,8}{273,15} = 8,88 \text{ m/s} \quad (8.3)$$

**8.1 Tepelný výpočet****8.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekci**

Výpočet součinitele přestupu tepla konvekci je pro příčné proudění spalin a uspořádání trubek za sebou. Uvažujeme hladké trubky.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (8.4)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,9225 \cdot 0,941 \cdot \frac{0,0970}{0,06} \cdot \left( \frac{8,88 \cdot 0,06}{0,000014} \right)^{0,65} \cdot 0,6067^{0,33}$$

$$\alpha_k = 50,458 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Korekční součinitel na počet podélných řad**

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_{řad} - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (15 - 2) = 0,9225 \quad (8.5)$$

**Korekční součinitel v závislosti na poměrné přímé rozteči trubek a podélné rozteči**

$$c_s = \left[ 1 + \left( 2 \cdot \sigma_1 - 3 \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right) \right) \right]^{-2} = \left[ 1 + \left( 2 \cdot 4,83 - 3 \cdot \left( 1 - \frac{1,66}{2} \right) \right) \right]^{-2} = 0,941 \quad (8.6)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{d} = \frac{0,29}{0,06} = 4,83$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{d} = \frac{0,1}{0,06} = 1,66 \quad (8.7)$$

**Hodnoty  $\lambda, \nu, Pr$  pro střední teplotu spalin  $t_{stř}$  [1]**

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda=0,0970 \text{ W/mk}$
Kinematická viskozita	$\nu= 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Prandtlovo číslo	$Pr=0,6067$

**8.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním pro zaprášené spaliny**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \left( \frac{T_z}{T} \right)} \quad (8.8)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2288 \cdot 1116,95^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{645,05}{1116,95}\right)^4}{1 - \left(\frac{645,05}{1116,95}\right)} = 34,4076 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$a_{st}$	stupeň černosti povrchu stěn
$a$	stupeň černosti ohniště
$T$	střední teplota spalin
$T_z$	absolutní teplota zaneseného povrchu plochy

### Stupeň černosti povrchu stěn

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

### Absolutní teplota zaneseného povrchu plochy

$$T_z = 273,15 + t_{syt} + \Delta t = 273,15 + 291,9 + 80 = 645,05 \text{ K} \quad (8.9)$$

### Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-5,205 \cdot 0,1 \cdot 0,50} = 0,2288 \quad (8.10)$$

### Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (8.11)$$

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot 0,5}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1116,95}{1000} \right) \cdot 0,3337 = 5,20 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

### Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,3337 = 0,03337 \text{ MPa} \quad (8.12)$$

### Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro svazky z hladkých trubek

$$s = 0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,06 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,29 \cdot 0,1}{0,06^2} - 1 \right) = 0,50 \text{ m} \quad (8.13)$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_s = 50,458 + 34,4076 = 84,866 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (8.14)$$

### Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_c} = \frac{84,866}{1 + 0,0045 \cdot 84,866} \quad (8.15)$$

$\varepsilon$  součinitel zanesení výhřevné plochy, voleno dle konzultací

### Teplo odebrané spalinám mříží

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 61,412 \cdot 25,434 \cdot 551,8295 \cdot 10^{-3} = 861,9395 \text{ kW} \quad (8.16)$$

### Teplosměnná plocha mříže

$$S = \pi \cdot d \cdot c_m \cdot n_{tr} \cdot n_{rad} = \pi \cdot 0,06 \cdot 3 \cdot 15 \cdot 3 = 25,434 \text{ m}^2 \quad (8.17)$$

### Střední teplotní logaritmický spád

$$t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{562,7 - 541,1}{\ln \frac{562,7}{541,1}} = 551,83 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8.18)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{syt} = 854,6 - 291,9 = 562,7 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8.19)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{syt} = 833 - 291,9 = 541,1 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8.20)$$

## 8.3 Výsledná teplota spalin na výstupu z mříže

### Teplota spalin na vstupu

$$Q_{sp1} = i_{sp1} \cdot O_{sp} \cdot M_{pv} = 1314,6 \cdot 4,3447 \cdot 5,4 = 30841,97 \text{ kW} \quad (8.21)$$

### Teplota spalin na výstupu z mříže

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q = 30841,97 - 861,9395 = 29980,04 \text{ kW} \quad (8.22)$$

### Entalpie odpovídající teplu spalin na výstupu z mříže

$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{29980,04}{4,3447 \cdot 5,4} = 1277,861 \text{ kJ/kg} \quad (8.23)$$

$$I_{sp800} = 1221,85 \text{ kJ/kg}$$

$$I_{sp900} = 1391,73 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta t_{sp} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp900} - I_{sp800} = 1221,85 - 1391,73 = 169,88 \text{ kJ/kg} \quad (8.24)$$

$$I_{spc} = I_{sp2} - I_{sp800} = 1277,861 - 1221,85 = 56,011 \text{ kJ/kg} \quad (8.25)$$

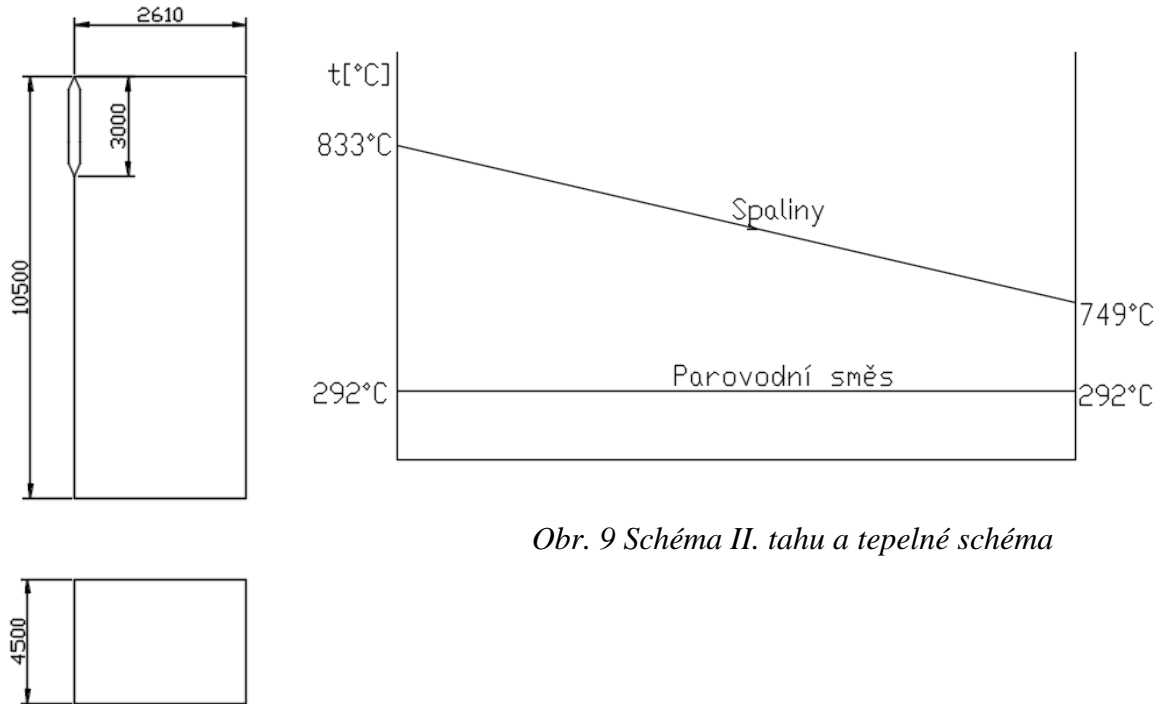
$$t_{sp2} = \left( \frac{\Delta t_{sp}}{\Delta I_{sp}} \cdot I_{spc} \right) = \left( \frac{100}{169,88} \cdot 56,011 \right) + 800 = 832,97 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8.26)$$

Výsledná teplota spalin na konci mříže  $t_{sp2} = 832,97^\circ\text{C}$  se jen nepatrně liší od odhadované teploty  $t_{sp2} = 833 \text{ }^\circ\text{C}$ , což je přijatelná odchylka.



## 9 Výpočet II. tahu

Ve II tahu je umístěna pouze část výparníku, který je tvořen membránovými stěnami. V prázdném prostoru II. tahu dochází ke zchlazení spalin a snížení obsahu popílku ve spalinách, aby nedocházelo k zanášení teplosměnných ploch, umístěných v následujících tazích.



*Obr. 9 Schéma II. tahu a tepelné schéma*

### Teplota a entalpie spalin na vstupu

$$t_{sp1} = 833^{\circ}\text{C}$$

$$I_{sp1} = 1277,91 \text{ kJ/kg}$$

### Teplota entalpie spalin na výstupu

$$t_{sp2} = 748,93^{\circ}\text{C}$$

$$I_{sp2} = 1136,92 \text{ kJ/kg}$$

### Střední teplota spalin

$$t_{stř} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{833 + 748,93}{2} = 790,965^{\circ}\text{C} \quad (9.1)$$

**Teoretická rychlost spalin**  $w_{sp} = 8 \text{ m/s}$

**Teoretický plošný průřez spalin**

$$S_{teor} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{w_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = \frac{4,3447 \cdot 5,4}{8} \cdot \frac{273,15 + 790,965}{273,15} = 11,425 \text{ m}^2 \quad (9.2)$$

**Hloubka II. tahu**

$$b_{\text{II}} = \frac{S_{\text{teor}}}{a} = \frac{11,425}{4,5} = 2,53 \text{ m} \quad (9.3)$$

Volím hloubku II. tahu  $b_{\text{II}} = 2,610 \text{ m}$

**Rozměry II. tahu**

Šířka	$a=4,5 \text{ m}$
Hloubka	$b_{\text{II}} = 2,610 \text{ m}$
Výška po výsypku	$h= 10,5 \text{ m}$
Výška mříže	$c_m = 3 \text{ m}$

**Přepočet rychlosti proudění spalin**

$$w_{\text{sp}} = \frac{O_{\text{sp}} \cdot M_{\text{pv}}}{S} \cdot \frac{273,15 + t_{\text{stř}}}{273,15} = \frac{4,3447 \cdot 5,4}{12,15} \cdot \frac{273,15 + 790,965}{273,15} = 7,78 \text{ m/s} \quad (9.4)$$

**Plošný průřez spalin**

$$S = a \cdot b_{\text{II}} = 4,5 \cdot 2,610 = 11,745 \text{ m}^2 \quad (9.5)$$

**9.1 Součinitel přestupu tepla pro membránové stěny****9.1.1 Konvekci pro podélné proudění**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{\text{sp}} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot P_r^{0,4} \quad (9.6)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,09326}{3,30} \cdot \left( \frac{7,78 \cdot 3,30}{1,3 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,6109^{0,4} = 9,081 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Ekvivalentní průměr spalin**

$$d_e = \frac{4 \cdot S}{O} = \frac{4 \cdot 11,745}{14,22} = 3,30 \text{ m} \quad (9.7)$$

**Obvod kanálu**

$$O = 2 \cdot (a + b_{\text{II}}) = 2 \cdot (4,5 + 2,61) = 14,22 \text{ m} \quad (9.8)$$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin [1]**

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda=0,093 \text{ W/mK}$
Kinematická viskozita	$\nu=0,00013 \text{ m}^2/\text{s}$
Prandtlovo číslo	$\text{Pr}=0,6109$

### 9.1.2 Sáláním pro zaprášené spaliny

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)} \quad (9.9)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,4979 \cdot 1061,34^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{650,45}{1064,115}\right)^4}{1 - \left(\frac{650,45}{1064,115}\right)} = 67,606 \text{ W/m}^2\text{K}$$

#### Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn

$$T_z = 273,15 + (t_{synt} + \varepsilon \cdot q) = 273,15 + (291,9 + 0,003 \cdot 28468,3) = 650,45 \text{ K} \quad (9.10)$$

$\varepsilon$  součinitel zanesení výhřevné plochy, voleno dle konzultací

#### Měrné zatížení II. tahu

$$q = \frac{Q_{12}}{F_{ús}} \cdot 10^3 = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot \Delta I_{sp}}{(F_{st} - a \cdot c_m - a \cdot b_{\Pi}) \cdot x_{st}} \cdot 10^3 \quad (9.11)$$

$$q = \frac{4,3447 \cdot 5,4 \cdot 140,99}{(147,555 - 4,5 \cdot 3 - 4,5 \cdot 2,61) \cdot 0,95} \cdot 10^3 = 28468,3 \text{ kW}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp1} - I_{sp2} = 1277,91 - 1136,92 = 140,99 \text{ kJ/kg} \quad (9.12)$$

#### Stupeň černosti povrchu stěn

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

#### Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-2,27 \cdot 0,1 \cdot 3,0} = 0,494 \quad (9.13)$$

#### Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (9.14)$$

$$k = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot 3,0}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1064,115}{1000} \right) \cdot 0,3337 = 2,27 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (9.15)$$

#### Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,3337 = 0,03337 \text{ Mpa} \quad (9.16)$$

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro volný objem**

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{a \cdot b_{\Pi} \cdot c_{\Pi}}{a \cdot b_{\Pi} + 2 \cdot b_{\Pi} \cdot h + a \cdot h + (a \cdot (h - c))} \quad (9.17)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{4,5 \cdot 2,7 \cdot 10,5}{4,5 \cdot 2,61 + 2 \cdot 2,61 \cdot 10,5 + 4,5 \cdot 10,5 + (4,5 \cdot (10,5 - 3))} = 3,00 \text{ m}$$

**9.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (9,081 + 67,60) = 69,02 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.18)$$

$\xi$  součinitel využití, popisuje neúplnost proudění spalin výhřevnou plochou

**9.2 Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_c} = \frac{69,02}{1 + 0,003 \cdot 69,02} = 57,18 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.19)$$

**Teplo odebrané spalinám ve II. tahu**

$$Q = k \cdot F_{\dot{u}s} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 57,044 \cdot 116,19 \cdot 497,88 = 3307,9 \text{ kW} \quad (9.20)$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{541,1 - 457,03}{\ln \frac{541,1}{457,03}} = 497,88^\circ\text{C} \quad (9.21)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{syt} = 833 - 291,9 = 541,1^\circ\text{C} \quad (9.22)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{syt} = 748,3 - 291,9 = 457,03^\circ\text{C} \quad (9.23)$$

**9.3 Výsledná teplota spalin na výstupu z II. tahu****Teplo spalin na vstupu do II. tahu**

$$Q_{sp1} = O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot I_{sp1} = 4,3447 \cdot 5,4 \cdot 1277,91 = 29981,19 \text{ kW} \quad (9.24)$$

**Teplo spalin na výstupu z II. tahu**

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q = 29981,19 - 3307,9 = 26673,28 \text{ kW} \quad (9.25)$$

**Entalpie na výstupu z II. tahu**

$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{M_{pv} \cdot O_{sp}} = \frac{26673,28}{5,4 \cdot 4,3447} = 1136,915 \text{ kJ/m}^3 \quad (9.26)$$

$$I_{sp700} = 1055,543 \text{ kJ/m}^3$$

$$I_{sp800} = 1221,849 \text{ kJ/m}^3$$

$$\Delta t_{sp} = 100^\circ\text{C}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp800} - I_{sp700} = 121,849 - 1055,543 = 166,3062 \text{ kJ/m}^3 \quad (9.27)$$

$$\Delta I_{spc} = I_{sp2} - I_{sp700} = 1136,915 - 1055,543 = 81,37 \text{ kJ/m}^3 \quad (9.28)$$

$$t_{sp2} = \frac{\Delta t_{sp}}{\Delta I_{sp}} \cdot \Delta I_{spc} = \frac{100}{166,3062} \cdot 81,37 + 700 = 748,928^\circ\text{C} \quad (9.29)$$

Výsledná teplota spalin na konci II. tahu  $t_{sp2} = 748,928^\circ\text{C}$  se jen nepatrně liší od odhadované  $t_{sp2} = 748,93^\circ\text{C}$ , což je přijatelná odchylka.

**10 Výpočet III. tahu**

Ve III. tahu se nachází přehříváky, závěsné trubky a membránová stěna, která je částí výparníku. Výpočet hloubky III. tahu je založen na předběžném odhadu, výpočtu teploty na konci přehříváku 2 a 3. Následně ze střední teploty spočítám předběžnou hloubku III. tahu, přitom uvažuji rychlost spalin 6 m/s.

**10.1 Výpočet hloubky III tahu****Entalpie spalin za přehřívákem III**

$$I_{spPIIIout} = \frac{Q_{sp2vys} - Q_{PIII}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{25514,5 - 4416,66}{4,3447 \cdot 5,4} = 899,27 \text{ kJ/m}^3 \quad (10.1)$$

$$\Rightarrow \text{teplota spalin } t_{spPIIIout} = 604,3^\circ\text{C}$$

**Entalpie spalin za přehřívákem II**

$$I_{spPIIout} = \frac{Q_{sp2vy} - Q_{PIII} - Q_{PII}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{25514,5 - 4416,66 - 4631,75}{4,3447 \cdot 5,4} = 701,85 \text{ kJ/m}^3 \quad (10.2)$$

$$\Rightarrow \text{teplota spalin } t_{spPIIout} = 479^\circ\text{C}$$

**Střední teplota spalin v přehříváku II**

$$t_{stř} = \frac{t_{spPII} + t_{spPIIout}}{2} = \frac{604,3 + 479}{2} = 541,65^\circ\text{C} \quad (10.3)$$

**Světlý průřez spalín**

$$F_{Sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{w_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = \frac{4,3447 \cdot 5,4}{6} \cdot \frac{273,15 + 541,65}{273,15} = 11,67 \text{ m}^2 \quad (10.4)$$

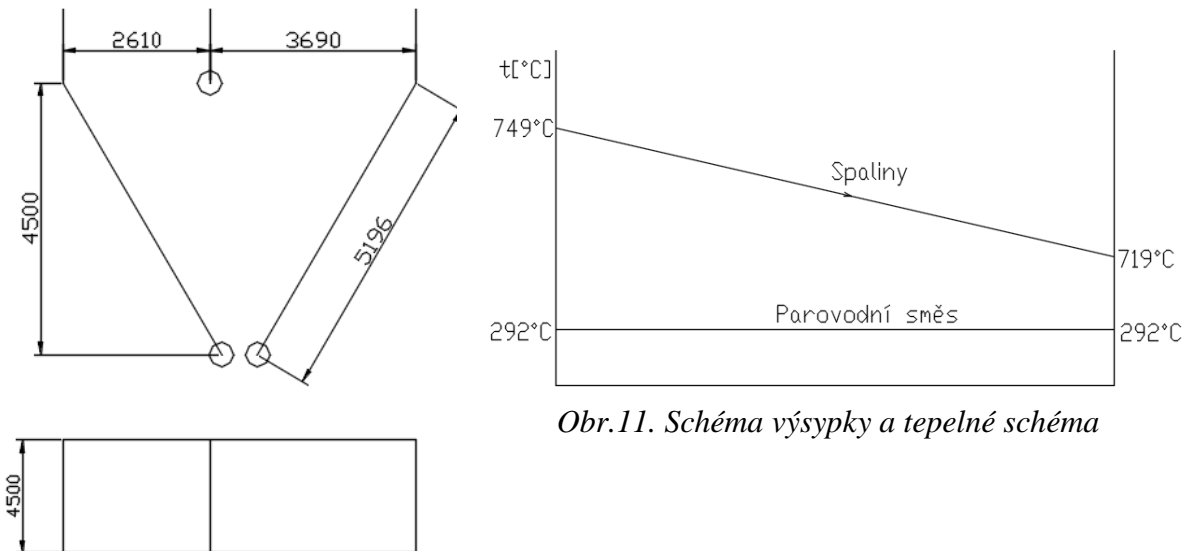
**Hloubka III. tahu**

$$b_{III} = \frac{F_{Sp}}{\left(a - n_{tr} \cdot D - n_{zt} \cdot \pi \cdot \frac{D_{zt}^2}{4}\right)} = \frac{11,67}{\left(4,5 - 23 \cdot 0,038 - 45 \cdot \pi \cdot \frac{0,038^2}{4}\right)} = 3,27 \text{ m} \quad (10.5)$$

⇒ Volím hloubku III. tahu  $b_{III} = 3,69 \text{ m}$

**11 Výpočet výsyvky mezi II. a III. tahem**

Výsyvka je tvořena membránovými stěnami, která je částí výparníku. Před výpočtem je potřeba určit hloubku III. tahu, ta je spočítána v kapitole 10.



Obr. 11. Schéma výsyvky a tepelné schéma

**Teplota a entalpie spalín na vstupu**

$$t_{sp1} = 748,93^\circ\text{C}$$

$$I_{sp1} = 1136,917 \text{ kJ/kg}$$

**Teplota spalín na výstupu**

$$t_{sp2} = 718,9^\circ\text{C}$$

**Střední teplota spalín**

$$t_{stř} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{748,93 + 718,9}{2} = 733,915^\circ\text{C}$$

**Kontrola rychlosti spalín v nejužším místě výsyvky**

$$w_{sp}^x = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{x \cdot a} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = \frac{4,3447 \cdot 5,4}{2,26 \cdot 4,5} \cdot \frac{273,15 + 733,915}{273,15} = 8,51 \text{ m/s} \quad (11.1)$$

**Rozměry výsypky**

Šířka kotle:	$a=4,5m$
Hloubka II. tahu:	$b_{II} = 2,61m$
Hloubka III. tahu:	$b_{III} = 3,69m$
Průměr hloubek:	$b_{stř} = 3,15m$
Výška výsypky	$h_{vys} = 4,5m$
Čela výsypky	$y = 5,196m$
Rozměr nejužšího místa	$x = 2,26m$

**Plošný průřez spalin**

$$S = a \cdot b_{stř} = 4,5 \cdot 3,15 = 14,175 m^2 \quad (11.2)$$

**11.1 Součinitel přestupu tepla pro membránové stěny****11.1.1 Konvekci pro podélné proudění**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (11.3)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,08797}{3,00} \cdot \left( \frac{6,065 \cdot 3,00}{0,000120} \right)^{0,8} \cdot 0,6166^{0,4} = 10,15 W/m^2K$$

**Ekvivalentní průměr spalin**

$$d_e = \frac{4 \cdot S}{O} = \frac{4 \cdot 10,17}{13,52} = 3,00 m \quad (11.4)$$

**Střední obvod kanálu pro II. a III. tah**

$$O_{stř} = 2 \cdot (a + b_{stř}) = 2 \cdot (4,5 + 3,15) = 13,52m \quad (11.5)$$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin [1]**

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda=0,08797 W/mk$
Kinematická viskozita	$\nu=0,000120 m^2/s$
Prandtlovo číslo	$Pr=0,6166$

**11.1.2 Sáláním pro zaprášené spaliny**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \left( \frac{T_z}{T} \right)} \quad (11.6)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,428 \cdot 1007,065^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{614,87}{1007,065} \right)^4}{1 - \left( \frac{614,87}{1007,065} \right)} = 49,63 W/m^2K$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273,15 + (t_{syt} + \varepsilon \cdot q) = 273,15 + (291,9 + 0,003 \cdot 16606,44) = 614,87K \quad (11.7)$$

$\varepsilon$  součinitel zanesení výhřevné plochy, voleno dle konzultací

**Měrné zatížení výsyvky**

$$q = \frac{Q_{12}}{F_{\text{ús}}} \cdot 10^3 = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot \Delta I_{sp}}{(F_{st} - a \cdot b_{\text{III}} - a \cdot b_{\text{II}}) \cdot x_{st}} \cdot 10^3 \quad (11.8)$$

$$q = \frac{4,3447 \cdot 5,4 \cdot 50,51}{(103,464 - 4,5 \cdot 3,69 - 4,5 \cdot 2,61) \cdot 0,95} \cdot 10^3 = 16606,44 \text{ kW}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp1} - I_{sp2} = 1136,917 - 1086,407 = 50,51 \text{ kJ/m}^3 \quad (11.9)$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = a = 1 - e^{-2,528 \cdot 0,1 \cdot 2,22} = 0,428 \quad (11.10)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (11.11)$$

$$k = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,3337 \cdot 2,22}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1007,065}{1000} \right) \cdot 0,3337 = 2,528 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,3337 = 0,03337 \text{ MPa} \quad (11.12)$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{\frac{(b_{\text{II}} + b_{\text{III}}) \cdot c_{vys}}{2} \cdot a}{(b_{\text{II}} + b_{\text{III}}) \cdot a + 2 \cdot y \cdot a + 2 \cdot \frac{(b_{\text{II}} + b_{\text{III}}) \cdot c_{vys}}{2}} \quad (11.13)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{\frac{(2,61 + 3,69) \cdot 4,5}{2} \cdot 4,5}{(2,61 + 3,69) \cdot 4,5 + 2 \cdot 5,196 \cdot 4,5 + 2 \cdot \frac{(2,61 + 3,69) \cdot 5}{2}} = 2,22 \text{ m}$$



### 11.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,7 \cdot (10,15 + 49,63) = 41,845 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (11.14)$$

$\xi$  součinitel využití, popisuje neúplnost proudění spalin výhřevnou plochou

### 11.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_c} = \frac{41,845}{1 + 0,003 \cdot 41,845} = 37,178 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (11.15)$$

#### Teplo odebrané spalinám mříži

$$Q = k \cdot F_{\text{úš}} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 37,178 \cdot 71,3583 \cdot 441,84 = 1172,20 \text{ kW} \quad (11.16)$$

#### Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{457,03 - 427}{\ln \frac{457,03}{427}} = 441,84^\circ\text{C} \quad (11.17)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{syt} = 748,93 - 291,9 = 457,03^\circ\text{C} \quad (11.18)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{syt} = 718,9 - 291,9 = 427^\circ\text{C} \quad (11.19)$$

### 11.3 Výsledná teplota spalin na výstupu z výsyvky

#### Teplo spalin na vstupu do II. tahu

$$Q_{sp1} = O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot I_{sp1} = 4,3447 \cdot 5,4 \cdot 1136,917 = 26673,33 \text{ kW} \quad (11.20)$$

#### Teplo spalin na výstupu z II. tahu

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q = 26673,3 - 1172,20 = 25501,12 \text{ kW} \quad (11.21)$$

#### Entalpie na výstupu z II. tahu

$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{M_{pv} \cdot O_{sp}} = \frac{25501,12}{5,4 \cdot 4,3447} = 1086,953 \text{ kJ/m}^3 \quad (11.22)$$

$$I_{sp700} = 1055,543 \text{ kJ/m}^3$$

$$I_{sp800} = 1221,849 \text{ kJ/m}^3$$

$$\Delta t_{sp} = 100^\circ\text{C}$$

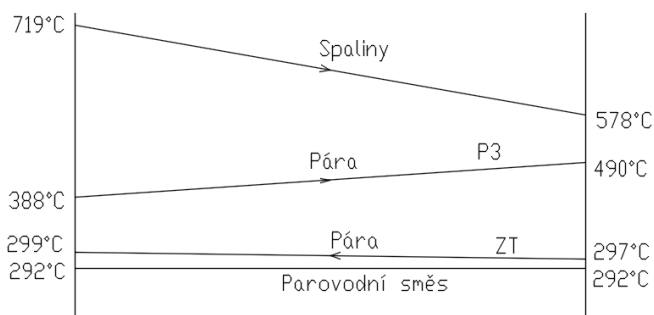
$$\Delta I_{sp} = I_{sp800} - I_{sp700} = 1221,849 - 1055,543 = 166,306 \text{ kJ/m}^3 \quad (11.23)$$

$$\Delta I_{spc} = I_{sp2} - I_{sp700} = 1086,953 - 1055,543 = 31,41 \text{ kJ/m}^3 \quad (11.24)$$

$$t_{sp2} = \frac{\Delta t_{sp}}{\Delta I_{sp}} \cdot \Delta I_{spc} = \frac{100}{166,306} \cdot 31,41 = 718,88^\circ\text{C} \quad (11.25)$$

Výsledná teplota spalin na konci výsyvky  $t_{sp2} = 718,88^\circ\text{C}$  se jen nepatrně liší od odhadované teploty  $t_{sp2} = 718,9^\circ\text{C}$ , což je přijatelná odchylka.

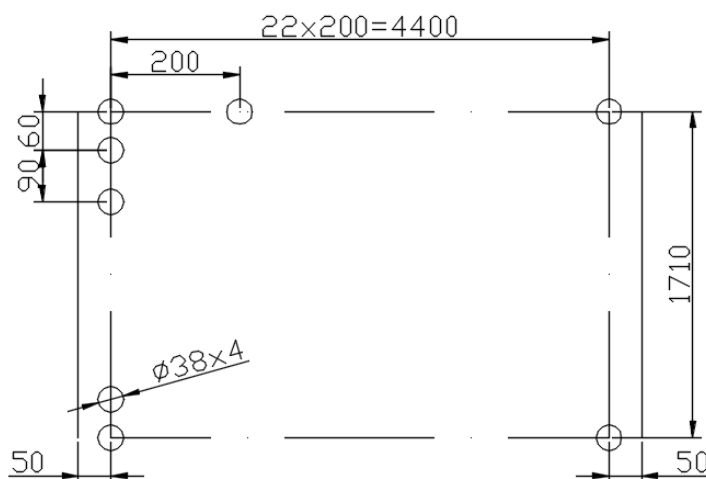
## 12 Výpočet III. tahu - 1. část



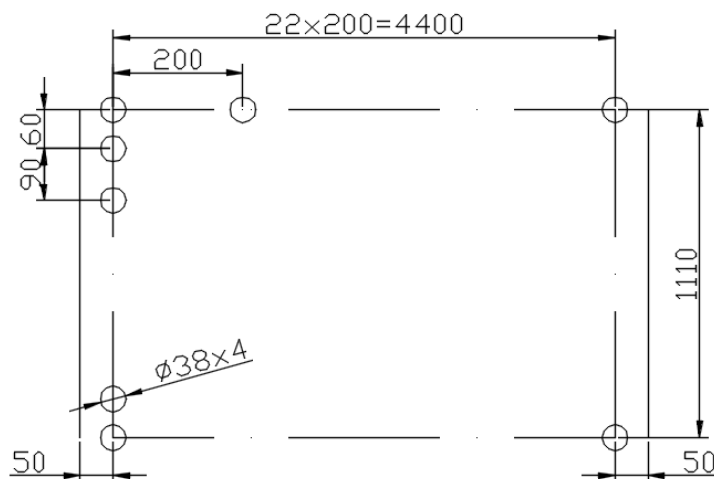
Obr. 12. Tepelné schéma III. tahu- 1. část

### 12.1 Přehřívák 3

Přehřívák 3 je navrhnut jako trubkový svazek, složen z jednotlivých trubek. Tato teplosměnná plocha je tvořena hladkými trubkami o vnějším průměru 38 mm a tloušťce stěny 4 mm tzv. dvojhadem. V jedné řadě je 46 trubek (23x2), počet řad je 20. Přehřívák 3 je rozdělen na dvě části mezi, nimiž je jeden kontrolní vlez.



Obr. 12.2 První část přehříváku 3



Obr. 12.2 Druhá část přehříváku 3

**Rozměry III. tahu**

šířka III. tahu	$a = 4,5m$
hloubka III. tahu	$b_{III} = 3,69 m$
výška III. tahu	$h = 10,5 m$

**Hodnoty trubek**

vnější průměr	$D = 0,038m$
tloušťka stěny	$t = 0,004m$
vnitřní průměr	$d = 0,030m$
příčná rozteč	$s_1 = 0,2m$
podélná rozteč	$s_2 = 0,09 (0,06) m$
počet trubek v jedné řadě	$n_{tr}=23$
počet řad	$n_{řad} = 20$
počet hadů	$n_h = 2$
počet závěsných trubek	$n_{zt} = 46$

**Hodnoty páry**

teplota páry na vstupu	$t_1 = 387,84^\circ C$
teplota páry na výstupu	$t_2 = 490^\circ C$
střední teplota páry	$t_{12} = 438,92^\circ C$
tlak páry na vstupu	$p_1 = 7,2 MPa$
tlak páry na výstupu	$p_2 = 7 MPa$
střední tlak páry	$p_{12} = 7,1 MPa$
měrný objem na vstupu	$v_1 = 0,03764 m^3/kg$
měrný objem na výstupu	$v_2 = 0,04738 m^3/kg$
střední měrný objem	$v_{12} = 0,04251 m^3/kg$
průtočné množství páry	$M_{pp} = 16,666$

**Hodnoty spalin**

teplota spalin na vstupu	$t_{sp1} = 718,88^\circ C$
teplota spalin na výstupu	$t_{sp2} = 578^\circ C$
entalpie spalin na vstupu	$I_{sp1} = 1086,95 kJ/m^3$
entalpie spalin na výstupu	$I_{sp2} = 857,55 kJ/m^3$

**Střední teplota spalin**

$$t_{str}^{sp} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{718,88 + 578}{2} = 648,44^\circ C \quad (12.1)$$

**Předpokládaná plocha svazku**

$$S = \pi \cdot D \cdot b_{III} \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_h = \pi \cdot 0,038 \cdot 3,69 \cdot 23 \cdot 20 \cdot 2 = 405,07 m^2 \quad (12.2)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry**

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0,023 \cdot \frac{0,06589}{0,03} \cdot \left( \frac{21,8 \cdot 0,03}{1,11 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,0078^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 2093,52 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (12.3)$$

**Průtočný průřez pro páru**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_h = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 21 \cdot 2 = 0,0297 \text{ m}^2 \quad (12.4)$$

**Rychlost proudění páry v trubkách**

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{F_p} = \frac{16,666 \cdot 0,0425}{0,0297} = 21,80 \text{ m/s} \quad (12.5)$$

**Vlastnosti páry pro střední teplotu páry [3]**

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,06589 \text{ W/mK}$
Kinematická viskozita	$\nu = 1,11 \cdot 10^{-6}$
Prandtlovo číslo	$Pr = 1,0078$

**12.1.1 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin**

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin pro příčné obtékání trubek uspořádaných za sebou

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (12.6)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,08023}{0,038} \cdot \left( \frac{5,916 \cdot 0,038}{0,0001035} \right)^{0,65} \cdot 0,625^{0,33} = 53,34 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = \frac{4,3447 \cdot 5,4}{13,38} \cdot \frac{273,15 + 648,44}{273,15} = 5,916 \text{ m/s} \quad (12.7)$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = b_{III} \cdot (a - n_{tr} \cdot D) = 3,69 \cdot (4,5 - 23 \cdot 0,038) = 13,38 \text{ m}^2 \quad (12.8)$$

**Oprava na uspořádání svazku  $c_s$** 

V závislosti na poměrné příčné rozteči  $\sigma_1$  a poměrné podélné rozteči  $\sigma_2$

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,2}{0,038} = 5,26 \quad (12.9)$$

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,37$$

Pokud je  $\sigma_2 \geq 2$ , potom  $c_s = 1$

### Oprava na počet podélných řad $c_z$

Pokud je počet řad  $\geq 10$ , potom  $c_z = 1$

### Vlastnosti spalín pro střední teplotu spalín [1]

Součinitel tepelné vodivosti

$$\lambda = 0,08023 \text{ W/mK}$$

Kinematická viskozita

$$\nu = 0,0001035 \text{ m}^2/\text{s}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 0,625$$

### 12.1.2 Součinitel pro přestup tepla sáláním pro zaprášené spaliny

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)} \quad (12.10)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,315 \cdot 921,59^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{782,7}{921,59}\right)^4}{1 - \left(\frac{782,7}{921,59}\right)} = 40,36 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn

$$T_z = 273,15 + t_{12} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \frac{Q_{p3}}{S} \cdot 10^3 \quad (12.11)$$

$$T_z = 273,15 + 447,18 + \left(0,006 + \frac{1}{2093,52}\right) \cdot \frac{4416,66}{405,067} \cdot 10^3 = 782,7^\circ\text{C}$$

### Potřebné teplo pro přehřívák 3

$$Q_{p3} = M_{pp} \cdot \Delta i_{p3} = 16,666 \cdot 265 = 4416,66 \text{ kW} \quad (12.12)$$

### Stupeň černosti povrchu stěn

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

### Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-4,37 \cdot 0,1 \cdot 0,87} = 0,315 \quad (12.13)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (12.14)$$

$$k = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot 0,87}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{921,59}{1000} \right) \cdot 0,3337 = 4,37 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,3337 = 0,03337 \text{ MPa} \quad (12.15)$$

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro volný objem**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,2 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,87 \text{ m} \quad (12.16)$$

**12.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_s = 53,34 + 40,36 = 93,706 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (12.17)$$

**12.1.4 Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_c}{1 + \frac{\alpha_c}{\alpha_2}} = \frac{0,65 \cdot 93,706}{1 + \frac{93,706}{2093,52}} = 58,3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (12.18)$$

**Potřebná (ideální) plocha pro přehřívák 3**

$$S_{id} = \frac{Q_{p2}}{k \cdot \Delta t} \cdot 10^3 = \frac{4416,667}{58,3 \cdot 183,44} = 412,98 \text{ m}^2 \quad (12.19)$$

Výrobní výhřevná plocha přehříváku  $S = 405,07 \text{ m}^2$  se liší od potřebné ideální plochy  $S_{id} = 412,98 \text{ m}^2$  o 1,95% což je v rozmezí tolerance, protože dovolená odchylka je až 5%.

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{331,05 - 88}{\ln \frac{331,05}{88}} = 183,44^\circ\text{C} \quad (12.20)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_2 = 718,88 - 387,84 = 331,05^\circ\text{C} \quad (12.21)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_1 = 578 - 490 = 88^\circ\text{C} \quad (12.22)$$

**Skutečně odebrané teplo přehřívákem 3**

$$Q_{skp2} = k \cdot S \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 58,3 \cdot 405,067 \cdot 183,44 = 4332,04 \text{ kW} \quad (12.23)$$

**Výška prostoru přehříváku 3**

Do výšky je započten kontrolní vlez , který rozděluje přehřívák 3 na dvě části,.

$$h_{p3} = (n_{\text{rad}} \cdot s_2) + (n_{\text{rad}} - 1) \cdot s_2 + 0,8 \quad (12.24)$$

$$h_{p3} = (20 \cdot 0,06) + (20 - 1) \cdot 0,09 + 0,8 = 3,71 \text{ m}$$

**Rozměr vstupní a výstupní komory**

$$S_{\text{kom}} = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{w_p} = \frac{16,666 \cdot 0,04251}{21,80} = 0,0324 \text{ m} \quad (12.25)$$

**Průměr komor**

$$D_{\text{kom}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{kom}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0324}{\pi}} = 0,203 \text{ m} \quad (12.26)$$

Volím trubku Tr 219x6,3 ČSN 42 5715

**12.2 Výpočet membránových stěn**

Součinitele přestupu tepla ze strany spalin

**12.2.1 Konvekcí pro podélné proudění**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (12.27)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,08023}{0,497} \cdot \left( \frac{5,916 \cdot 0,546}{0,0001035} \right)^{0,8} \cdot 0,62513^{0,4} = 11,24 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Ekvivaletní průměr spalin**

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 13,38}{107,612} = 0,497 \text{ m} \quad (12.28)$$

**Obvod kanálu**

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) + n_{tr} \cdot (b_{III} + D) + n_{zt} \cdot \pi \cdot D \quad (12.29)$$

$$O = 2 \cdot (4,5 + 3,69) + 23 \cdot (3,69 + 0,038) + 46 \cdot \pi \cdot 0,038 = 107,61 \text{ m}$$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin [1]**

Součinitel tepelné vodivosti

$$\lambda = 0,08023 \text{ W/mK}$$

Kinematická viskozita

$$\nu = 0,0001035 \text{ m}^2/\text{s}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 0,62513$$

### 12.2.2 Sáláním pro zaprášené spaliny

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)} \quad (12.30)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,21 \cdot 921,59^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{921,59}{875,03}\right)^4}{1 - \left(\frac{921,59}{875,03}\right)} = 31,33 \text{ W/m}^2\text{K}$$

#### Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn

$$T_z = 273,15 + (t_{\text{syt}} + \varepsilon \cdot q) = 273,15 + (291,9 + 0,0035 \cdot 88564,77) = 875,027 \text{ K} \quad (12.31)$$

#### Měrné zatížení

Určí se z běžného tepla, které odevzdávají spaliny a z účinné sálavé plochy stěn.

$$q = \frac{Q_{12}}{F_{\text{ús}}} \cdot 10^3 = \frac{Q_{\text{sp}} \cdot M_{\text{pv}} \cdot \Delta I_{\text{sp}}}{2 \cdot h_{\text{p2}} \cdot (a + b_{\text{III}})} \cdot 10^3 \quad (12.32)$$

$$q = \frac{4,3447 \cdot 5,4 \cdot 229,40}{2 \cdot 3,71 \cdot (4,5 + 3,69)} \cdot 10^3 = 88564,77 \text{ kW}$$

$$\Delta I_{\text{sp}} = I_{\text{sp1}} - I_{\text{sp2}} = 1086,95 - 857,55 = 229,40 \text{ kJ/m}^3 \quad (12.33)$$

#### Stupeň černosti povrchu stěn

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

#### Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-7,3 \cdot 0,1 \cdot 0,324} = 0,210 \quad (12.34)$$

#### Součinitel zeslabení sálání nesevítivými tříatomovými plyny

$$k = k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{\text{sp}} \quad (12.35)$$

$$k = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot 0,324}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{921,59}{1000} \right) \cdot 0,3337 = 7,30 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

#### Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{\text{sp}} = p \cdot r_{\text{sp}} = 0,1 \cdot 0,3337 = 0,03337 \text{ MPa} \quad (12.36)$$



**Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro volný objem**

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{b_{III}} + \frac{1}{h_{p2}} + \frac{1}{s_1}} = \frac{1,8}{\frac{1}{3,69} + \frac{1}{3,71} + \frac{1}{0,2}} = 0,324 \text{ m} \quad (12.37)$$

**12.2.3 Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (11,24 + 31,33) = 38,306 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (12.38)$$

**12.2.4 Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_c} = \frac{38,306}{1 + 0,0035 \cdot 38,306} = 33,78 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (12.39)$$

**Teplota odebrané spalinám membránovými stěnami**

$$Q_{ms} = k \cdot F_{\dot{u}s} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 33,78 \cdot 60,77 \cdot 351,85 \cdot 10^{-3} = 722,25 \text{ kW} \quad (12.40)$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{420,5 - 297,8}{\ln \frac{420,5}{297,8}} = 351,85 \text{ }^\circ\text{C} \quad (12.41)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{syt} = 718,88 - 291,9 = 426,99^\circ\text{C} \quad (12.42)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{syt} = 578 - 291,9 = 286,1 \text{ }^\circ\text{C} \quad (12.43)$$

**12.3 Výpočet závěsných trubek**

vnější průměr trubky

$$D_{zt} = 0,038 \text{ m}$$

tloušťka stěny

$$t_{zt} = 0,0063 \text{ m}$$

vnitřní průměr trubky

$$d_{zt} = 0,0254 \text{ m}$$

počet trubek

$$n_{zt} = 46$$

teplota páry na vstupu

$$t_{zt1} = 299,1^\circ\text{C}$$

teplota páry na výstupu

$$t_{zt2} = 297 \text{ }^\circ\text{C}$$

střední teplota páry

$$t_{ztstř} = 298,05^\circ\text{C}$$

měrný objem na vstupu

$$v_{zt1} = 0,0261 \text{ m}^3/\text{kg}$$

měrný objem na výstupu

$$v_{zt2} = 0,0258 \text{ m}^3/\text{kg}$$

střední měrný objem

$$v_{stř} = 0,02595 \text{ m}^3/\text{kg}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_{zt}} \cdot \left( \frac{w_{zt} \cdot d_{zt}}{v} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (12.44)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0651}{0,0254} \cdot \left( \frac{18,91 \cdot 0,0254}{5,07 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,4965^{0,4} = 4181,325 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{zt} = \frac{\pi \cdot 0,0254^2}{4} \cdot 46 = 0,023 \text{ m}^2 \quad (12.45)$$

### Rychlost proudění páry v trubkách

$$w_{zt} = \frac{M_{pp}^{zt} \cdot v_{ztstř}}{F_p} = \frac{15,466 \cdot 0,0258}{0,023} = 17,23 \text{ m/s} \quad (12.46)$$

### Vlastnosti páry pro střední teplotu páry[3]

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,0651 \text{ W/mk}$
Kinematická viskozita	$\nu = 5,07 \cdot 10^{-7}$
Prandtlovo číslo	$Pr = 1,4965$

### Součinitele přestupu tepla ze strany spalín

#### 12.3.1 Konvekcí pro podélné proudění

Pro výpočet závěsných trubek se součinitel přestupu tepla konvekcí uvažuje stejný jako u svazku, který je zavěšen na závěsných trubkách.

$$\alpha_{zt} = 53,34 \text{ W/m}^2\text{K}$$

#### 12.3.2 Sáláním pro zaprášené spaliny

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)} \quad (12.47)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,329 \cdot 921,59^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{597,29}{921,59}\right)^4}{1 - \left(\frac{597,29}{921,59}\right)} = 30,89 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn

$$T_z = 273,15 + t_{12} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{zt}}{S} \cdot 10^3 \quad (12.48)$$

$$T_z = 273,15 + 298,05 + \left( 0,003 + \frac{1}{3881,14} \right) \cdot \frac{163,01}{20,36} \cdot 10^3 = 597,29 \text{ K}$$

### Potřebné teplo pro závěsné trubky

$$Q_{zt} = M_{pzt} \cdot (I_{zt1} - I_{zt2}) = 15,466 \cdot (2804,615 - 2749,07) = 163,096 \text{ kW} \quad (12.49)$$

**Teplosměnná plocha závěsných trubek**

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot n_{zt} \cdot h_{p2} = \pi \cdot 0,038 \cdot 46 \cdot 3,71 = 20,36 \text{ m}^2 \quad (12.50)$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-4,59 \cdot 0,1 \cdot 0,87} = 0,3283 \quad (12.51)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítlivými tříatomovými plyny**

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (12.52)$$

$$k = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot 0,87}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{921,59}{1000} \right) \cdot 0,3337 = 4,59 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,3337 = 0,03337 \text{ MPa} \quad (12.53)$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem**

$$S_{zt} = 0,9 \cdot D_{zt} \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D_{zt}^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,2 \cdot 0,15}{0,038^2} - 1 \right) = 0,87 \text{ m} \quad (12.54)$$

**12.3.3 Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (53,34 + 30,89) = 75,81 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (12.55)$$

**12.3.4 Součinitel prostupu tepla**

$$k = \Psi \cdot \alpha_c = 0,6 \cdot 75,81 = 45,49 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (12.56)$$

**Teplo odebrané spalinám závěsnými trubkami**

$$Q_{zt} = k \cdot S_{zt} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 45,49 \cdot 0,87 \cdot 345,76 \cdot 10^{-3} = 320,27 \text{ kW} \quad (12.57)$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{419,79 - 281}{\ln \frac{419,79}{281}} = 345,76^\circ\text{C} \quad (12.58)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{zt2} = 718,88 - 299,1 = 419,79^\circ\text{C} \quad (12.59)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{zt1} = 578 - 297 = 281^\circ\text{C} \quad (12.60)$$

## 12.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z 1. Části III. Tahu

### Teplo spalin na výstupu

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q_{skp3} - Q_{ms} - Q_{zt} = 25501,12 - 4332,04 - 722,25 - 320,27 = 20126,56 \text{ kW} \quad (12.61)$$

Teplo vstupních spalin  $Q_{sp1}$  je rovno teplu výstupních spalin z 1. části III. Tahu.

$$Q_{sp1} = I_{sp1} \cdot O_{sp} \cdot M_{pv} = 1086,95 \cdot 4,3447 \cdot 5,4 = 25501,12 \text{ kW} \quad (12.62)$$

### Entalpie a skutečná teplota výstupních spalin

$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{20126,56}{4,3447 \cdot 5,4} = 857,87 \text{ kJ/m}^3 \quad (12.63)$$

$$I_{sp600} = 892,24 \text{ kJ/m}^3$$

$$I_{sp500} = 734,55 \text{ kJ/m}^3$$

$$\Delta t_{sp} = 100^\circ\text{C}$$

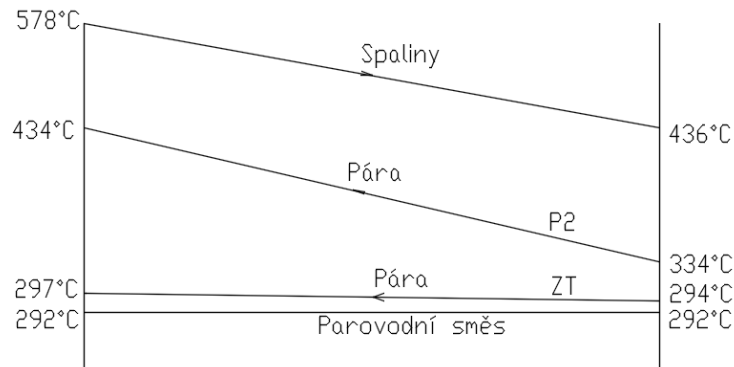
$$\Delta I_{sp} = I_{sp600} - I_{sp500} = 892,24 - 734,55 = 157,6872 \text{ kJ/m}^3 \quad (12.64)$$

$$\Delta I_{spc} = I_{sp2} - I_{sp500} = 857,87 - 734,55 = 123,31 \text{ kJ/m}^3 \quad (12.65)$$

$$t_{sp2} = \frac{\Delta t_{sp}}{\Delta I_{sp}} \cdot \Delta I_{spc} + 500 = \frac{100}{157,6872} \cdot 123,31 + 500 = 578,20^\circ\text{C} \quad (12.66)$$

Výsledná teplota spalin na konci přehříváku 3  $t_{sp2} = 578,20^\circ\text{C}$  se jen nepatrně liší od odhadované teploty  $t_{sp2} = 578^\circ\text{C}$ , což je přijatelná odchylka.

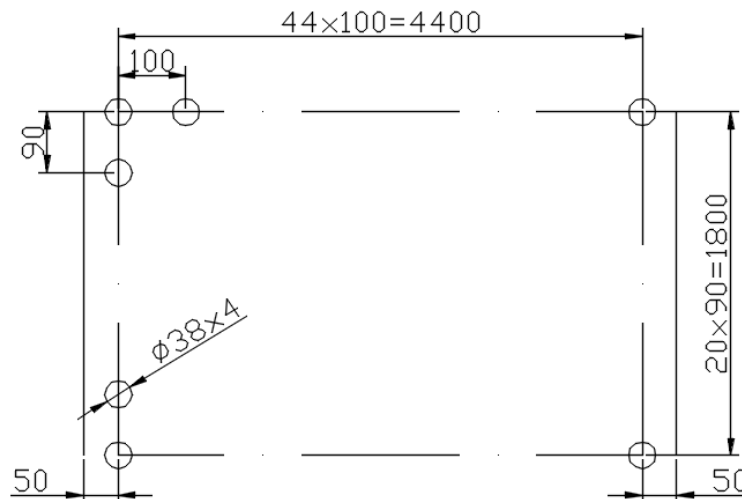
## 13 Výpočet III. tahu - 2. část



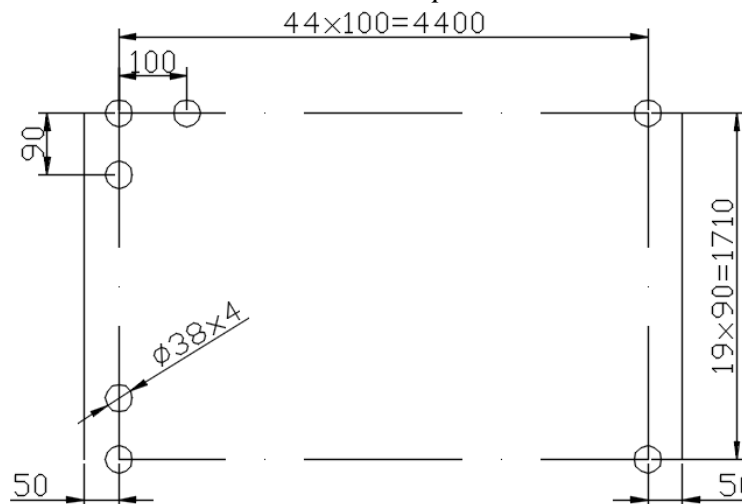
Obr. 13. Teplotní schéma III. tahu-2. část

### 13.1 Přehřívák II

Přehřívák 2 je navrhnout jako trubkový svazek, složený z jednotlivých trubek. Tato teplosměnná plocha je tvořena hladkými trubkami o vnějším průměru 38 mm a tloušťce stěny 4 mm tzv. jednohadem. V jedné řadě je 45 trubek, počet řad je 41. Přehřívák 2 je rozdělen na dvě části mezi nimiž je jeden kontrolní vlez a jeden vlez mezi přehřívákem 2 a přehřívákem 3.



Obr. 13.1 První část přehříváku 2



Obr. 13.2 Druhá část přehříváku 2

**Rozměry III. tahu**

šířka III. tahu	$a = 4,5m$
hloubka III. tahu	$b_{III} = 3,69m$
výška III. tahu	$h = 10,5m$

**Hodnoty trubek**

vnější průměr	$D = 0,038m$
tloušťka stěny	$t = 0,004m$
vnitřní průměr	$d = 0,030m$
příčná rozteč	$s_1 = 0,1m$
podelná rozteč	$s_2 = 0,09 m$
počet trubek v jedné řadě	$n_{tr}=45$
počet řad	$n_{řad} = 41$
počet hadů	$n_h = 1$
počet závěsných trubek	$n_{zt} = 45$

**Hodnoty páry**

teplota páry na vstupu	$t_1 = 334^{\circ}C$
teplota páry na výstupu	$t_2 = 433,8^{\circ}C$
střední teplota páry	$t_{12} = 383,9^{\circ}C$
tlak páry na vstupu	$p_1 = 7,4 MPa$
tlak páry na výstupu	$p_2 = 7,2 MPa$
střední tlak páry	$p_{12} = 7,3 MPa$
měrný objem na vstupu	$v_1 = 0,03134 m^3/kg$
měrný objem na výstupu	$v_2 = 0,04157 m^3/kg$
střední měrný objem	$v_{12} = 0,03646 m^3/kg$
průtočné množství páry	$M_{pp} = 15,916$

**Hodnoty spalin**

teplota spalin na vstupu	$t_{sp1} = 578^{\circ}C$
teplota spalin na výstupu	$t_{sp2} = 435,5^{\circ}C$
entalpie spalin na vstupu	$I_{sp1} = 857,55 kJ/m^3$
entalpie spalin na výstupu	$I_{sp2} = 634,18 kJ/m^3$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{578 + 435,5}{2} = 506,75^{\circ}C \quad (13.1)$$

**Předpokládaná plocha svazku**

$$S = \pi \cdot D \cdot b_{III} \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_h = \pi \cdot 0,038 \cdot 3,69 \cdot 45 \cdot 41 \cdot 1 = 812,34 m^2 \quad (13.2)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry**

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0,023 \cdot \frac{0,06144}{0,03} \cdot \left( \frac{18,25 \cdot 0,03}{8,63 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,0834^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 2132,72 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (13.3)$$

**Průtočný průřez pro páru**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_h = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 42 \cdot 1 = 0,0297 \text{ m}^2 \quad (13.4)$$

**Rychlost proudění páry v trubkách**

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{F_p} = \frac{15,916 \cdot 0,03646}{0,0297} = 18,25 \text{ m/s} \quad (13.5)$$

**Vlastnosti páry pro střední teplotu páry [3]**

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,06144 \text{ W/mK}$
Kinematická viskozita	$\nu = 8,63 \cdot 10^{-7}$
Prandtlovo číslo	$Pr = 1,0834$

**13.1.1 Součinitele přestupu tepla ze strany spalin**

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin pro příčné obtékání trubek uspořádaných za sebou**

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (13.6)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,06752}{0,038} \cdot \left( \frac{6,51 \cdot 0,038}{7,83 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,6393^{0,33} = 57,70 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = \frac{4,3447 \cdot 5,4}{10,2951} \cdot \frac{273,15 + 506,75}{273,15} = 6,51 \text{ m/s} \quad (13.7)$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = b_{III} \cdot (a - n_{tr} \cdot D) = 3,69 \cdot (4,5 - 45 \cdot 0,038) = 10,2951 \text{ m}^2 \quad (13.8)$$

**Oprava na uspořádání svazku  $c_s$** 

V závislosti na poměrné příčné rozteči  $\sigma_1$  a poměrné podélné rozteči  $\sigma_2$

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,63 \quad (13.9)$$

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,37 \quad (13.10)$$

Pokud je  $\sigma_2 \geq 2$ , potom  $c_s = 1$

### Oprava na počet podélných řad $c_z$

Pokud je počet řad  $\geq 10$ , potom  $c_z = 1$

### Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin [1]

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,06752 \text{ W/mK}$
Kinematická viskozita	$\nu = 7,83 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Prandtlovo číslo	$Pr = 0,6393$

### 13.1.2 Součinitel pro přestup tepla sáláním pro zaprášené spaliny

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)} \quad (13.11)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,198 \cdot 779,9^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{682,53}{779,9}\right)^4}{1 - \left(\frac{682,53}{779,9}\right)} = 15,93 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn

$$T_z = 273,15 + t_{12} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \frac{Q_{p2}}{S} \cdot 10^3 \quad (13.12)$$

$$T_z = 273,15 + 383,9 + \left(0,004 + \frac{1}{2132,72}\right) \cdot \frac{4631,75}{812,34} \cdot 10^3 = 682,53^\circ\text{C}$$

### Potřebné teplo pro přehřívák 2

$$Q_{p2} = M_{pp} \cdot \Delta i_{p3} = 15,916 \cdot 291 = 4631,75 \text{ kW} \quad (13.13)$$

### Stupeň černosti povrchu stěn

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

### Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-9,2 \cdot 0,1 \cdot 0,4} = 0,198 \quad (13.14)$$

### Součinitel zeslabení sálání nsvítivými tříatomovými plyny

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot s}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000}\right) \cdot r_{sp} \quad (13.15)$$



$$k = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot 0,24}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{779,9}{1000} \right) \cdot 0,3337 = 9,2 m^{-1} \cdot MPa^{-1}$$

#### Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,3337 = 0,03337 \text{ MPa} \quad (13.16)$$

#### Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro volný objem

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,24 \text{ m} \quad (13.17)$$

### 13.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_s = 57,70 + 15,93 = 73,62 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (13.18)$$

### 13.1.4 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_c}{1 + \frac{\alpha_c}{\alpha_2}} = \frac{0,65 \cdot 73,62}{1 + \frac{73,62}{2132,72}} = 46,26 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (13.19)$$

#### Potřebná (ideální) plocha pro přehřívák 2

$$S_{id} = \frac{Q_{p2}}{k \cdot \Delta t} \cdot 10^3 = \frac{4631,75}{46,26 \cdot 121,6} = 823,39 m^2 \quad (13.20)$$

Výrobní výhřevná plocha přehříváku  $S = 812,34 m^2$  se liší od potřebné ideální plochy  $S_{id} = 823,39 m^2$  o 1,36% což je v rozmezí tolerance, protože dovolená odchylka je až 5%.

#### Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{144,2 - 101,5}{\ln \frac{144,2}{101,5}} = 121,6^\circ\text{C} \quad (13.21)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_2 = 578 - 433,8 = 144,2^\circ\text{C} \quad (13.22)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_1 = 435,5 - 334 = 101,5^\circ\text{C} \quad (13.23)$$

#### Skutečně odebrané teplo přehřívákem 2

$$Q_{skp2} = k \cdot S \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 46,26 \cdot 812,34 \cdot 121,60 = 4569,55 \text{ kW} \quad (13.24)$$

## Výška prostoru přehříváku 2

Do výšky je započten kontrolní vlez , který rozděluje přehřívák 2 na dvě části.

$$h_{p2} = (n_{rad} \cdot s_2) - s_2 + 0,8 + 0,8 = (41 \cdot 0,09) - 0,09 + 0,8 + 0,8 = 5,2m \quad (13.25)$$

## Rozměr vstupní a výstupní komory

$$S_{kom} = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{w_p} = \frac{15,916 \cdot 0,03646}{18,25} = 0,0318 m^2 \quad (13.26)$$

## Průměr komor

$$D_{kom} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{kom}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0318}{\pi}} = 0,201m \quad (13.27)$$

Volím trubku Tr 219x6,3 ČSN 42 5715

## 13.2 Výpočet membránových stěn

Součinitele přestupu tepla ze strany spalin

### 13.2.1 Konvekcí pro podélné proudění

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (13.28)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,06752}{0,213} \cdot \left( \frac{6,51 \cdot 0,213}{7,83 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,6393^{0,4} = 15,25 W/m^2K$$

## Ekvivaletní průměr spalin

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 10,30}{193,24} = 0,213 m \quad (13.29)$$

## Obvod kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) + n_{tr} \cdot (b_{III} + D) + n_{zt} \cdot \pi \cdot D \quad (13.30)$$

$$O = 2 \cdot (4,5 + 3,69) + 45 \cdot (3,69 + 0,038) + 45 \cdot \pi \cdot 0,038 = 193,24 m$$

## Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin [1]

Součinitel tepelné vodivosti

$$\lambda = 0,06752 W/mK$$

Kinematická viskozita

$$\nu = 7,83 \cdot 10^{-5} m^2/s$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 0,6393$$

### 13.2.2 Sáláním pro zaprášené spaliny

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)} \quad (13.31)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,17 \cdot 779,9^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{780,39}{779,9}\right)^4}{1 - \left(\frac{780,39}{779,9}\right)} = 16,63 \text{ W/m}^2\text{K}$$

#### Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn

$$T_z = 273,15 + (t_{\text{sy}} + \varepsilon \cdot q) = 273,15 + (291,9 + 0,0035 \cdot 61525,24) = 780,39\text{K} \quad (13.32)$$

#### Měrné zatížení

Určí se z běžného tepla, které odevzdávají spaliny a z účinné sálavé plochy stěn.

$$q = \frac{Q_{12}}{F_{\text{ús}}} \cdot 10^3 = \frac{Q_{\text{sp}} \cdot M_{\text{pv}} \cdot \Delta I_{\text{sp}}}{2 \cdot h_{\text{p2}} \cdot (a + b_{\text{III}})} \cdot 10^3 \quad (13.33)$$

$$q = \frac{4,3447 \cdot 5,4 \cdot 223,37}{2 \cdot 5,2 \cdot (4,5 + 3,69)} \cdot 10^3 = 61525,94 \text{ kW}$$

$$\Delta I_{\text{sp}} = I_{\text{sp1}} - I_{\text{sp2}} = 857,55 - 634,18 = 223,37 \text{ kJ/m}^3 \quad (13.34)$$

#### Stupeň černosti povrchu stěn

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

#### Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-10,91 \cdot 0,1 \cdot 0,172} = 0,17 \quad (13.35)$$

#### Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k = k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{\text{sp}} \quad (13.36)$$

$$k = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot 0,172}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{779,9}{1000} \right) \cdot 0,3337 = 10,91 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

#### Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{\text{sp}} = p \cdot r_{\text{sp}} = 0,1 \cdot 0,3337 = 0,03337 \text{ MPa} \quad (13.37)$$

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro volný objem**

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{b_{III}} + \frac{1}{h_{p2}} + \frac{1}{s_1}} = \frac{1,8}{\frac{1}{3,69} + \frac{1}{5,2} + \frac{1}{0,1}} = 0,172 \text{ m} \quad (13.38)$$

**13.2.3 Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (15,25 + 16,63) = 28,70 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (13.39)$$

**13.2.4 Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_c} = \frac{28,70}{1 + 0,0035 \cdot 28,70} = 26,08 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (13.40)$$

**Teplu odebrané spalinám membránovými stěnami**

$$Q_{ms} = k \cdot F_{ús} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 26,08 \cdot 85,176 \cdot 206,73 \cdot 10^{-3} = 459,18 \text{ kW} \quad (13.41)$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{286,1 - 143,6}{\ln \frac{286,1}{143,6}} = 227,80 \text{ °C} \quad (13.42)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{syt} = 578 - 291,9 = 286,1 \text{ °C} \quad (13.43)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{syt} = 435,5 - 291,9 = 143,6 \text{ °C} \quad (13.44)$$

**13.3 Výpočet závěsných trubek**

vnější průměr trubky	$D_{zt} = 0,038 \text{ m}$
tloušťka stěny	$t_{zt} = 0,0063 \text{ m}$
vnitřní průměr trubky	$d_{zt} = 0,0254 \text{ m}$
počet trubek	$n_{zt} = 45$
teplota páry na vstupu	$t_{zt1} = 297 \text{ °C}$
teplota páry na výstupu	$t_{zt2} = 294,5 \text{ °C}$
střední teplota páry	$t_{ztstř} = 295,75 \text{ °C}$
měrný objem na vstupu	$v_{zt1} = 0,0258 \text{ m}^3/\text{kg}$
měrný objem na výstupu	$v_{zt2} = 0,0255 \text{ m}^3/\text{kg}$
střední měrný objem	$v_{stř} = 0,02565 \text{ m}^3/\text{kg}$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_{zt}} \cdot \left( \frac{w_{zt} \cdot d_{zt}}{v} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (13.45)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0656}{0,0254} \cdot \left( \frac{17,45 \cdot 0,0254}{4,99 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,5279^{0,4} = 4036,97 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{zt} = \frac{\pi \cdot 0,0254^2}{4} \cdot 45 = 0,0254 \text{ m}^2 \quad (13.46)$$

### Rychlost proudění páry v trubkách

$$w_{zt} = \frac{M_{pp}^{zt} \cdot v_{ztstř}}{F_p} = \frac{15,5 \cdot 0,0255}{0,0254} = 17,45 \text{ m/s} \quad (13.47)$$

### Vlastnosti páry pro střední teplotu páry [3]

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,0656 \text{ W/mk}$
Kinematická viskozita	$\nu = 4,99 \cdot 10^{-7}$
Prandtlovo číslo	$Pr = 1,5279$

### Součinitele přestupu tepla ze strany spalín

#### 13.3.1 Konvekcí pro podélné proudění

Pro výpočet závěsných trubek se součinitel přestupu tepla konvekcí uvažuje stejný jako u svazku, který je zavěšen na závěsných trubkách.

$$\alpha_{zt} = 57,70 \text{ W/m}^2\text{K}$$

#### 13.3.2 Sáláním pro zaprášené spaliny

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)} \quad (13.48)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,198 \cdot 779,9^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{592,25}{779,9}\right)^4}{1 - \left(\frac{592,25}{779,9}\right)} = 13,34 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn

$$T_z = 273,15 + t_{12} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{zt}}{S} \cdot 10^3 \quad (13.49)$$

$$T_z = 273,15 + 295,75 + \left( 0,003 + \frac{1}{4036,97} \right) \cdot \frac{200,73}{27,92} \cdot 10^3 = 592,25 \text{ K}$$

### Potřebné teplo pro závěsné trubky

$$Q_{zt} = M_{pzt} \cdot (I_{zt1} - I_{zt2}) = 15,5 \cdot (2794,07 - 2781,12) = 200,73 \text{ kW} \quad (13.50)$$

**Teplosměnná plocha závěsných trubek**

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot n_{zt} \cdot h_{p2} = \pi \cdot 0,038 \cdot 45 \cdot 5,2 = 27,92 \text{ m}^2 \quad (13.51)$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-9,2 \cdot 0,1 \cdot 0,24} = 0,198 \quad (13.52)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (13.53)$$

$$k = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot 0,24}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{779,9}{1000} \right) \cdot 0,3337 = 9,2 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,3337 = 0,03337 \text{ MPa} \quad (13.54)$$

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro volný objem**

$$S_{zt} = 0,9 \cdot D_{zt} \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D_{zt}^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,24 \text{ m} \quad (13.55)$$

**13.3.3 Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (57,70 + 13,34) = 63,94 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (13.56)$$

**13.3.4 Součinitel prostupu tepla**

$$k = \Psi \cdot \alpha_c = 0,6 \cdot 63,94 = 38,36 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (13.57)$$

**Teplo odebrané spalinám závěsnými trubkami**

$$Q_{zt} = k \cdot S_{zt} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 38,36 \cdot 27,92 \cdot 203,02 \cdot 10^{-3} = 217,45 \text{ kW} \quad (13.58)$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{281 - 141}{\ln \frac{281}{141}} = 224,09^\circ\text{C} \quad (13.59)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{zt2} = 578 - 297 = 281^\circ\text{C} \quad (13.60)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{zt1} = 435,5 - 294,5 = 141^\circ\text{C} \quad (13.61)$$

## 13.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z 2. Části III. Tahu

### Teplo spalin na výstupu

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q_{skp2} - Q_{ms} - Q_{zt} = 20119,06 - 4569,55 - 459,18 - 217,45 = 14872,89 \text{ kW} \quad (13.62)$$

Teplo vstupních spalin  $Q_{sp1}$  je rovno teplu výstupních spalin z 1. části III. Tahu.

$$Q_{sp1} = I_{sp1} \cdot O_{sp} \cdot M_{pv} = 857,55 \cdot 4,3447 \cdot 5,4 = 20119,06 \text{ kW} \quad (13.63)$$

### Entalpie a skutečná teplota výstupních spalin

$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{14872,89}{4,3447 \cdot 5,4} = 633,94 \text{ kJ/m}^3 \quad (13.64)$$

$$I_{sp500} = 892,24 \text{ kJ/m}^3$$

$$I_{sp400} = 734,55 \text{ kJ/m}^3$$

$$\Delta t_{sp} = 100^\circ\text{C}$$

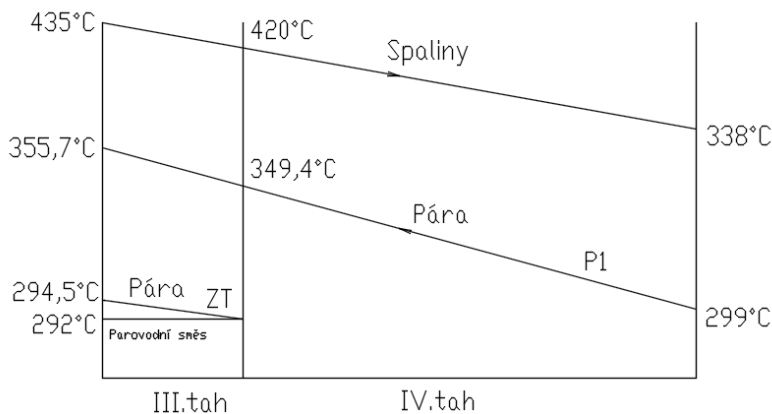
$$\Delta I_{sp} = I_{sp500} - I_{sp400} = 734,55 - 578,93 = 155,62 \text{ kJ/m}^3 \quad (13.65)$$

$$\Delta I_{spc} = I_{sp2} - I_{sp400} = 633,94 - 578,93 = 55 \text{ kJ/m}^3 \quad (13.66)$$

$$t_{sp2} = \frac{\Delta t_{sp}}{\Delta I_{sp}} \cdot \Delta I_{spc} + 400 = \frac{100}{155,62} \cdot 55 + 400 = 435,35^\circ\text{C} \quad (13.67)$$

Výsledná teplota spalin na konci přehříváku 2  $t_{sp2} = 435,35^\circ\text{C}$  se jen nepatrně liší od odhadované teploty  $t_{sp2} = 435,5^\circ\text{C}$ , což je přijatelná odchylka.

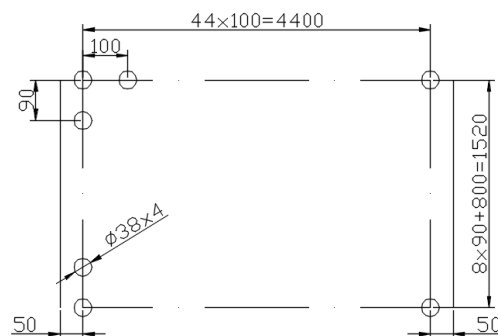
## 14 Výpočet III. tahu a IV tahu - 3. část



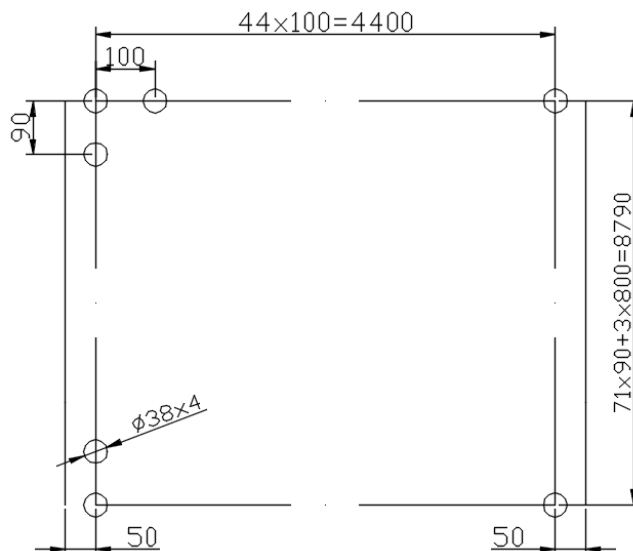
Obr. 14 Tepelné schéma III. tahu a IV. tahu -3 .část

### 14.1 Přehřívák I

Přehřívák 1 je navrhnut jako trubkový svazek, složen z jednotlivých trubek. Tato teplosměnná plocha je tvořena hladkými trubkami o vnějším průměru 38 mm a tloušťce stěny 4 mm tzv. jednohadem. V jedné řadě je 45 trubek, počet řad je 81. Tento přehřívák je rozdělen do více svazků, jedna část přehříváku se nachází ve III. tahu a zbylá část ve IV. tahu.



Obr. 14.1 Část přehříváku 1 ve III. tahu



Obr. 14.2 Část přehříváku 1 ve IV. tahu



**Rozměry III. tahu**

šířka III. tahu	$a = 4,5m$
hloubka III. tahu	$b_{III} = 3,69 m$
výška III. tahu	$h = 10,5 m$

**Hodnoty trubek**

vnější průměr	$D = 0,038m$
tloušťka stěny	$t = 0,004m$
vnitřní průměr	$d = 0,030m$
příčná rozteč	$s_1 = 0,1m$
podelná rozteč	$s_2 = 0,09 m$
počet trubek v jedné řadě	$n_{tr}=45$
počet řad	$n_{řad} = 81$
počet hadů	$n_h = 1$
počet závěsných trubek	$n_{zt} = 45$

**Hodnoty páry**

teplota páry na vstupu	$t_1 = 299,1^\circ C$
teplota páry na výstupu	$t_2 = 355,74^\circ C$
střední teplota páry	$t_{12} = 327,42^\circ C$
tlak páry na vstupu	$p_1 = 7,6MPa$
tlak páry na výstupu	$p_2 = 7,4 MPa$
střední tlak páry	$p_{12} = 7,5 MPa$
měrný objem na vstupu	$v_1 = 0,0261 m^3/kg$
měrný objem na výstupu	$v_2 = 0,03354 m^3/kg$
střední měrný objem	$v_{12} = 0,02982 m^3/kg$
průtočné množství páry	$M_{pp} = 15,466 kg/s$

**Hodnoty spalin**

teplota spalin na vstupu	$t_{sp1} = 435,35^\circ C$
teplota spalin na výstupu	$t_{sp2} = 338^\circ C$
entalpie spalin na vstupu	$I_{sp1} = 633,94 kJ/m^3$
entalpie spalin na výstupu	$I_{sp2} = 485,48 kJ/m^3$

**Střední teplota spalin**

$$t_{str}^{sp} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{435,35 + 338}{2} = 386,67^\circ C \quad (14.1)$$

**Předpokládaná plocha přehříváků ve III tahu**

$$S_{III} = \pi \cdot D \cdot b_{III} \cdot n_{tr} \cdot n_{řad} \cdot n_h = \pi \cdot 0,038 \cdot 3,69 \cdot 45 \cdot 8 \cdot 1 = 158,50 m^2 \quad (14.2)$$

**Předpokládaná plocha přehříváků ve IV tahu**

$$S_{IV} = \pi \cdot D \cdot b_{IV} \cdot n_{tr} \cdot n_{rad} \cdot n_h = \pi \cdot 0,038 \cdot 3,69 \cdot 45 \cdot 73 \cdot 1 = 1446,35 \text{ m}^2 \quad (14.3)$$

**Předpokládaná plocha svazku**

$$S = S_{III} + S_{IV} = 158,50 + 1446,35 = 1604,86 \text{ m}^2 \quad (14.4)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry**

$$\alpha_k = \alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0,023 \cdot \frac{0,06085}{0,03} \cdot \left( \frac{14,51 \cdot 0,03}{6,27 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,2494^{0,4}$$

$$\alpha_k = \alpha_2 = 2404,34 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.5)$$

**Průtočný průřez pro páru**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_h = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 42 \cdot 1 = 0,0297 \text{ m}^2 \quad (14.6)$$

**Rychlost proudění páry v trubkách**

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{F_p} = \frac{15,466 \cdot 0,02982}{0,0297} = 14,51 \text{ m/s} \quad (14.7)$$

**Vlastnosti páry pro střední teplotu páry [3]**

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,06085 \text{ W/mK}$
Kinematická viskozita	$\nu = 6,27 \cdot 10^{-7}$
Prandtlovo číslo	$Pr = 1,2494$

**14.1.1 Součinitele přestupu tepla ze strany spalín**

**Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalín pro příčné obtékání trubek uspořádaných za sebou**

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (14.8)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,05691}{0,038} \cdot \left( \frac{5,50 \cdot 0,038}{5,872 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,6513^{0,33} = 52,92 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Rychlost spalín**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = \frac{4,3447 \cdot 5,4}{10,2951} \cdot \frac{273,15 + 386,67}{273,15} = 5,50 \text{ m/s} \quad (14.9)$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = b_{III} \cdot (a - n_{tr} \cdot D) = 3,69 \cdot (4,5 - 45 \cdot 0,038) = 10,2951 \text{ m}^2 \quad (14.10)$$

**Oprava na uspořádání svazku  $c_s$** 

V závislosti na poměrné příčné rozteči  $\sigma_1$  a poměrné podélné rozteči  $\sigma_2$

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,63 \quad (14.11)$$

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = 2,37 \quad (14.12)$$

Pokud je  $\sigma_2 \geq 2$ , potom  $c_s = 1$

**Oprava na počet podélných řad  $c_z$** 

Pokud je počet řad  $\geq 10$ , potom  $c_z = 1$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin [1]**

Součinitel tepelné vodivosti

$$\lambda = 0,05691 \text{ W/mK}$$

Kinematická viskozita

$$\nu = 5,872 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 0,6513$$

**14.1.2 Součinitel pro přestup tepla sáláním pro zaprášené spaliny**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)} \quad (14.13)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,209 \cdot 659,82^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{605,67}{659,82}\right)^4}{1 - \left(\frac{605,67}{659,82}\right)} = 10,86 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn**

$$T_z = 273,15 + t_{12} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \frac{Q_{p1}}{S} \cdot 10^3 \quad (14.14)$$

$$T_z = 273,15 + 341,22 + \left(0,002 + \frac{1}{2404,34}\right) \cdot \frac{3385,72}{1604,86} \cdot 10^3 = 605,67^\circ\text{C}$$

**Potřebné teplo pro přehřívák 1**

$$Q_{p1} = M_{pp} \cdot \Delta i_{p1} = 15,466 \cdot 218,90 = 3385,72 \text{ kW} \quad (14.15)$$

**Stupeň černosti povrchu stěn**

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

**Stupeň černosti ohniště**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-9,78 \cdot 0,1 \cdot 0,24} = 0,209 \quad (14.16)$$

**Součinitel zeslabení sálání nesvítvivými tříatomovými plyny**

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (14.17)$$

$$k = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot 0,24}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{659,82}{1000} \right) \cdot 0,3337 = 9,78 m^{-1} \cdot MPa^{-1}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,3337 = 0,03337 \text{ MPa} \quad (14.18)$$

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro volný objem**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,24 \text{ m} \quad (14.19)$$

**14.1.3 Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_s = 52,92 + 10,86 = 63,78 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.20)$$

**14.1.4 Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_c}{1 + \frac{\alpha_c}{\alpha_2}} = \frac{0,65 \cdot 63,78}{1 + \frac{63,78}{2404,34}} = 37,28 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.21)$$

**Potřebná (ideální) plocha pro přehřívák 1**

$$S_{id} = \frac{Q_{p2}}{k \cdot \Delta t} \cdot 10^3 = \frac{3385,72}{37,28 \cdot 56,84} = 1597,75 m^2 \quad (14.22)$$

Výrobní výhřevná plocha přehříváku  $S = 1604,86 m^2$  se liší od potřebné ideální plochy  $S_{id} = 1597,75 m^2$  o 0,45% což je v rozmezí tolerance, protože dovolená odchylka je až 5%.

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{79,61 - 38,9}{\ln \frac{79,61}{38,9}} = 48,82^\circ\text{C} \quad (14.23)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_2 = 435,35 - 355,74 = 79,61^\circ\text{C} \quad (14.24)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_1 = 338 - 299,1 = 38,9^\circ\text{C} \quad (14.25)$$

### Skutečně odebrané teplo přehřívákem 1

$$Q_{skp1} = k \cdot S \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 37,28 \cdot 1604,86 \cdot 56,84 = 3400,78 \text{ kW} \quad (14.26)$$

### Výška prostoru přehříváku 1 ve 3 tahu

$$h_{p1} = 8 \cdot 90 + 800 = 1,52 \text{ m} \quad (14.27)$$

### Výška prostoru přehříváku 1 ve 4 tahu

$$h_{p1} = (n_{\text{řad}} \cdot s_2) - s_2 = (72 \cdot 0,09) - 0,09 + 0,8 + 0,8 + 0,8 = 8,79 \text{ m} \quad (14.28)$$

### Rozměr vstupní a výstupní komory

$$S_{kom} = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{w_p} = \frac{15,466 \cdot 0,02982}{14,51} = 0,0318 \text{ m}^2 \quad (14.29)$$

### Průměr komor

$$D_{kom} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{kom}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0318}{\pi}} = 0,201 \text{ m} \quad (14.30)$$

Volím trubku Tr 219x6,3 ČSN 42 5715

## 14.2 Výpočet membránových stěn

teplota spalin na vstupu do P1

$$t_{sp1} = 434,35^\circ\text{C}$$

teplota spalin na výstupu z P1

$$t_{sp2} = 420^\circ\text{C}$$

entalpie spalin na vstupu do P1

$$I_{sp1} = 633,94^\circ\text{C}$$

entalpie spalin na výstupu z P1

$$I_{sp2} = 611,61^\circ\text{C}$$

### Střední teplota spalin

$$t_{stř} = \frac{434,35 + 420}{2} = 427,67^\circ\text{C} \quad (14.31)$$

### Součinitele přestupu tepla ze strany spalin

### 14.2.1 Konvekcí pro podélné proudění

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (14.32)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,06058}{0,217} \cdot \left( \frac{5,50 \cdot 0,217}{6,533 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,6572^{0,4} = 13,94 \text{ W/m}^2\text{K}$$

#### Ekvivaletní průměr spalin

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O} = \frac{4 \cdot 10,2951}{189,51} = 0,217 \text{ m} \quad (14.33)$$

#### Obvod kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b_{III}) + n_{tr} \cdot (b_{III} + D) + n_{zt} \cdot \pi \cdot D \quad (14.34)$$

$$O = 2 \cdot (4,5 + 3,69) + 45 \cdot (3,69 + 0,038) + 45 \cdot \pi \cdot 0,038 = 189,51 \text{ m}$$

#### Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin [1]

Součinitel tepelné vodivosti

$$\lambda = 0,06058 \text{ W/mK}$$

Kinematická viskozita

$$\nu = 6,533 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 0,6572$$

### 14.2.2 Sáláním pro zaprášené spaliny

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)} \quad (14.35)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,177 \cdot 700,82^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{640,34}{700,82}\right)^4}{1 - \left(\frac{640,34}{700,82}\right)} = 10,99 \text{ W/m}^2\text{K}$$

#### Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn

$$T_z = 273,15 + (t_{syt} + \varepsilon \cdot q) = 273,15 + (291,9 + 0,0035 \cdot 21512,19) = 640,34 \text{ K} \quad (14.36)$$

#### Měrné zatížení

Určí se z běžného tepla, které odevzdávají spaliny a z účinné sálavé plochy stěn.

$$q = \frac{Q_{12}}{F_{ús}} \cdot 10^3 = \frac{Q_{sp} \cdot M_{pv} \cdot \Delta I_{sp}}{2 \cdot h_{p1} \cdot (a + b_{III})} \cdot 10^3 \quad (14.37)$$

$$q = \frac{4,3447 \cdot 5,4 \cdot 23,88}{2 \cdot 1,59 \cdot (4,5 + 3,69)} \cdot 10^3 = 21512,19 \text{ kW}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp1} - I_{sp2} = 633,94 - 610,057 = 23,88 \text{ kJ/m}^3 \quad (14.38)$$

### Stupeň černosti povrchu stěn

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

### Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-11,85 \cdot 0,1 \cdot 0,165} = 0,177 \quad (14.39)$$

### Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (14.40)$$

$$k = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot 0,165}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{700,82}{1000} \right) \cdot 0,3337 = 11,85 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

### Celkový parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,3337 = 0,03337 \text{ MPa} \quad (14.41)$$

### Efektivní tloušťka sálavé vrstvy pro volný objem

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{b_{III}} + \frac{1}{h_{p1}} + \frac{1}{s_1}} = \frac{1,8}{\frac{1}{3,69} + \frac{1}{1,52} + \frac{1}{0,1}} = 0,165 \text{ m} \quad (14.42)$$

## 14.2.3 Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (13,94 + 10,99) = 22,43 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.43)$$

## 14.2.4 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_c}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_c} = \frac{22,43}{1 + 0,0035 \cdot 22,43} = 20,80 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.44)$$

### Teplo odebrané spalinám membránovými stěnami

$$Q_{ms} = k \cdot F_{\dot{u}s} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 20,80 \cdot 26,04 \cdot 135,63 \cdot 10^{-3} = 73,48 \text{ kW} \quad (14.45)$$

### Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{143,44 - 128,1}{\ln \frac{143,44}{128,1}} = 135,63 \text{ }^\circ\text{C} \quad (14.46)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{syt} = 461,59 - 291,9 = 143,44^\circ\text{C} \quad (14.47)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{syt} = 421 - 291,9 = 128,1^\circ\text{C} \quad (14.48)$$

### 14.3 Výpočet závěsných trubek

vnější průměr trubky	$D_{zt} = 0,038\text{m}$
tloušťka stěny	$t_{zt} = 0,0063\text{m}$
vnitřní průměr trubky	$d_{zt} = 0,0254\text{ m}$
počet trubek	$n_{zt} = 45$
teplota páry na vstupu	$t_{zt1} = 291,9^\circ\text{C}$
teplota páry na výstupu	$t_{zt2} = 294,5^\circ\text{C}$
střední teplota páry	$t_{ztstř} = 293,2^\circ\text{C}$
měrný objem na vstupu	$v_{zt1} = 0,0254\text{m}^3/\text{kg}$
měrný objem na výstupu	$v_{zt2} = 0,02542\text{m}^3/\text{kg}$
střední měrný objem	$v_{stř} = 0,02541\text{ m}^3/\text{kg}$

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_{zt}} \cdot \left( \frac{w_{zt} \cdot d_{zt}}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (14.49)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,0665}{0,0254} \cdot \left( \frac{17,24 \cdot 0,0254}{4,9 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,5857^{0,4} = 4173,91\text{ W/m}^2\text{K}$$

#### Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{zt}^2}{4} \cdot n_{zt} = \frac{\pi \cdot 0,0254^2}{4} \cdot 45 = 0,0228\text{ m}^2 \quad (14.50)$$

#### Rychlost proudění páry v trubkách

$$w_{zt} = \frac{M_{pp}^{zt} \cdot v_{ztstř}}{F_p} = \frac{15,466 \cdot 0,02541}{0,0228} = 17,24\text{ m/s} \quad (14.51)$$

#### Vlastnosti páry pro střední teplotu páry [3]

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,0665\text{ W/mk}$
Kinematická viskozita	$\nu = 4,9 \cdot 10^{-7}$
Prandtlovo číslo	$Pr = 1,5857$

#### Součinitele přestupu tepla ze strany spalin



### 14.3.1 Konvekce pro podélné proudění

Pro výpočet závěsných trubek se součinitel přestupu tepla konvekce uvažuje stejný jako u svazku, který je zavěšen na závěsných trubkách.

$$\alpha_{zt} = 52,74 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### 14.3.2 Sáláním pro zaprášené spaliny

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot 701,32^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)} \quad (14.52)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,205 \cdot 701,32^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{580,48}{700,82}\right)^4}{1 - \left(\frac{580,48}{700,82}\right)} = 11,15 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Absolutní teplota zaneseného povrchu stěn

$$T_z = 273,15 + t_{12} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \frac{Q_{zt}}{S} \cdot 10^3 \quad (14.53)$$

$$T_z = 273,15 + 293,2 + \left(0,003 + \frac{1}{4173,91}\right) \cdot \frac{37,23}{8,54} \cdot 10^3 = 580,48 \text{ K}$$

### Potřebné teplo pro závěsné trubky

$$Q_{zt} = \frac{M_{pzt}}{M_{pv}} \cdot (I_{zt1} - I_{zt2}) = \frac{15,466}{5,4} \cdot (2780,5 - 2767,5) = 37,23 \text{ kW} \quad (14.54)$$

### Teplosměnná plocha závěsných trubek

$$S_{zt} = \pi \cdot D_{zt} \cdot n_{zt} \cdot h_{p2} = \pi \cdot 0,038 \cdot 42 \cdot 1,59 = 8,54 \text{ m}^2 \quad (14.55)$$

### Stupeň černosti povrchu stěn

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

### Stupeň černosti ohniště

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-9,58 \cdot 0,1 \cdot 0,24} = 0,205 \quad (14.56)$$

### Součinitel zeslabení sálání nesvítvivými tříatomovými plyny

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000}\right) \cdot r_{sp} \quad (14.57)$$

$$k = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2153}{3,16 \cdot \sqrt{0,03337 \cdot 0,24}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{700,82}{1000}\right) \cdot 0,3337 = 9,58 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

**Celkový parciální tlak tříatomových plynů**

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,3337 = 0,03337 \text{ MPa} \quad (14.58)$$

**Efektivní tloušťka sálové vrstvy pro volný objem**

$$S_{zt} = 0,9 \cdot D_{zt} \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D_{zt}^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1 \right) = 0,24 \text{ m} \quad (14.59)$$

**14.3.3 Celkový součinitel přestupu tepla**

$$\alpha_c = \xi \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,9 \cdot (52,92 + 11,15) = 57,66 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.60)$$

**14.3.4 Součinitel prostupu tepla**

$$k = \Psi \cdot \alpha_c = 0,6 \cdot 57,67 = 34,60 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14.61)$$

**Teplo odebrané spalinám závěsnými trubkami**

$$Q_{zt} = k \cdot S_{zt} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 34,60 \cdot 8,54 \cdot 134,37 \cdot 10^{-3} = 39,85 \text{ kW} \quad (14.62)$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{140,85 - 128,1}{\ln \frac{140,85}{128,1}} = 134,37^\circ\text{C} \quad (14.63)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_{zt2} = 435,35 - 294,5 = 140,85^\circ\text{C} \quad (14.64)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_{zt1} = 420 - 291,9 = 128,1^\circ\text{C} \quad (14.65)$$

**14.4 Výsledná teplota spalin na výstupu z 3. Části III. Tahu****Teplota spalin na výstupu**

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q_{pa} - Q_{ms} - Q_{zt} = 14872,88 - 443,11 - 73,47 - 39,69 = 14316,61 \text{ kW} \quad (14.66)$$

**Teplo spalin na vstupu**

$$Q_{sp1} = I_{sp1} \cdot O_{sp} \cdot M_{pv} = 633,94 \cdot 4,3447 \cdot 5,4 = 14872,88 \text{ kW} \quad (14.67)$$

**Teplo, které odebere přehřívák PI ve 3. části 3. tahu**

$$Q_{pa} = k \cdot S_{\text{PI}} \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 37,28 \cdot 158,50 \cdot 74,99 = 443,11 \text{ kW} \quad (14.68)$$

**Střední teplotní logaritmický spád**

$$t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{79,60 - 70,56}{\ln \frac{79,60}{70,56}} = 74,18^\circ\text{C} \quad (14.69)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_2 = 43,35 - 355,74 = 79,60^\circ\text{C} \quad (14.70)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_1 = 420 - 349,44 = 70,56^\circ\text{C} \quad (14.71)$$

Plocha přehříváku PI je zhruba 1/9 z celkové plochy přehříváku I, proto teplotu  $t_1$  uvažují zhruba  $349,44^\circ\text{C}$ .

**Entalpie výstupních spalin ve III. tahu**

$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{14316,61}{4,3447 \cdot 5,4} = 610,22 \text{ kJ}/\text{m}^3 \quad (14.72)$$

$$I_{sp400} = 578,93 \text{ kJ}/\text{m}^3$$

$$I_{sp500} = 734,55 \text{ kJ}/\text{m}^3$$

$$\Delta t_{sp} = 100^\circ\text{C}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp500} - I_{sp400} = 734,55 - 578,93 = 155,62 \text{ kJ}/\text{m}^3 \quad (14.73)$$

$$\Delta I_{spc} = I_{sp2} - I_{sp400} = 610,22 - 578,93 = 31,28 \text{ kJ}/\text{m}^3 \quad (14.74)$$

$$t_{sp2} = \frac{\Delta t_{sp}}{\Delta I_{sp}} \cdot \Delta I_{spc} + 400 = \frac{100}{155,62} \cdot 31,28 + 400 = 420,1^\circ\text{C} \quad (14.75)$$

Výsledná teplota spalin na konci přehříváku 1 ve III. tahu  $t_{sp2} = 420,1^\circ\text{C}$  se jen nepatrně liší od odhadované  $t_{sp2} = 420^\circ\text{C}$ , což je přijatelná odchylka

**14.4.1 Výsledná teplota spalin za přehřívákem I****Teplota spalin na výstupu**

$$Q_{sp2} = Q_{sp1} - Q_{skp1} - Q_{ms} - Q_{zt} = 14872,88 - 3400,79 - 103,66 - 39,41 = 11358,94 \text{ kW} \quad (14.76)$$

**Teplo vstupních spalin  $Q_{sp1}$** 

$$Q_{sp1} = I_{sp1} \cdot O_{sp} \cdot M_{pv} = 633,94 \cdot 4,3447 \cdot 5,4 = 14872,88 \text{ kW} \quad (14.77)$$

**Entalpie a skutečná teplota výstupních spalin**

$$I_{sp2} = \frac{Q_{sp2}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{11358,94}{4,3447 \cdot 5,4} = 484,16 \text{ kJ/m}^3 \quad (14.78)$$

$$I_{sp400} = 578,93 \text{ kJ/m}^3$$

$$I_{sp300} = 428,2 \text{ kJ/m}^3$$

$$\Delta t_{sp} = 100^\circ \text{C}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp400} - I_{sp300} = 578,93 - 428,2 = 150,73 \text{ kJ/m}^3 \quad (14.79)$$

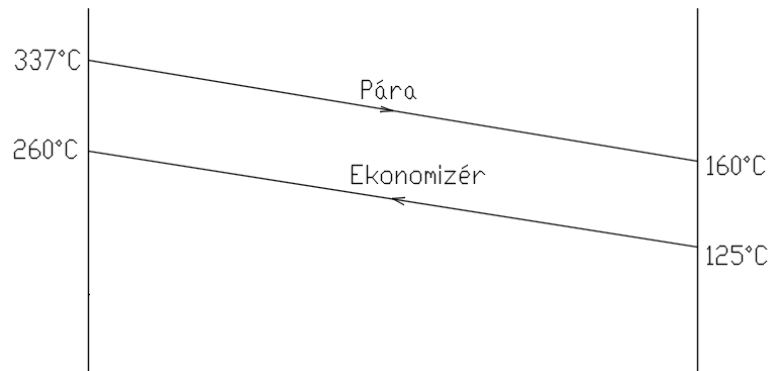
$$\Delta I_{spc} = I_{sp2} - I_{sp300} = 484,16 - 428,2 = 55,95 \text{ kJ/m}^3 \quad (14.80)$$

$$t_{sp2} = \frac{\Delta t_{sp}}{\Delta I_{sp}} \cdot \Delta I_{spc} + 300 = \frac{100}{150,73} \cdot 55,95 + 300 = 337,12 \text{ }^\circ\text{C} \quad (14.81)$$

Výsledná teplota spalin na konci přehříváku 1  $t_{sp2} = 337,12^\circ\text{C}$  se jen nepatrně liší od odhadované teploty  $t_{sp2} = 338^\circ\text{C}$ , což je přijatelná odchylka.

## 15 Výpočet IV. a V. tahu

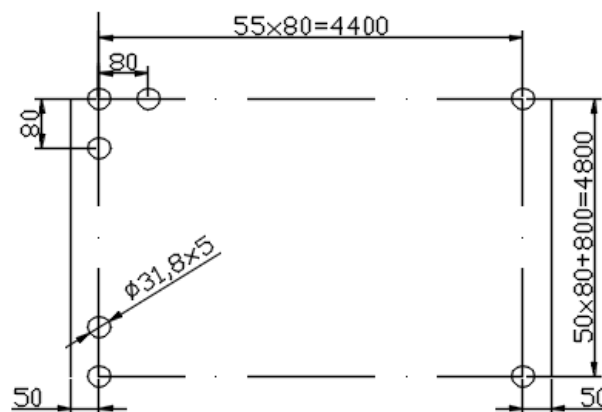
Oba tahy tedy IV. a V. tah jsou nechlazené a jsou v nich umístěny přehřívák1 a ekonomizér.



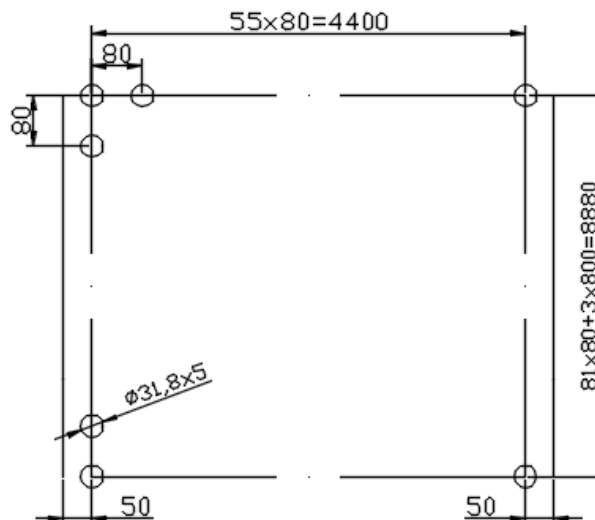
Obr. 15 Tepelné schéma IV. a V. tahu

### 15.1 Ekonomizér

Ekonomizér je tvořen hladkými trubkami o vnějším průměru 31,8 mm a tloušťce stěny 5 mm. Část ekonomizéru je umístěna ve IV. tahu a zbylá se nalézá v V. tahu



Obr 15.1 Část ekonomizéru ve IV. tahu



Obr.15.2 Část ekonomizéru v V. tahu

**Hodnoty trubek**

vnější průměr	$D=0,0318 \text{ m}$
tloušťka stěny	$t=0,005 \text{ m}$
vnitřní průměr	$d=0,0218 \text{ m}$
příčná rozteč	$s_1 = 0,08\text{m}$
podelná rozteč	$s_2 = 0,08\text{m}$
počet trubek v jedné řadě	$n_{tr} = 56$
počet řad	$n_{řad} = 134$
hloubka IV a V tahu	$b_{IV,V} = 3,69$
šířka IV a V tahu	$a = 4,5 \text{ m}$

**Hodnota páry a vody**

teplota vody na vstupu	$t_1 = 125 \text{ °C}$
teplota vody na výstupu	$t_2 = 260\text{°C}$
střední teplota vody	$t_{12} = 192,5\text{°C}$
tlak vody na vstupu	$p_1 = 8,15 \text{ MPa}$
tlak vody na výstupu	$p_2 = 7,65 \text{ MPa}$
střední tlak vody	$p_{12} = 7,90 \text{ Mpa}$
měrný objem na vstupu	$v_1 = 0,00106\text{m}^3/\text{kg}$
měrný objem na výstupu	$v_2 = 0,00120\text{m}^3/\text{kg}$
střední měrný objem	$v_{12} = 0,00113\text{m}^3/\text{kg}$
průtočné množství páry	$M_{pp} = 15,466 \text{ kg/s}$

**Hodnoty spalin**

teplota spalin na vstupu	$t_{sp1} = 337,1 \text{ °C}$
teplota spalin na výstupu	$t_{sp2} = 160\text{°C}$
entalpie spalin na vstupu	$i_{sp1} = 484,16 \text{ kJ/m}^3$
entalpie spalin na výstupu	$i_{sp2} = 224,66 \text{ kJ/m}^3$

**Střední teplota spalin**

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{sp1} + t_{sp2}}{2} = \frac{337,1 + 160}{2} = 248,56\text{°C} \quad (15.1)$$

**Průtočný průřez pro vodu**

$$F_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0218^2}{4} \cdot 56 = 0,0209\text{m}^2 \quad (15.2)$$

**Rychlost proudění vody v trubkách**

$$w_v = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{F_v} = \frac{15,466 \cdot 0,00113}{0,209} = 0,84 \text{ m/s} \quad (15.3)$$

**15.1 Součinitel přestupu tepla konvekci ze strany spalin**

Pro příčné obtékání trubek řazených za sebou.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (15.4)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,04485}{0,0318} \cdot \left( \frac{4,47 \cdot 0,0318}{3,93 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,67^{0,33} = 50,77 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Rychlost spalin**

$$w_{sp} = \frac{O_{sp} \cdot M_{pv}}{F_{sp}} \cdot \frac{273,15 + t_{stř}}{273,15} = \frac{4,3447 \cdot 5,4}{10,034} \cdot \frac{273,15 + 248,56}{273,15} = 4,47 \text{ m/s} \quad (15.5)$$

**Světlý průřez spalin**

$$F_{sp} = b_{IV} \cdot (a - (n_{tr} \cdot D)) = 3,69 \cdot (4,5 - (56 \cdot 0,0318)) = 10,034 \text{ m}^2 \quad (15.6)$$

**Oprava na uspořádání svazku  $c_s$** 

Závisí na velikosti  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,08}{0,0318} = 2,52 \quad (15.7)$$

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,08}{0,0318} = 2,52 \quad (15.8)$$

Pokud je  $\sigma_1, \sigma_2 \geq 2$ , potom  $c_z = 1$

**Oprava na počet podélných řad  $c_z$** 

Pokud je počet řad  $\geq 10$ , potom  $c_z = 1$

**Vlastnosti spalin pro střední teplotu spalin [1]**

Součinitel tepelné vodivosti

$$\lambda = 0,0448 \text{ W/mK}$$

Kinematická viskozita

$$\nu = 3,93 \cdot 10^{-5}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = 0,67$$

## Součinitel přestupu tepla sáláním pro zaprášené spaliny

Jelikož se ekonomizér nachází v prostoru, kde je teplota spalin pod 500°C, zanedbáváme součinitel přestupu tepla sáláním.

### 15.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_k} = \frac{50,77}{1 + 0,0045 \cdot 50,77} = 41,33 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (15.9)$$

#### Potřebná ideální plocha pro ekonomizér

$$S_{id} = \frac{Q_e \cdot 1000}{k \cdot \Delta t} = \frac{6088,25 \cdot 1000}{41,33 \cdot 53,32} = 2762,88 \text{ m}^2 \quad (15.10)$$

#### Výkon přenesený spalinami na vstupu do ekonomizéru

$$Q_{sp1} = O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot i_{sp1} = 4,3447 \cdot 5,4 \cdot 484,16 = 11359,1 \text{ kW} \quad (15.11)$$

#### Výkon přenesený spalinami na výstupu z ekonomizéru

$$Q_{sp2} = O_{sp} \cdot M_{pv} \cdot i_{sp2} = 4,3447 \cdot 5,4 \cdot 484,16 = 224,66 = 5270,83 \text{ kW} \quad (15.12)$$

#### Potřebný výkon ekonomizéru

$$Q_e = Q_{sp1} - Q_{sp2} = 11359,1 - 5270,83 = 6088,25 \text{ kW} \quad (15.13)$$

#### Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{77,12 - 35}{\ln \frac{77,12}{35}} = 53,32^\circ\text{C} \quad (15.14)$$

$$\Delta t_1 = t_{sp1} - t_2 = 337,12 - 260 = 77,12^\circ\text{C} \quad (15.15)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp2} - t_1 = 160 - 125 = 35^\circ\text{C} \quad (15.16)$$

#### Počet řad ekonomizéru

$$n_{\text{řad}} = \frac{S_{id}}{\pi \cdot D \cdot b_{IV} \cdot n_{tr}} = \frac{2762,88}{\pi \cdot 0,0318 \cdot 3,69 \cdot 56} = 133,90 \quad (15.17)$$

Volím počet řad 134.

#### Skutečná výrobní teplosměnná plocha ekonomizéru

$$S = \pi \cdot D \cdot b_{IV} \cdot n_{tr} \cdot n_{\text{řad}} = \pi \cdot 0,0318 \cdot 3,69 \cdot 56 \cdot 134 = 2764,88 \text{ m}^2 \quad (15.18)$$



**Skutečně odebrané teplo ekonomizérem**

$$Q_{esk} = k \cdot S \cdot \Delta t \cdot 10^{-3} = 41,33 \cdot 2764,88 \cdot 53,32 \cdot 10^{-3} = 6092,66 \text{ kW} \quad (15.19)$$

**15.3 Výsledná teplota spalin na výstupu z ekonomizéru****Celkový teplo spalin na výstupu z ekonomizéru**

$$Q_{spout} = Q_{sp1} - Q_{esk} = 11359,1 - 6092,66 = 5266,42 \text{ kW} \quad (15.20)$$

**Entalpie spalin odpovídající teplo spalin na výstupu z ekonomizéru**

$$I_{sp2} = \frac{Q_{spout}}{O_{sp} \cdot M_{pv}} = \frac{5266,42}{4,3447 \cdot 5,4} = 224,47 \text{ kJ/m}^3 \quad (15.21)$$

$$I_{sp200} = 281,61 \text{ kJ/m}^3$$

$$I_{sp100} = 139,24 \text{ kJ/m}^3$$

$$\Delta t_{sp} = 100^\circ\text{C}$$

$$\Delta I_{sp} = I_{sp200} - I_{sp100} = 281,61 - 139,24 = 142,37 \text{ kJ/m}^3 \quad (15.22)$$

$$\Delta I_{spc} = I_{sp2} - I_{sp100} = 224,47 - 139,24 = 85,23 \text{ kJ/m}^3 \quad (15.23)$$

$$t_{sp2} = \frac{\Delta t_{sp}}{\Delta I_{sp}} \cdot \Delta I_{spc} + 400 = \frac{100}{142,37} \cdot 85,23 + 400 = 159,87^\circ\text{C} \quad (15.24)$$

Výsledná teplota spalin na konci ekonomizéru  $t_{sp2} = 159,87^\circ\text{C}$  se jen nepatrně liší od odhadované  $t_{sp2} = 160^\circ\text{C}$ , což je přijatelná odchylka.

**Rozměr vstupní a výstupní komory**

$$S_{kom} = \frac{M_{pp} \cdot v_{12}}{w_v} = \frac{15,466 \cdot 0,00113}{0,84} = 0,0209 \text{ m}^2 \quad (15.25)$$

**Průměr komor**

$$D_{kom} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{kom}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0209}{\pi}} = 0,163 \text{ m} \quad (15.26)$$

Volím trubku TR 168,3x 6,3 ČSN42 5715.01

## 16 Kontrola tepelné bilance

### Teplo předané všem výhřevným plochám.

Teplo odevzdané všem výhřevným plochám se určí součtem výkonu jednotlivých výhřevných ploch.[1]

$$\begin{aligned}
 Q_{bi} &= Q_{st} + Q_m + Q_{II} + Q_{vys} + Q_{skp3} + Q_{ms3} + Q_{zt3} + Q_{skp2} \\
 &+ Q_{ms2} + Q_{zt2} + Q_{skp1} + Q_{ms1} + Q_{zt1} + Q_{eko} \\
 &= 22092,6 + 861,93 + 3307,19 + 1172,20 + 4332,04 + 722,25 + 320,27 + 4569,55 \\
 &+ 459,18 + 217,45 + 3400,78 + 73,48 + 39,85 + 6092,6 = 47661,99 \text{ kW}
 \end{aligned}
 \tag{16.1}$$

### Tepelná bilance

$$\begin{aligned}
 \Delta Q &= Q_p^p \cdot \eta_k - \frac{\sum Q_{bi}}{M_{pv}} \cdot \frac{100 - z_c}{100} = \\
 \Delta Q &= 9711,09 \cdot 0,8709 - \frac{47661,99}{5,4} \cdot \frac{100 - 4,01}{100} = -14,97 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}
 \tag{16.2}$$

$Q_p^p$	celkové teplo přivedené do kotle
$\eta_k$	účinnost kotle
$M_{pv}$	skutečně spálené množství paliva
$z_c$	ztráta mechanickým nedopalem

### Odchylka tepelné bilance

$$\Delta = \frac{\Delta Q}{Q_p^p} \cdot 100 = \frac{14,97}{9711,09} \cdot 100 = 0,154\%
 \tag{16.3}$$

Maximální odchylka tepelné bilance je dovolena až 0,5%, moje odchylka leží v daném intervalu.

## **17 Závěr**

Cílem diplomové práce bylo navrhnout parní kotel na spoluspalování dřeva a hnědého uhlí v poměru (30-70- dřevo), aby výstupní parametry páry měli tlak 7MPa a teplotu 490°C. Po stanovení složení nového vzorku paliva jsem vypočítal stechiometrické výpočty, poté stanovil jednotlivé ztráty kotle a nepřímou metou určil tepelnou účinnost kotle. Parní kotel se skládá z pěti tahů, přičemž první tři tahy jsou chlazené membránovými stěnami a zbylé dva nechlazené tvořeny plechovým kanálem.

V další části jsem určil šířku a hloubku spalovací komory z měrného zatížení  $q=2000\text{W}/\text{m}^2$ , voleno dle konzultací, samotná výška spalovací komory byla dopočtena tak, aby výsledná teplota na výstupu z ohniště pohybovalo okolo 850 °C, Mezi prvním a druhým tahem je kotlová mříž, která vznikne rozvolněním membránové stěny a uspořádáním trubek střídavě. V druhém tahu není žádný trubkový svazek a slouží k vychlazení spalin před vstupem do třetího tahu na první výhřevnou plochu . Ve třetím tahu jsou umístěny svazky přehříváku tři a dva a malá část svazku přehříváku 1. Ve čtvrtém tahu se nalézají zbylé svazky přehříváku jedna a část ekonomizérů. Poslední pátý tah je vyplněn zbývajícími svazky ekonomizérů.

Mezi druhým a třetím tahem a také čtvrtým a pátým tahem jsou umístěny výsypky, kde dochází k odloučení části popílku. Tento popílek je vrácen zpět do spalovací komory. Mezi přehřívákem jedna a dva a také mezi přehřívákem dva a tři je použita regulace teploty páry vstříkem napájecí vody, protože nezaručíme konstantní výhřevnost paliva. Jednotlivé trubkové svazky zaujímají prostor o rozměru zhruba dva metry, poté následuje kontrolní průlez s parními ofukovači. Parní ofukovače zbavují teplosměnné plochy od nánosů popílků. Nakonec je spočtena kontrola tepelné bilance.

## **18 Seznam použité literatury**

- [1] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1992.200s, ISBN 80-214-0426-4.
- [2] Dlouhý Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. 3.vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT,2007.212s. ISBN 978-80-01-03757-7
- [3] [STEAMTAB]: Chemical Logic Steam Tab Companion 2.6 2006 Dostupné z:  
<x-eng.com>
- [4] JAKUBES, Jaroslav: Spoluspalování biomasy s fosilními palivy – od výzkumu k praktickému využití. *Biom.cz* [online]. 2010-10-20 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z WWW:<<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/spoluspalovani-biomasy-s-fosilnimi-palivy-od-vyzkumu-k-praktickemu-vyuziti>>. ISSN: 1801-2655.

## **19 Seznam použitých veličin a symbolů**

$a$	[m]	Šířka ohniště
$a_{\zeta}$	[m]	Stupeň černosti proudu spalín
$a_0$	[m]	Stupeň černosti ohniště
$a_{pl}$	[m]	Efektivní stupeň černosti plamene
$a_{st}$	[m]	Stupeň černosti povrchu stěn
$A^r$	[%]	Obsah popelovin
$b$	[m]	Hloubka spalovací komory
$b_{II}$	[m]	Hloubka II. tahu
$b_{III}$	[m]	Hloubka III. tahu
$b_{IV}$	[m]	Hloubka IV. tahu
$B_0$	[-]	Boltzmanovo číslo
$c$	[kJ/m <sup>3</sup> K]	Entalpie minimálního množství vzduchu
$c_m$	[m]	Délka mříže
$c_i$	[kJ/kgK]	Měrné teplo popílku pro teploty $t_i$
$c_p$	[kJ/kgK]	Měrné teplo paliva
$c_s$	[-]	Opravný součinitel na uspořádání svazku
$c_{su}$	[kJ/kgK]	Měrné teplo sušiny paliva
$c_z$	[-]	Opravný součinitel na počet řad
$C_i$	[%]	Obsah spalitelných látek v pevných zbytcích
$d$	[m]	Vnitřní průměr
$d$	[ $\mu$ m]	Střední efektivní průměr částic popílku
$d_e$	[m]	Ekvivalentní průměr
$d_{zt}$	[m]	Vnitřní průměr závěsných trubek
$D$	[m]	Průměr trubky
$D_{kom}$	[m]	Průměr komor
$D_{zt}$	[m]	Průměr závěsných trubek
$f$	[-]	Parametr respektující podíl vodní páry připadající na $1N_{m^3}$
$F_p$	[m <sup>2</sup> ]	Průtočný průřez pro pracovní médium
$F_{sp}$	[m <sup>2</sup> ]	Světlý průřez spalín
$F_{st}$	[m <sup>2</sup> ]	Celkový povrch stěn
$F_{ús}$	[m <sup>2</sup> ]	Účinná sálavá plocha
$F_v$	[m <sup>2</sup> ]	Průtočný průřez pro vodu
$F_{vz}$	[m <sup>2</sup> ]	Průtočný průřez pro vzduch
$h$	[m]	Výška spalovací komory
$h_p$	[m]	Výška jednotlivých výhřevných ploch
$i_{in}$	[kJ/kg]	Entalpie média na vstupu
$i_{nv}$	[kJ/kg]	Entalpie napájecí vody
$i_p$	[kJ/kg]	Fyzické teplo paliva
$i_{pp}$	[kJ/kg]	Entalpie přehřáté páry
$i_{out}$	[kJ/kg]	Entalpie média na výstupu
$I_o$	[kJ/kg]	Entalpie na výstupu z ohniště

$I_u$	[kJ/kg]	Užitečné teplo uvolněné ve spalovací komoře
$I_{out}^{SP}$	[kJ/kg]	Entalpie spalin na výstupu
$I_{Smin}^t$	[kJ/kg]	Entalpie minimálního objemu suchých spalin pro teplotu $t$
$I_{SPmin}$	[kJ/kg]	Minimální množství spalin
$I_{SP}$	[kJ/kg]	Entalpie spalin
$I_{sp1}$	[kJ/kg]	Entalpie spalin na vstupu
$I_{sp2}$	[kJ/kg]	Entalpie spalin na výstupu
$I_{VZ}$	[kJ/kg]	Entalpie dodaná vzduchem
$I_{VZmin}$	[kJ/kg]	Entalpie minimálního množství vlhkého vzduchu
$k$	[1/m MPa]	Součinitel zeslabení sáláním
$k$	[W/m <sup>2</sup> K]	Součinitel prostupu tepla
$k_k$	[1/m MPa]	Součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi
$k_p$	[1/m MPa]	Součinitel zeslabení sálání popilkovými částicemi
$k_{sp}$	[1/m MPa]	Součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů
$M$	[-]	Součinitel respektující průběh teploty v ohništi
$M_p$	[kg/s]	Množství paliva přivedeného do kotle
$M_{pp}$	[kg/s]	Množství páry
$M_{pv}$	[kg/s]	Množství paliva skutečně spáleného
$M_{v1,2}$	[kg/s]	Velikost vstříku
$n_h$	[-]	Počet hadů
$n_{řad}$	[-]	Počet řad
$n_{tr}$	[-]	Počet trubek
$n_{zav}$	[-]	Počet závěsných trubek
$O_{Ar}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Objem argonu ve spalinách
$O_{CO_2}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Objem oxidu uhličitého ve spalinách
$O_{H_2Omin}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Minimální objem vodní páry
$O_{H_2O}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Skutečné množství vodní páry
$O_{N_2}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Objem dusíku ve spalinách
$O_{O_2min}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Minimální množství kyslíku ke spálení 1 kg paliva
$O_{SO_2}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Objem oxidu siřičitého ve spalinách
$O_{sp}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Skutečné množství spalin
$O_{SPc}$	[kJ/kgK]	Střední celkové měrné teplo spalin
$O_{SPmin}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Minimální množství vlhkých spalin
$O_{SPmin}^S$	[m <sup>3</sup> /kg]	Minimální množství suchých spalin
$O_{SPmin}^{SV}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Minimální množství vlhkých spalin při použití suchého vzduchu
$O_{stř}$	[m]	Střední obvod kanálu pro II. a III. tah
$O_{VZ}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Skutečné množství vzduchu
$O_{VZmin}$	[m <sup>3</sup> /kg]	Minimální množství vlhkého vzduchu ke spálení 1 kg paliva
$O_{VZmin}^S$	[m <sup>3</sup> /kg]	Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg paliva
$p$	[MPa]	Tlak ve spalovací komoře
$p_{1,2}$	[MPa]	Tlak páry na vstupu a výstupu

$p_{12}$	[MPa]	Střední tlak páry
$p''$	[MPa]	Absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti
$p_c$	[MPa]	Absolutní tlak vlhkého vzduchu
$p_{nv}$	[MPa]	Tlak napájecí vody
$P_r$	[-]	Prandtlovo číslo
$p_{sp}$	[MPa]	Parciální tlak tříatomových plynů
$q$	[-]	Střední zatížení stěn ohniště
$Q$	[kW]	Teplo odebrané konkrétní teplosměnou plochou
$Q_c$	[kW]	Celkové teplo dodané ohništi
$Q_i^r$	[kJ/kg]	Výhřevnost paliva
$Q_p$	[kW]	Teplo vzniklé spálením paliva
$Q_p^p$	[kJ/kg]	Celkové teplo přivedené do kotle
$Q_s$	[kJ/kg]	Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn
$Q_{sp1}$	[kW]	Teplo spalin na vstupu
$Q_{sp2}$	[kW]	Teplo spalin na výstupu
$Q_v$	[MW]	Výrobní teplo páry (tepelný výkon kotle)
$Q_{VZmin}^S$	[m <sup>3</sup> /kg]	Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg paliva
$Q_{VZ}$	[kJ/kg]	Teplo přivedené do kotle se vzduchem
$R$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha hořící vrstvy paliva na roštu
$r_{CO_2}$	[-]	Objemové části tříatomových plynů
$r_{H_2O}$	[-]	Objemová část vodní páry ve spalinách
$r_{NO_2}$	[-]	Objemové části tříatomových plynů
$R_{RO_2}$	[-]	Objemové části tříatomových plynů
$r_{sp}$	[-]	Součet objemových částí tříatomových plynů
$s$	[m]	Účinná tloušťka sálavé vrstvy
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha výparných ploch
$S_{id}$	[m <sup>2</sup> ]	Potřebná ideální plocha
$S_{kom}$	[m <sup>2</sup> ]	Rozměr vstupní a výstupní komory
$S_{teor}$	[m <sup>2</sup> ]	Teoretický plošný průřez spalin
$s_1$	[m]	Příčná rozteč
$s_2$	[m]	Podelná rozteč
$t$	[m]	Tloušťka stěn trubek
$T_a$	[K]	Teplota nechlazeného plamene
$T_0$	[K]	Absolutní teplota spalin na výstupu z ohniště
$t_p$	[°C]	Teplota spalin
$t_{sp1}$	[°C]	Teplota spalin na vstupu
$t_{sp2}$	[°C]	Teplota spalin na výstupu
$t_{stř}$	[°C]	Střední teplota
$T$	[K]	Střední teplota spalin
$t_{syt}$	[°C]	Teplota sytosti
$t_{vz}$	[°C]	Teplota nasávaného vzduchu
$T_z$	[K]	Absolutní teplota zaprášeného povrchu stěn

$v_{1,2}$	[ $m^3/kg$ ]	Měrný objem na vstupu a výstupu
$v_{12}$	[ $m^3/kg$ ]	Střední měrný objem
$V_{H_2O}$	[%]	Objem vodní páry na 1 $m^3$ suchého vzduchu
$V_o$	[ $m^3$ ]	Aktivní objem ohniště
$V_{sp}$	[ $m^3/kg$ ]	Průtok spalin
$w_p$	[m/s]	Rychlost páry
$w_{sp}$	[m/s]	Rychlost spalin
$w_v$	[m/s]	Rychlost vody
$x$	[-]	Úhlový součinitel
$X_i$	[%]	Podíl popela z celkového množství v palivu
$x_o$	[-]	Poměrná výška maximální hodnoty teploty plamene
$x_p$	[%]	Procento popela v úletu
$x_{st}$	[-]	Úhlový součinitel
$X_{\dot{u}}$	[%]	Podíl popela v úletu
$z_c$	[%]	Ztráta mechanickým nedopalem
$z_{co}$	[%]	Ztráta chemickým nedopalem
$z_f$	[%]	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
$z_k$	[%]	Ztráta komínová
$z_{so}$	[%]	Ztráta sdílením tepla do okolí
$z$	[%]	Celkové ztráty
$\Delta i$	[kJ/kg]	Rozdíl entalpií média
$\Delta p$	[MPa]	Tlakové ztráty v teplosměnných plochách
$\Delta t$	[°C]	Střední logaritmická teplota
$\Delta t_{sp}$	[°C]	Rozdíl teplot

### Řecké symboly

$\alpha$	[-]	Přebytek vzduchu
$\alpha_c$	[W/ $m^2K$ ]	Součinitel přestupu tepla ze spalin do stěny
$\alpha_2$	[W/ $m^2K$ ]	Součinitel přestupu tepla ze stěny do média
$\alpha_k$	[W/ $m^2K$ ]	Součinitel přestupu tepla konvekcí
$\alpha_s$	[W/ $m^2K$ ]	Součinitel přestupu tepla sáláním
$\varepsilon$	[-]	Součinitel znečištění výhřevné plochy
$\varepsilon_o$	[-]	Výchozí součinitel zanesení
$\eta_k$	[%]	Tepelná účinnost kotle
$\vartheta_0$	[°C]	Konečná teplota
$\vartheta_a$	[°C]	Teoretická teplota
$\varphi$	[%]	Relativní vlhkost vzduchu
$\varphi$	[-]	Součinitel uchování tepla
$\lambda$	[W/mK]	Součinitel tepelné vodivosti
$\mu$	[g/ $m^3$ ]	Koncentrace popílku ve spalinách
$\nu$	[ $m^2/s$ ]	Součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu
$\xi$	[-]	Součinitel využití



$\theta_0$	[°C]	Poměrná teplota spalin
$\sigma_1$	[-]	Poměrná příčná rozteč
$\sigma_2$	[-]	Poměrná podélná rozteč
$\phi$	[%]	Relativní vlhkost vzduchu
$\phi$	[-]	Součinitel uchování tepla
$\chi_1$	[-]	Součinitel závislý na druhu paliva
$\chi_2$	[-]	Součinitel závislý na způsobu spalování
$\psi$	[-]	Součinitel tepelné efektivity

## **20 Seznam příloh**

Schéma parního kotle- formát A1