



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**NÁVRH ROŠTOVÉHO KOTLE S PŘIROZENOU
CIRKULACÍ NA SPALOVÁNÍ RDF**

DESIGN OF STEAM BOILER WITH GRATE FIRING BURNING RDF

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Mykhailo Basov

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: Bc. Mykhailo Basov
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
Akademický rok: 2016/17

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

Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování RDF

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhnete roštový kotel s přirozenou cirkulací na spalování tříděného odpadu – RDF.

parametry kotle: výkon kotle 55,5 t/h, tlak přehřáté páry 4,0 MPa, teplota přehřáté páry 400 °C, teplota napájecí vody 125 °C

Výhřevnost paliva 19 MJ/kg. Další parametry bud specifikovány při konzultacích.

Cíle diplomové práce:

Provedte:

- Koncepční návrh kotle
- Tepelný, aerodynamický a hydraulický výpočet kotle
- Projekční výkres kotle s uvedením rozměrů hlavních částí, rozložení a řešení teplosměnných ploch

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

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

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

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

VILIMEC, Ladislav. Stavba kotlů II. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1716-3.

VILIMEC, Ladislav. Stavba kotlů I. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0076-4.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem parního kotle na spalování tříděného odpadu. S ohledem na požadované výstupní parametry páry a zadané palivo byl postupně proveden: tepelný výpočet kotle, který spočívá v koncepčním návrhu kotle, detailním návrhu a výpočtu teplosměnných ploch; hydraulický a aerodynamický výpočty kotle.

KLÍČOVÁ SLOVA

parní kotel, tříděný odpad, teplosměnné plochy, ekonomizér, výparník, přehřívák

ABSTRACT

This thesis deals with a project of steam boiler to combustion of refused-derived fuel. Considering the required fuel and output parameters of the steam was made the thermal calculation of boiler with its design and an individual calculation of heat exchange surfaces; hydrodynamic and aerodynamic calculations of the steam boiler.

KEY WORDS

steam boiler, refuse-derived fuel, heat exchange surfaces, economizer, evaporator, superheater

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BASOV, M. *Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování RDF*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 158 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Marka Baláše Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2017

.....

Bc. Mykhailo Basov

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji mému vedoucímu diplomové práce Ing. Markovi Balášovi Ph.D. za za přínosné konzultace, cenné rady a připomínky při tvorbě této práce a své rodině za podporu při studiích.

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**OBSAH**

1. ÚVOD	12
1.1 Produkce, využití a odstranění odpadů	12
1.2 Tříděný odpad	13
2. STECHIOMETRICKÉ VÝPOČTY	15
2.1 Minimální objemy vzduchu a spalin	16
2.2 Entalpie vzduchu a produktů spalování	19
3. TEPELNÁ BILANCE KOTLE	22
3.1 Teplo přivedené do kotle	22
3.2 Tepelné ztráty a účinnost kotle	23
3.2.1 Ztráta hořlavinou ve spalinách (chemický nedopal)	23
3.2.2 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)	23
3.2.3 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	24
3.2.4 Ztráta sdílením tepla do okolí	24
3.2.5 Ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta)	25
3.3 Tepelná účinnost kotle	25
3.4 Výrobní teplo páry a množství paliva	26
3.4.1 Výrobní teplo páry	26
3.4.2 Množství paliva	26
4. KONSTRUKČNÍ NÁVRH OHNIŠTĚ A MŘÍŽE	27
4.1 Návrh velikosti ohniště	27
4.2 Návrh mříže	30
5. TEPELNÝ VÝPOČET OHNIŠTĚ	31
5.1 Součinitel M	32
5.2 Boltzmannovo číslo	32
6. TEPELNÝ NÁVRH JEDNOTLIVÝCH VÝHŘEVNÝCH PLOCH	37
6.1 Tlakové ztráty v jednotlivých výhřevných plochách	37
6.2 Rozvržení tepelného výkonu kotle na jednotlivé plochy	37
6.2.1 Přehřívák P3	38
6.2.2 Přehřívák P2	38
6.2.3 Přehřívák P1	40
6.2.4 Závěsné trubky	42

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

6.2.5	Výparník.....	42
6.2.6	Ekonomizér	43
6.2.7	Celkové potřebné teplo.....	44
6.3	Pilový diagram	45
7.	TEPELNÝ VÝPOČET MŘÍŽE	46
7.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	47
7.2	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin	48
7.3	Součinitel prostupu tepla	49
7.4	Teplo odebrané mříží	50
7.5	Kontrola teploty spalin na výstupu z mříže	51
8.	TEPELNÝ VÝPOČET II. TAHU	52
8.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	54
8.2	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin	54
8.3	Součinitel prostupu tepla	56
8.4	Teplo odebrané ii. tahem	56
8.5	Kontrola teploty spalin na výstupu z ii. tahu	57
9.	TEPELNÝ VÝPOČET III. TAHU	58
9.1	OBRATOVÁ KOMORA	58
9.1.1	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	60
9.1.2	Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin.....	60
9.1.3	Součinitel prostupu tepla.....	62
9.1.4	Teplo odebrané obrotovou komorou.....	62
9.1.5	Kontrola teploty spalin na výstupu z obrátové komory	63
9.2	ÚSEK 1	64
9.2.1	Membránová stěna	65
9.2.2	Přehřívák P3	69
9.2.3	Závěsné trubky	75
9.2.4	Kontrola spalin na výstupu z ÚSEKU 1.....	78
9.3	ÚSEK 2.....	79
9.3.1	Membránová stěna	80
9.3.2	Přehřívák P2	84
9.3.3	Závěsné trubky	90
9.3.4	Kontrola spalin na výstupu z ÚSEKU 2.....	93

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

9.4 ÚSEK 3	94
9.4.1 Membránová stěna	95
9.4.2 Přehřívák P1	99
9.4.3 Závěsné trubky	105
9.4.4 Kontrola spalin na výstupu z ÚSEKU 3.....	108
10.TEPELNÝ VÝPOČET IV. A V. TAHU	109
10.1 OHŘÍVÁK VODY	111
10.1.1 Rychlost proudění vody:	112
10.1.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	113
10.1.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin.....	114
10.1.4 Součinitel prostupu tepla	115
10.1.5 Kontrola teploty spalin na výstupu z V. tahu	116
11. KONTROLA TEPELNÉ BILANCE KOTLE.....	117
12. KONTROLA CHLÓROVÉ KOROZE V OBLASTI PŘEHŘÍVÁKŮ PÁRY	118
13. NÁVRH ROZMĚRŮ BUBNŮ A JEJICH KONTROLA	119
14.NÁVRH ZAVODŇOVACÍCH A PŘEVÁDĚCÍCH POTRUBÍ	120
14.1 Návrh rozměrů a počtu zavodňovacích potrubí.....	121
14.2 Návrh rozměrů a počtu převáděcích potrubí.....	121
15. HYDRAULICKÝ VÝPOČET KOTLE.....	122
15.1 Tlaková ztráta v přehříváku P3	122
15.2 Tlaková ztráta v přehříváku P2	124
15.3 Tlaková ztráta v přehříváku P1	127
15.4 Tlaková ztráta v ohříváku vody	129
15.5 Tlaková ztráta v závěsných trubkách.....	131
15.6 Porovnání skutečných a zvolených hodnot tlakových ztrát.....	133
16. AERODYNAMICKÝ VÝPOČET KOTLE	134
16.1 Výstup z ohniště (mříž).....	135
16.2 II. TAH.....	136
16.2.1 Místní odpor při změně směru proudu na výstupu z mříže.....	136
16.2.2 Tlaková ztráta třením po délce kanalů	137
16.2.3 Místní odpor při změně směru proudu na výstupu z II. Tahu	138
16.2.4 Vztlak II. Tahu	138
16.2.5 Celková tlaková ztráta II. Tahu	138

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

16.3 III. TAH	139
16.3.2 Tlaková ztráta při obtekání svazku přehřívaků P3	140
16.3.3 Tlaková ztráta při obtekání svazku přehřívaků P2	140
16.3.4 Tlaková ztráta při obtekání svazku přehřívaků P1	141
16.3.5 Vztlak III. Tahu	142
16.3.6 Celková tlaková ztráta III. Tahu.....	142
16.4 IV. TAH	142
16.4.1 Místní odpor při změně směru proudu na vstupu a výstupu z IV. Tahu	142
16.4.2 Tlaková ztráta při obtekání svazku ohřívaků vody EKO	143
16.4.3 Vztlak IV. Tahu.....	143
16.4.4 Celková tlaková ztráta IV. Tahu	144
16.5 V. TAH	144
16.5.1 Místní odpor při změně směru proudu na vstupu a výstupu z III. Tahu	144
16.5.2 Tlaková ztráta při obtekání svazku ohřívaků vody EKO	145
16.5.3 Vztlak V. Tahu	145
16.5.4 Celková tlaková ztráta V. Tahu.....	146
16.6 Tahová ztráta kotle.....	146
16.7 Návrh komína, přirozený tah	147
16.6.1 Teplota v ústí komína.....	147
16.6.2 Geometrický návrh komína	147
16.6.3 Celkový statický tlak.....	148
16.6.4 Tlakové ztráty při průchodu spalin komínem.	149
16.6.5 Úžitečný tah komína.....	150
16.8 Celková tahová ztráta kotle.....	150
17. ZÁVĚR	151
18. POUŽITÁ LITERATURA	152
19. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	153
20. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	156
21. SEZNAM PŘÍLOH	158

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**1. ÚVOD**

Cílem této diplomové práce je návrh bubnového parního kotle s přirozenou cirkulací s parním výkonem 55,5 t/h. Parametry výstupní přehřáté páry jsou tlak 4 MPa, teplota 400 °C a teplota napájecí vody 125 °C. Palivem je tříděný odpad, který je dán prvkovým rozbořem.

Tato diplomová práce se skládá z tepelného, aerodynamického a hydraulického výpočtu kotle.

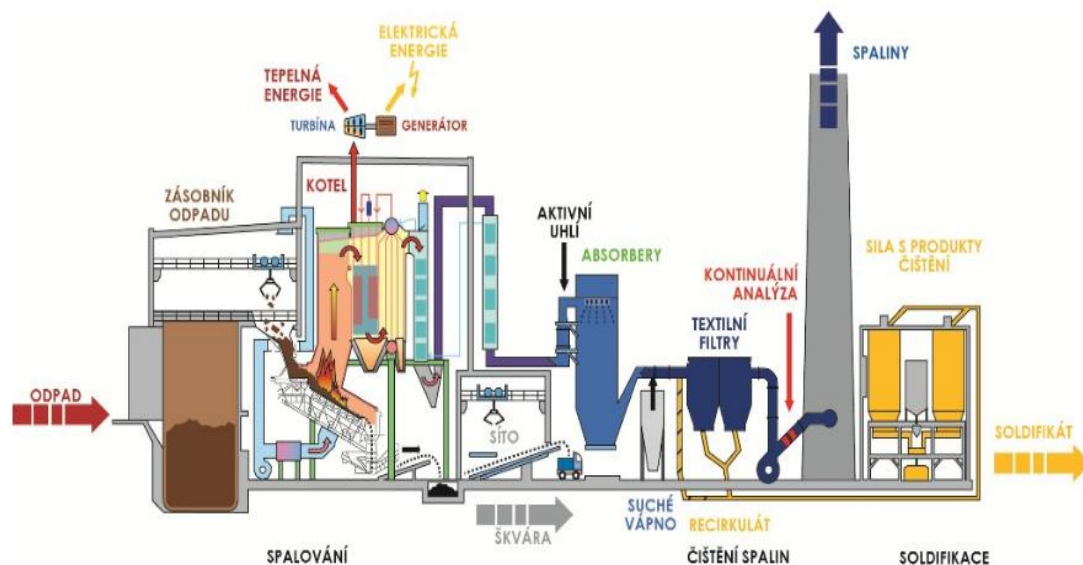
V tepelném výpočtu je proveden návrh konstrukčního uspořádání kotle a výpočty jednotlivých dílů: výparník; přehřívák P3, P2, P1; ohřívák vody (ekonomizér).

V Následujících kapitolách jsou provedeny aerodynamický a hydraulický výpočty kotle ve kterých jsou uvedeny výpočty táhové a tlakové ztráty kotle.

1.1 PRODUKCE, VYUŽITÍ A ODSTRANĚNÍ ODPADŮ

V roce 2015 bylo nakládáno celkem s 34,2 milionu tun odpadu. Z tohoto množství bylo 15 mil. tun využito (43,4 %), 5 mil. tun odstraněno (13,3 %) a s 15 mil. tunami odpadu bylo nakládáno ostatními způsoby nakládání (43,4 %). Celkové množství odpadu, s nímž bylo nakládáno, oproti roku 2014 vzrostlo o 11 % [1].

V Evropě je v provozu přes 340 spaloven a dalších 60 až 80 se připravuje nebo staví. Při vzájemném srovnání Švýcarsko, Německo, Nizozemsko, Švédsko a Belgie téměř veškerý odpad po materiálovém využití spalují. Podobně na tom je Dánsko a Rakousko. Česká republika má v provozu tři velké spalovny komunálního odpadu, které jsou v Praze, v Brně a v Liberci. Příklad technologického procesu spalovny uveden na obrázku (1).



Obrázek 1 Technologický proces spalovny SAKO Brno [3].

V Evropské unii se v roce 2006 z 60 mil. tun zbytkového, tedy směšného odpadu vyrobilo 58,5 mld. kWh tepla a toto zajistilo zásobování 13,4 mil. domácností, a také 23,4 mld. kWh elektřiny, kterou se obsloužilo 7 mil. Domácností [2].

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**1.2 TŘÍDĚNÝ ODPAD**

Energetické využívání odpadů (EVO) znamená využití uvolněné tepelné energie ze spalování odpadu k výrobě tepelné a elektrické energie. Ve spalovnách lze využít jednak neupravený směsný komunální odpad (SKO), jak jeobvyklé například v ČR, nebo tříděný odpad. Tento upravovaný odpad je též nazývaný zkratkou RDF (refuse derived fuel).

SKO má oproti RDF nižší výhřevnost a vyšší popelnatost. Srovnání vlastností netříděného odpadu a RDF paliva je pro představu uvedeno v tab. (1).

Tabulka 1 Porovnání vybraných vlastností SKO a RDF (hodnoty jsou pouze orientační)[4,5]

Parametr/Palivo	SKO	RDF
Výhřevnost [MJ/kg]	7-15	13-19
Vlhkost [%]	15-40	7-35
Popelnatost [%]	20-35	5-20
Obsah síry [%]	0,1-0,5	0,1-0,5
Obsah chloru [%]	0,1-1	0,1-1

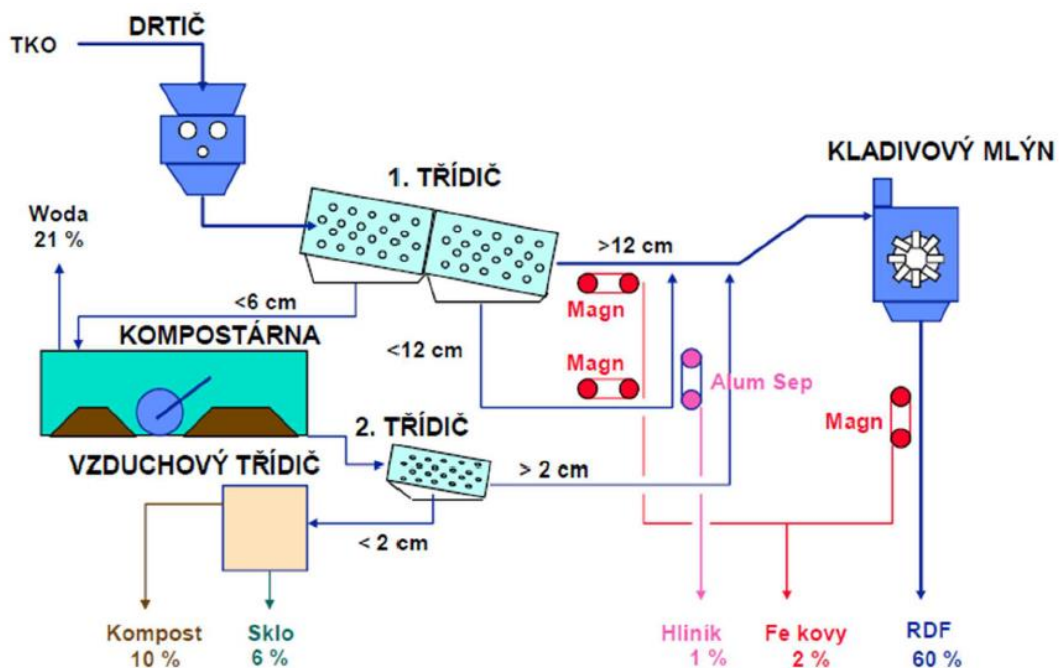
RDF může být produkováno z komunálního odpadu pomocí řady různých operací, přičemž není vždy nutná přítomnost všech následujících kroků:

- Separace u zdroje
- Třídění a mechanická separace
- Redukce velikosti (drcení, sekání, mletí)
- Separace a sítování
- Promíchání
- Sušení a peletizace (zhutňování)
- Balení
- Skladování

Obecně linky na zpracování RDF začínají drcením nebo sítovaním jinak by následná zařízení trpěla nízkou účinností. Nicméně výhodnější je začít sítováním, protože bez tohoto kroku by drtiče trpěly častými odstávkami z důvodu zablokování tvrdých předmětů, které nebyly před drcením odstraněny sítováním, magnetickou separací případně ručním tříděním. Není žádoucí, aby stejné zařízení bylo v procesu zastoupeno vícekrát, protože případný zisk na účinnosti procesu by nevyvážil vyšší ekonomické náklady. Jedinou výjimkou z tohoto pravidla jsou síta, která je vhodné zařadit za každým krokem, zejména za drcením a mletím. Přítomnost mlýna a drtiče není považována za redundantní, protože mlýn zlepšuje redukci velikosti rozdrčených částí. V případě, že je použito mletí přímo bez předdrcení částí je propustnost mlýna nižší a jeho spotřeba energie se zvyšuje. V každém případě by před mlýn měla být zařazena magnetická separace, aby se zabránilo velkému opotřebení mlýna kovovými částmi [6].

Schema úpravy RDF je uvedena na obr (2).

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H



Obrázek 2 Úprava RDF [7]

Vlivem korozních účinků spalin jsou ve spalovnách omezeny parametry generované páry tlakem 4MPa a teplotou 400 °C. Pro vyšší parametry páry je třeba zajistit opatření proti korozi výhřevných ploch kotle.

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TRÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

TEPELNÝ VÝPOČET KOTLE

2. STECHIOMETRICKÉ VÝPOČTY

Všechny hodnoty (objemy a entalpie) jsou vztaženy na 1 kg spáleného tuhého paliva. Ve všech vzorcích je objem při normálních podmínkách, tj. při teplotě 0 °C a tlaku 0,101 MPa. Všechny vzorce jsou odvozeny za předpokladu dokonalého spalování, ale používají se i při malém chemickém nedopalu, který je dán normou kotlových ztrát.

Zadání		
Tlak přehřáté páry	4	MPa
Teplota přehřáté páry	400	°C
Výkon kotle	55/5	t/h
Teplota napájecí vody	125	°C
Složení paliva		
Q_{r_i}	19	MJ/kg
C^{daf}	61,82	%
N^{daf}	1,19	%
S^{daf}	0,29	%
A^d	14,29	%
H^{daf}	8,1	%
O^{daf}	27,4	%
W^r	15	%
Cl^{daf}	1,2	%

Přepočítání složení paliva na původní stav

$$A^r = A^d \cdot (1 - W^r) \quad (2.1)$$

$$A^r = 0,1429 \cdot (1 - 0,15) = 0,1215 [-] = 12,15 [\%]$$

$$C^r = C^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) \quad (2.2)$$

$$C^r = 0,6182 \cdot (1 - 0,121465 - 0,15) = 0,4504 [-] = 45,04 [\%]$$

$$S^r = S^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) \quad (2.3)$$

$$S^r = 0,0029 \cdot (1 - 0,1215 - 0,15) = 0,0021123 [-] = 0,21123 [\%]$$

$$N^r = N^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) \quad (2.4)$$

$$N^r = 0,0119 \cdot (1 - 0,1215 - 0,15) = 0,0087 [-] = 0,87 [\%]$$

$$H^r = H^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) \quad (2.5)$$

$$H^r = 0,081 \cdot (1 - 0,1215 - 0,15) = 0,059 [-] = 5,9 [\%]$$

$$O^r = O^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) \quad (2.6)$$

$$O^r = 0,274 \cdot (1 - 0,1215 - 0,15) = 0,1996 [-] = 19,96 [\%]$$

$$Cl^r = Cl^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) \quad (2.7)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$Cl^r = 0,012 \cdot (1 - 0,1215 - 0,15) = 0,00874[-] = 0,874 [\%]$$

2.1 MINIMÁLNÍ OBJEMY VZDUCHU A SPALIN**Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva**

$$O_{O_2min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O_2^r}{32} \right) \quad (2.8)$$

$$O_{O_2min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{45,04}{12,01} + \frac{5,9}{4,032} + \frac{0,21123}{32,06} - \frac{19,96}{32} \right) = 1,03 [m^3/kg]$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$O_{VSmin} = \frac{100}{21} \cdot O_{O_2min} \quad (2.9)$$

$$O_{VSmin} = \frac{100}{21} \cdot 1,03 = 4,9 [m^3/kg]$$

Podíl vodní páry připadající na 1 m³ suchého vzduchu

$$\chi_v = 1 + \frac{\varphi}{100} + \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} \quad (2.10)$$

$$\chi_v = 1 + \frac{70}{100} + \frac{0,023}{0,101325 - \frac{70}{100} \cdot 0,023} = 1,016 [-]$$

kde φ – relativní vlhkost vzduchu p'' – absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu p_c – celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu**Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva**

$$O_{VVmin} = \chi_v \cdot O_{VSmin} \quad (2.11)$$

$$O_{VVmin} = 1,016 \cdot 4,9 = 4,981 [m^3/kg]$$

Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkého vzduchu potřebném pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$O_{H_2O}^V = O_{VVmin} - O_{VSmin}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

(2.12)

$$O_{H_2O}^V = 4,981 - 4,9 = 0,0805 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

Skutečný objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva**Součinitele přebytku vzduchu $\alpha = 1,3$**

$$O_{VV} = \alpha \cdot O_{Vmin}$$

(2.13)

$$O_{VV} = 1,3 \cdot 4,981 = 6,4755 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

Objemy jednotlivých složek spalinObjem CO₂ ve spalinách:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01 \cdot 100} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{Vmin}$$

(2.14)

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01 \cdot 100} \cdot 45,04 + 0,0003 \cdot 4,9 = 0,8362 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

Objem SO₂ ve spalinách:

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

(2.15)

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,21123}{32,06} = 0,00144 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

Objem N₂ ve spalinách:

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

(2.16)

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{0,87}{28,016} + 0,7805 \cdot 4,9 = 3,832 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

Objem Ar ve spalinách:

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{Vmin}$$

(2.17)

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot 4,9 = 0,045 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Minimální objem suchých spalin**

Minimální objem suchých spalin vznikne dokonalým spálením paliva při minimálním množství vzduchu, tj. bez přebytku vzduchu (při $\alpha = 1$).

$$O_{SSmin} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad (2.18)$$

$$O_{SSmin} = 0,8362 + 0,00144 + 3,832 + 0,045 = 4,715 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H^r}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W^r}{18,016} + O_{H_2O}^V \quad (2.19)$$

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{5,9}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{15}{18,016} + 0,0805 = 0,923 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

Minimální objem vlhkých spalin

$$O_{SVmin} = O_{SSmin} + O_{H_2O}^S \quad (2.20)$$

$$O_{SVmin} = 4,715 + 0,923 = 5,637 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

Objem spalin z 1 kg paliva při spalování s přebytkem vzduchu α

$$O_{SV} = O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin} \quad (2.21)$$

$$O_{SV} = 5,637 + (1,3 - 1) \cdot 4,981 = 7,132 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

Objemové části tříatomových plynů

$$O_{H_2O} = O_{H_2O}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin} \quad (2.22)$$

$$O_{H_2O} = 0,923 + (1,016 - 1) \cdot (1,3 - 1) \cdot 4,9 = 0,9468 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{SV}} \quad (2.23)$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,00144 + 0,8362}{7,132} = 0,1175 \text{ [-]}$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SV}}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

(2.24)

$$r_{H_2O} = \frac{0,9468}{7,132} = 0,133 [-]$$

Součet objemových částí tříatomových plynů

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

(2.25)

$$r_{SP} = 0,1175 + 0,133 = 0,25 [-]$$

Koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r \cdot X_p}{O_{SV} \cdot 100}$$

(2.26)

$$\mu = \frac{10 \cdot 12,15 \cdot 30}{7,132 \cdot 100} = 5,1095 [g/m^3]$$

kde X_p – procento popela v úletu, zvoleno dle doporučení konzultanta . A^r – procento popelovin v původním stavu paliva**2.2 ENTALPIE VZDUCHU A PRODUKTŮ SPALOVÁNÍ**

Vzorové výpočty jsou uvedeny pro teplotu $t = 500$ °C a přebytek vzduchu $\alpha = 1,3$. Výpočty byly provedeny s využitím tabulky s hodnotami měrných entalpií spalin a suchého vzduchu, které jsou zaznamenány v tabulce 2-1. Zbýlé výpočty veličin entalpií jsou uvedeny v tabulce 2. Z těchto vypočtených veličin je zkonstruovaný výsledný I–t diagram spalin a vzduchu, který je znázorněn na obrázku 2.

Entalpie spalin při stechiometrickém spalování ($\alpha = 1$)

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

(2.27)

$$I_{S \min}^t = 0,8362 \cdot 994,4 + 0,00144 \cdot 1070 + 3,832 \cdot 664 + 0,045 \cdot 464,7 + 0,923 \cdot 794,5$$

$$I_{S \min}^t = 4131,47 [kJ/kg]$$

Entalpie minimálního objemu vzduchu při stechiometrickém spalování

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

(2.28)

$$I_{V \min}^t = 4,9 \cdot 684,1 + 0,0805 \cdot 794,5 = 3416,48 [kJ/m^3]$$

Entalpie spalin, které vzniknou spálením 1 kg paliva s přebytkem vzduchu α

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

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

(2.29)

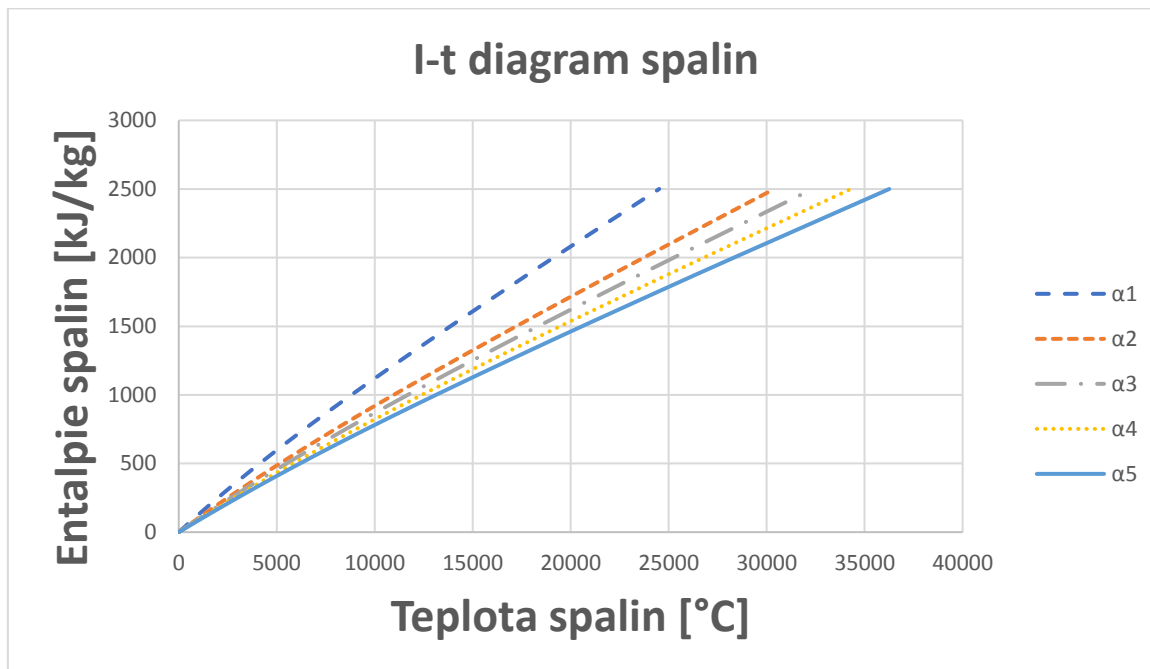
$$I_s^{t,\alpha} = 4131,47 + (1,3 - 1) \cdot 3416,48 = 5156,42 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Tabulka 2 Měrné entalpie jednotlivých složek spalin a suchého vzduchu v závislosti na teplotě

Měrné entalpie složek spalin i_t [kJ/m ³]					
CO ₂	SO ₂	N ₂	Ar	H ₂ O	suchý vzduch
0	0	0	0	0	0
41,62	46,81	32,53	23,32	39,1	32,57
170	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3
357,5	394,1	259,9	186	304,5	266,2
558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5
771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7
994,4	1070	664	464,7	794,5	684,1
1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6
1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1
1705	1801	1093	743,1	1335	1129
1952	2052	1241	835,7	1526	1283
2203	2304	1392	928,2	1723	1439
2458	2540	1544	1020	1925	1597
2716	2803	1698	1114	2132	1756
2976	3063	1853	1207	2344	1916
3239	3323	2009	1300	2559	2077
3503	3587	2166	1393	2779	2240
3769	3838	2325	1577	3002	2403
4305	4363	2643	1742	3458	2732
4844	4890	2965	1857	3925	3065
6205	6205	3778	2321	5132	3909

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H*Tabulka 3 Hodnoty měrných entalpií spalin a vzduchu v závislosti na teplotě*

Teplota [°C]	I_{\min}^{SP} [kJ/kg]	I_{\min}^{VZ} [kJ/kg]	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
			1	1,3	1,4	1,5	1,6
t	$I_t^{\alpha,s}$ [kJ/kg]						
0	0,00	0	0	0	0	0	0
25	196,65	162,76	196,65	245,48	261,75	278,03	294,31
100	781,81	660,48	781,81	979,96	1046,00	1112,05	1178,10
200	1584,77	1329,06	1584,7	1983,48	2116,39	2249,30	2382,20
300	2410,23	2009,76	2410,2	3013,16	3214,13	3415,11	3616,08
400	3259,20	2705,05	3259,2	4070,72	4341,22	4611,73	4882,24
500	4131,47	3416,48	4131,4	5156,42	5498,06	5839,71	6181,36
600	5027,26	4143,55	5027,2	6270,33	6684,68	7099,04	7513,39
700	5944,22	4885,80	5944,2	7409,95	7898,53	8387,11	8875,69
800	6881,89	5640,28	6881,8	8573,97	9138,00	9702,02	10266,0
900	7836,32	6410,35	7836,3	9759,42	10400,4	11041,4	11682,5
1000	8811,13	7190,70	8811,1	10968,3	11687,4	12406,4	13125,55
1100	9797,67	7981,26	9797,6	12192,0	12990,2	13788,3	14586,43
1200	10799,14	8777,13	10799,	13432,3	14309,9	15187,7	16065,42
1300	11810,68	9578,29	11810,	14684,2	15641,9	16599,8	17557,65
1400	12831,32	10384,60	12831,	15946,7	16985,2	18023,6	19062,08
1500	13861,25	11201,11	13861,	17221,6	18341,7	19461,8	20581,92
1600	14907,37	12017,87	14907,	18512,7	19714,5	20916,3	22118,09
1800	17003,06	13666,88	17003,	21103,1	22469,8	23836,5	25203,19
2000	19124,49	15336,38	19124,	23725,4	25259,0	26792,7	28326,32
2500	24514,40	19569,67	24514,	30385,3	32342,2	34299,2	36256,20

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Obrázek 3 I-t diagram vzduchu a spalin pro různé hodnoty přebytku vzduchu α

3. TEPELNÁ BILANCE KOTLE

Slouží k určení účinnosti kotle a spotřeby paliva k dosažení požadovaného výkonu kotle.

3.1 TEPLA PŘIVEZENÉ DO KOTLE

$$Q_p^p = Q_i^r + i_p$$

(3.1)

$$Q_p^p = 19000 + 0 = 19000 \text{ [kJ/kg]}$$

kde Q_i^r - výhřevnost paliva [kJ/kg]

i_p - fyzické teplo paliva [kJ/kg]

Fyzické teplo paliva se uvažuje tehdy, jestliže je palivo předehříváno mimo kotel. V případě, že palivo není předehříváno mimo kotel, tak se fyzické teplo paliva uvažuje, pokud platí nerovnost:

$$W^r \geq \frac{Q_i^r}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$

(3.2)

$$15 \geq \frac{19000}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$

$$15 \geq 30,23$$

Podmínka je nesplněna, tudíž fyzické teplo paliva se neuvažuje ve výpočtu [8].

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**3.2 TEPELNÉ ZTRÁTY A ÚČINNOST KOTLE**

Pro stanovení účinnosti kotle jsem zvolil nepřímou metodu zjišťování účinnosti stanovenou jednotlivými ztrátami kotle.

Při výpočtu se uvažují tyto ztráty:

- ztráta hořlavinou ve spalínách (ztráta chemickým nedopalem)
- ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (ztráta mechanickým nedopalem)
- ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
- ztráta sílením tepla do okolí
- ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta).

3.2.1 ZTRÁTA HOŘLAVINOU VE SPALINÁCH (CHEMICKÝ NEDOPAL)

Při nedokonalém hoření zůstávají ve spalínách spalitelné plyny CO, H₂ a uhlovodíky C_xH_y, které způsobují tuto ztrátu.

Dle doporučení konzultanta diplomové práce volím tuto hodnotu **Z_{CO} = 0,05 %**.

3.2.2 ZTRÁTA HOŘLAVINOU V TUHÝCH ZBYTCÍCH (MECHANICKÝ NEDOPAL)

Ztráta mechanickým nedopalem je způsobena zbytkovým obsahem tuhého uhlíku ve všech formách tuhých zbytků, tj. škvára, úlet a propad.

Ztráta v tuhých zbytcích zachycených v ohništi

$$Z_{cs} = \frac{C_s}{100 - C_s} \cdot \frac{X_s}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{cs} \quad (3.3)$$

$$Z_{cs} = \frac{3}{100 - 3} \cdot \frac{50}{100} \cdot \frac{12,15}{19000} \cdot 32600 = 0,3223 [\%]$$

Ztráta v tuhých zbytcích odcházejících z kotelního zařízení

$$Z_{cr1} = \frac{C_r}{100 - C_r} \cdot \frac{X_r}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{cr} \quad (3.4)$$

$$Z_{cr1} = \frac{30}{100 - 30} \cdot \frac{10}{100} \cdot \frac{12,15}{19000} \cdot 32600 = 0,893 [\%]$$

$Z_{cr1} = 0$, protože zavádíme zpatky do ohniště.

$$Z_{cú} = \frac{C_u}{100 - C_u} \cdot \frac{X_u}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{cú} \quad (3.5)$$

$$Z_{cú} = \frac{25}{100 - 25} \cdot \frac{30}{100} \cdot \frac{12,15}{19000} \cdot 32600 = 2,084 [\%]$$

kde C_i – procento hořlavin v uvažovaném druhu tuhých zbytků (zvoleno na základě doporučení konzultanta)

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

X_i – procento popela v uvažovaném druhu tuhých zbytků (zvoleno na základě doporučení konzultanta)

Q_p^p – teplo přivedené do kotle 1 kg paliva [kJ/kg]

Q_{ci} – výhřevnost hořlaviny uvažovaného druhu tuhých zbytků [kJ/kg]

Celková ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_c = Z_{cs} + Z_{cr} + Z_{cú} \quad (3.6)$$

$$Z_c = 0,3223 + 0,893 + 2,084 = 3,3 \text{ [%]}$$

3.2.3 ZTRÁTA FYZICKÝM TEPEM TUHÝCH ZBYTKŮ

Tato ztráta je způsobena tím, že škvára odcházející z kotle není dokonale vychlazená, tudíž v ní odchází část citelného tepla.

Ztráta fyzickým teplem ve škváře

$$Z_{fs} = \frac{X_s}{100 - C_s} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_s \cdot t_s \quad (3.7)$$

$$Z_{fs} = \frac{60}{100 - 3} \cdot \frac{12,15}{19000} \cdot 0,9 \cdot 400 = 0,1515 \text{ [%]}$$

Ztráta fyzickým teplem v úletu

$$Z_{fú} = \frac{X_ú}{100 - C_ú} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_ú \cdot t_ú \quad (3.8)$$

$$Z_{fú} = \frac{30}{100 - 25} \cdot \frac{12,15}{19000} \cdot 0,8308 \cdot 160 = 0,033 \text{ [%]}$$

kde c_i – měrné teplo tuhých zbytků popela [8]

t_i – teplota uvažovaného druhu tuhých zbytků

Celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = Z_{fs} + Z_{fú} \quad (3.9)$$

$$Z_f = 0,1515 + 0,033 = 0,1855 \text{ [%]}$$

3.2.4 ZTRÁTA SDÍLENÍM TEPLA DO OKOLÍ

Ztráta sdílením tepla do okolí sáláním a vedením je závislá na velikosti kotle a druhu spalovaného paliva.

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Maximální využitelný tepelný výkon:**

$$Q_N = Q_i^r \cdot M_p = 19000 \cdot 2,34 = 40,020 \text{ [MW]} \quad (3.10)$$

Ztrátový výkon (vztah dle konzultace):

$$Q_{RC} = Q_N^{0,7} \cdot C = 40,020^{0,7} \cdot 0,0315 = 0,46 \text{ [MW]} \quad (3.11)$$

$$Z_s = \frac{Q_{RC}}{Q_N} = \frac{0,46}{45,885} = 0,0104 \text{ [-]} \quad (3.12)$$

kde Q_{RC} – ztráty sáláním a konvekci Q_N – maximální využitelný tepelný výkon $C=0,0315$ (hnědé uhlí) Z_s – ztráta sdílením tepla do okolí

$$Z_s = 1,031 \text{ [%]}$$

3.2.5 ZTRÁTA CITELNÝM TEPEM SPALIN (KOMÍNOVÁ ZTRÁTA)

Tato ztráta spočívá v nevyužití energii ve formě tepla, kterou odnášejí plynné spaliny do komína. Je ze všech ztrát nejvýznamnější a nejvíce ovlivňuje výslednou účinnost kotle. Závisí hlavně na teplotě spalin a na přebytku vzduchu ve spalinách za kotlem.

Entalpie spalin při teplotě a přebytku vzduchu za kotlem

$$I_{SP} = 1582,07 \text{ [kJ/kg]}$$

Entalpie vzduchu při teplotě 30°C a přebytku vzduchu za kotlem

$$I_{VZ} = I_{VZmin} \cdot \alpha_k = 195,942 \cdot 1,3 = 254,724 \text{ [kJ/kg]} \quad (3.13)$$

Ztráta citelným teplem spalin

$$Z_k = (100 - Z_c) \cdot \frac{(I_{SP} - I_{VZ})}{Q_p^p} \quad (3.14)$$

$$Z_k = (100 - 3,3) \cdot \frac{(1582,07 - 254,724)}{19000} = 6,755 \text{ [%]}$$

3.3 TEPELNÁ ÚČINNOST KOTLE

$$\eta_k = 100 - \Sigma Z \quad (3.15)$$

$$\eta_k = 100 - Z_{co} - Z_c - Z_f - Z_{sv} - Z_k$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$\eta_k = 100 - 0,05 - 3,3 - 0,1855 - 1,031 - 6,75 = 88,73 \text{ [%]}$$

3.4 VÝROBNÍ TEPLA PÁRY A MNOŽSTVÍ PALIVA**3.4.1 VÝROBNÍ TEPLA PÁRY**

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) \quad (3.16)$$

$$Q_v = 15,42 \cdot (3214,4 - 528,5) = 41408 \text{ [kW]}$$

kde M_{pp} – parní výkon kotle [kg/s]

i_{pp} – entalpie přehřáté páry při tlaku 4 [MPa] a teplotě 400 [°C]

i_{nv} – entalpie napájecí vody při tlaku 5,15 [MPa] a teplotě 125 [°C]

3.4.2 MNOŽSTVÍ PALIVA

Palivo přivedené do kotle

$$M_{pal} = \frac{Q_v}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_k}{100}} \quad (3.17)$$

$$M_{pal} = \frac{41408}{19000 \cdot \frac{88,73}{100}} = 2,46 \text{ [kg/s]}$$

Palivo skutečně spálené

$$M_{pv} = M_{pal} \cdot \left(1 - \frac{Z_c}{100}\right) \quad (3.18)$$

$$M_{pv} = 2,46 \cdot \left(1 - \frac{3,3}{100}\right) = 2,375 \text{ [kg/s]}$$

Tabulka 4 Souhrn vypočtených hodnot pro tepelnou bilanci kotle

Souhrn vypočtených hodnot			
Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Ztráta chemickým nedopalem	Z_{CO}	0,5	%
Ztráta mechanickým nedopalem	Z_C	3,3	%
Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	Z_f	0,1855	%
Ztráta sílením tepla do okolí	Z_S	1,031	%
Ztráta citelným teplem spalin	Z_K	6,75	%
Tepelná účinnost kotle	η_k	88,73	%
Palivo přivedené do kotle	M_{pal}	2,46	kg/s
Palivo skutečně spálené	M_{pv}	2,375	kg/s

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**4. KONSTRUKČNÍ NÁVRH OHNIŠTĚ A MŘÍŽE****4.1 NÁVRH VELIKOSTI OHNIŠTĚ**

Velikost a rozměry ohniště jsou odvozeny z tepelného zatížení roštu, které bylo dle doporučení konzultanta zvoleno $q_r = 1,8 \text{ MW/m}^2$.

Tepelné zatížení roštu

$$q_r = \frac{M_{pal} \cdot Q_i^r}{S_r} \quad (4.1)$$

$$S_r = \frac{M_{pal} \cdot Q_i^r}{q_r} = \frac{2,46 \cdot 19}{1,8} = 25,93 \text{ [m}^2\text{]}$$

Z takto vypočtené plochy roštu byla navržena délka a šířka roštu, následně délka a šířka ohniště.

Výška ohniště byla zvolena 17 m s ohledem na požadovanou teplotu na konci ohniště ϑ_o .

Tato teplota by měla být pokud možno tak nízká, aby ve druhém tahu již nehrozila chlorová koroze a aby nebylo nutné membránovou stěnu ve II. tahu opatřovat návarem Inconelu. Teplota spalin na výstupu z ohniště $934,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

Chlórová koroze

Molární hmotnosti: $M_{m,Cl} = 35,45 \text{ [kg/mol]}$, $M_{m,S} = 32,066 \text{ [kg/mol]}$.

Poměr obsahu síry a chlóru

$$\frac{S}{Cl} = \frac{0,0066}{0,025} = 0,27 \text{ [-]} \quad (4.2)$$

Obsah síry

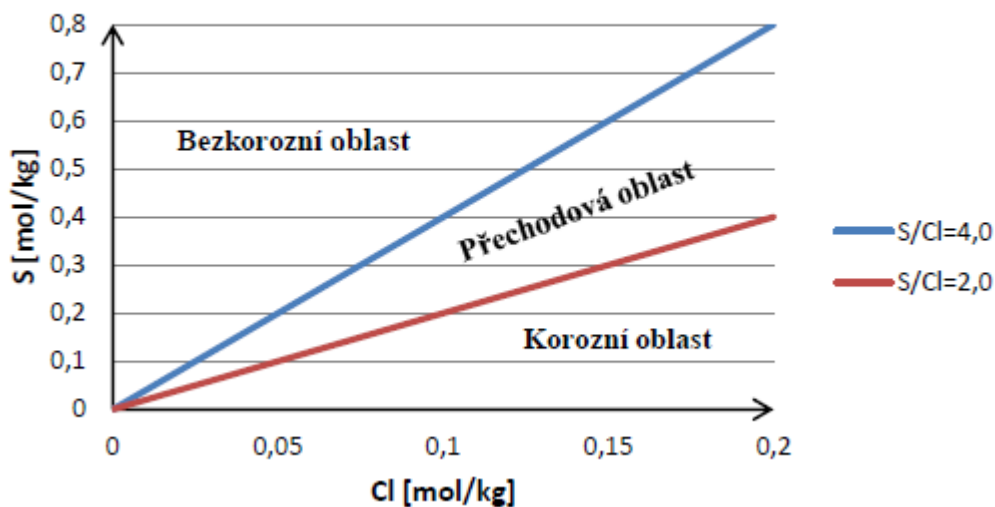
$$S = \frac{1}{M_{m,S}} \cdot S^r = \frac{1}{32,066} \cdot 0,211 = 0,0066 \text{ [mol/kg]} \quad (4.3)$$

Obsah chlóru

$$Cl = \frac{1}{M_{m,Cl}} \cdot Cl^r = \frac{1}{35,45} \cdot 0,874 = 0,025 \text{ [mol/kg]} \quad (4.4)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

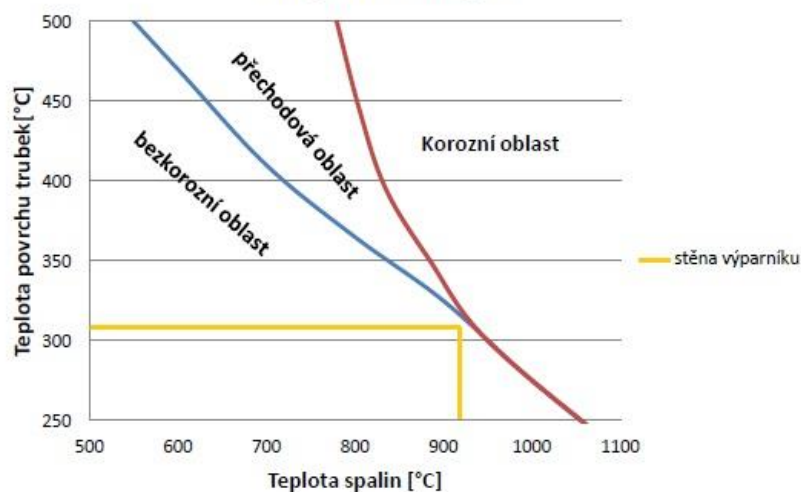
Diagram chlorové koroze



Obrázek 4 Korozní diagram

Na základě (4.2) a obr. (4) je patrné, že se nacházíme v přechodové oblasti. Z tohoto důvodu je nutné využít Flingernův diagram, podle kterého určíme, zda je potřebná antikoroziční ochrana.

Flingernův diagram

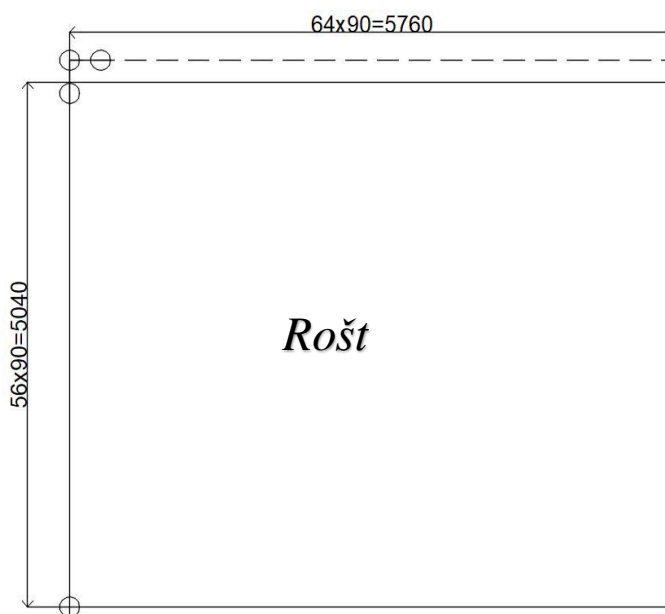


Obrázek 5 Flingernův diagram

Dle obrázku (5) je patrné, že ve II. tahu není nutné membránové stěny chránit žádným opatřením proti chlоровé korozi.

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H*Tabulka 5 Rozměry spalovací komory*

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Rozměry roštu			
Šířka roštu	b_r	4,75	m
Délka roštu	a_r	5,458	m
Rozměry spalovací komory			
Šířka ohniště	b_{oh}	5,04	m
Délka ohniště	a_{oh}	5,76	m
Výška ohniště	h_{oh}	17	m

*Obrázek 6 Spalovací komora***Střední teplota spalin při průchodu I. Tahem**

$$t_{str} = \frac{\vartheta_a + \vartheta_0}{2} \quad (4.5)$$

$$t_{str} = \frac{1650,4 + 934,9}{2} = 1292,64 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

kde ϑ_a - adiabatická teplota v ohništi
 ϑ_0 - teplota na konci ohniště

Kontrolní výpočet rychlosti spalin v I. Tahu

$$w_{sp} = \frac{O_{sv} \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{273,15} \cdot M_{pv}}{a_{oh} \cdot b_{oh}} \quad (4.6)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$w_{sp} = \frac{7,132 \cdot \frac{1292,64 + 273,15}{273,15} \cdot 2,375}{5,04 \cdot 5,76} = 3,35 \text{ [m/s]}$$

Doba setrvání spalin na požadované teplotě:

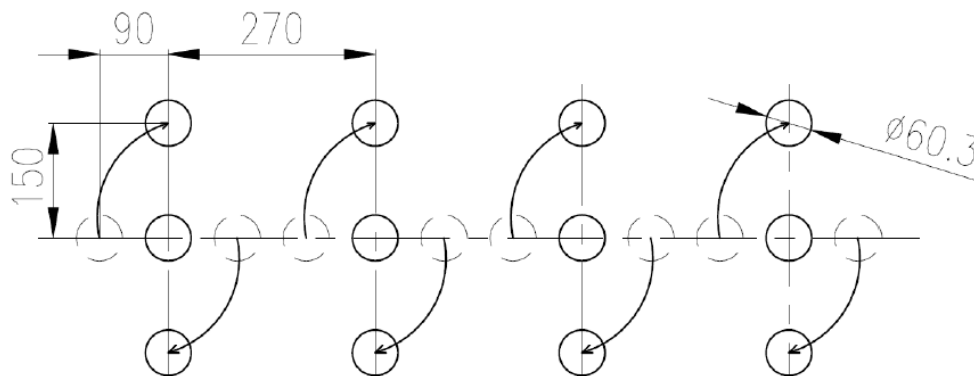
V provozních podmínkách spaloven odpadu je vyžadováno, aby teplota spalin setrvala na minimální teplotě 850°C po dobu alespoň 2 sekundy. Spaliny procházejí I. tahem 5 s, přičemž teplota na konci ohniště dosahuje hodnoty 934,9 °C. Tato provozní podmínka je tedy splněna.

$$t = \frac{h}{w_{sp}} \quad (4.7)$$

$$t = \frac{17}{3,35} = 5,08 \text{ s}$$

4.2 NÁVRH MŘÍŽE

Mříž je tvořena rozvolněnými trubkami výparníku v přechodové části kotle mezi I. a II. tahem. Konstrukčně je provedena podle obr. (7). Každá třetí trubka zůstane na svém místě a její sousední trubky se vyhnou před ni, resp. za ni. Vznikne tak dostatečně velký průřez pro průtok spalin do II. tahu požadovanou rychlostí 7 m/s. Kontrola rychlosti byla provedena pro navrženou výšku mříže 2,7 m.



Obrázek 7 Konstrukční provedení mříže

Průtočný průřez spalin mříží

$$F_m = v_m \cdot b_{oh} - v_m \cdot n_m^{tr} \cdot D_m \quad (4.8)$$

$$F_m = 2,7 \cdot 5,04 - 2,7 \cdot 18 \cdot 0,0603 = 10,7 \text{ [m}^2\text{]}$$

kde v_m – výška mříže [m]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H b_{oh} – šířka mříže [m] n_m^{tr} – počet výparnickových trubek v jedné řadě D_m – vnější průměr výparnickových trubek [m]**Střední teplota spalin procházející přes mříž**

$$t_{str} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} \quad (4.9)$$

$$t_{str} = \frac{934,9 + 903,7}{2} = 919,303 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Kontrola rychlosti spalin při průchodu mříží

$$w_{sp} = \frac{O_{sv} \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{273,15} \cdot M_{pv}}{F_m} \quad (4.10)$$

$$w_{sp} = \frac{7,132 \cdot \frac{919,303 + 273,15}{273,15} \cdot 2,375}{10,7} = 6,93 \text{ [m/s]}$$

Rychlost proudění spalin přes mříž vyhovuje.

5. TEPELNÝ VÝPOČET OHNIŠTĚ

Tento výpočet je založen na použití teorie podobnosti v tepelných procesech ve spalovací komoře. Použité vzorce pro výpočet zahrnují závislosti poměrné teploty spalin na výstupu z ohniště s číslem Boltzmannova Bo , stupněm černosti ohniště a_o a součinitelem M , charakterizující průběh teploty po výšce ohniště, a to poměrnou výšku ohniště, ve které se nachází maximální hodnota teploty plamene. [8]

$$\Theta_o = \frac{T_o}{T_a} = \frac{1}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{Bo}\right)^{0,6}} \quad (5.1)$$

kde T_o - absolutní teplota spalin na výstupu z ohniště [K] T_o - teoretická teplota při spalování (teplota při adiabatickém spalování) [K] M – součinitel, charakterizující průběh teploty po výšce ohniště a_o - stupeň černosti ohniště Bo – Boltzmannovo číslo

Teoretická teplota ϑ_a [$^\circ\text{C}$] 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 α_o . [8]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Některé veličiny jsou však závislé na teplotě ϑ_0 , a proto je výpočet třeba provádět iteračně. Nejprve je tedy nutné si teplotu ϑ_0 zvolit a podle ní potřebné veličiny dopočítat (teplota byla zvolena 934,9 °C). Pokud se výsledná teplota ϑ_0 liší od zpočátku zvolené teploty o více než 20 °C, výpočet se musí opakovat, dokud není podmínka splněna.

Teplota spalin na výstupu z ohniště

$$\vartheta_o = \frac{v_a + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{Bo}\right)} - 273,15 \quad (5.2)$$

$$\vartheta_o = \frac{1650,4 + 273,15}{1 + 0,59 \cdot \left(\frac{0,812}{0,807}\right)^{0,6}} - 273,15 = 934,905 \text{ °C}$$

kde ϑ_a - teoretická teplota při spalování (teplota při adiabatickém spalování) [°C]

M – součinitel, charakterizující průběh teploty po výšce ohniště

a_o - stupeň černosti ohniště

Bo – Boltzmannovo číslo

Teoretická teplota ϑ_a se určí z užitečného tepla uvolněného při spalování I_u [kJ/kg], podle tab. 2-2.

5.1 Součinitel M

Určí se v závislosti na poměrné výšce maximální hodnoty teploty plamene x_o . Pro spalování paliv v roštových ohništích platí vztah:

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot x_o \quad (5.3)$$

$$M = 0,59$$

Kde x_o - poměrná výška maximální hodnoty teploty plamene; U roštových ohnišť s tenkou vrstvou $x_o = 0$.

5.2 Boltzmannovo číslo

$$Bo = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp}} \cdot c}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \overline{\psi} \cdot F_{st} \cdot T_a^3} \quad (5.4)$$

$$Bo = \frac{0,9882 \cdot 2,375 \cdot 12,556}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,212 \cdot 425,26 \cdot 1923,54^3} = 0,807 [-]$$

kde φ - součinitel uchování tepla

M_{pv} - množství paliva skutečně spáleného [kg / s]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$\overline{O_{sp} \cdot c}$ - střední celkové měrné teplo spalin

$\overline{\psi}$ - střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn

F_{st} - celkový povrch stěn ohniště [m^2]

T_a - teoretická teplota plamene [K]

$5,7 \cdot 10^{-11}$ - Boltzmannova konstanta sálání absolutně černého tělesa [$kW / m^2 K^4$]

Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{z_{sv}}{\eta_k + z_{sv}} \quad (5.5)$$

$$\varphi = 1 - \frac{1,04}{88,73 + 1,04} = 0,9882[-]$$

kde z_{sv} - ztráta sáláním do okolí

η_k - účinnost kotle

Střední celkové měrné teplo spalin

$$\overline{O_{sp} \cdot c} = \frac{I_u - I_0}{\vartheta_a - \vartheta_0} \quad (5.6)$$

$$\overline{O_{sp} \cdot c} = \frac{19165,32 - 10181,336}{1650,4 - 934,9} = 12,556 [kJ/kg \cdot K]$$

kde I_u - teplo uvolněné ve spalovací komoře a jemu odpovídající adiabatická teplota plamene
 ϑ_a z I-t diagramu spalin pro přebytek vzduchu na výstupu z ohniště.

I_0 - entalpie spalin na výstupu z ohniště [kJ/kg]

ϑ_0 - teplota spalin na výstupu z ohniště [°C]

Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{(100 - Z_{co} - Z_f - Z_c)}{(100 - Z_c)} + Q_{vz} \quad (5.7)$$

$$I_u = 19000 \cdot \frac{(100 - 0,05 - 0,1855 - 3,3)}{(100 - 3,3)} + 211,6 = 19165,32 [kJ/kg]$$

kde Q_{vz} - teplo dodané vzduchem

Q_p^p - teplo vzniklé spálením paliva

Teplo dodané vzduchem

$$Q_{vz} = \alpha_k \cdot I_{vzmin} = 1,3 \cdot 162,76 = 211,6 kJ/kg$$

kde α_k - přebytek vzduchu za kotlem

I_{vzmin} - entalpie vzduchu při teplotě 25 [°C], z tab. 2-2.

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Součinitel tepelné efektivity stěn**

$$\bar{\psi} = \frac{\sum x_i \cdot \xi_i \cdot F_{STi}}{F_{ST}} \quad (5.8)$$

$$\bar{\psi} = \frac{1 \cdot 0,15 \cdot 337,91 + 1 \cdot 0,45 \cdot 87,35}{425,26} = 0,21 [-]$$

$$\bar{\psi} = 1 \cdot 0,15 = 0,15$$

kde x_i - úhlový součinitel

ξ_i - součinitel zanešení stěn ohniště

Stěny zakryté obezdivkou

$$x_1 = 1 [-]$$

$$\xi_1 = 0,15 [-]$$

$$F_{ST1} = 2 \cdot (h_{oh} - v_m) \cdot b_{oh} + 2 \cdot (h_{oh} - v_m) \cdot a_{oh} + a_{oh} \cdot b_{oh} \quad (5.9)$$

$$F_{ST1} = 2 \cdot (17 - 2,7) \cdot 5,04 + 2 \cdot (17 - 2,7) \cdot 5,76 + 5,76 \cdot 5,04 = 337,91 [m^2]$$

Membranové stěny ohniště

$$x_2 = 1 [-]$$

$$\xi_2 = 0,45 [-]$$

$$F_{ST2} = 2 \cdot v_m \cdot b_{oh} + 2 \cdot v_m \cdot a_{oh} + a_{oh} \cdot b_{oh} \quad (5.10)$$

$$F_{ST2} = 2 \cdot 2,7 \cdot 5,04 + 2 \cdot 2,7 \cdot 5,76 + 5,76 \cdot 5,04 = 87,35 [m^2]$$

Celkový povrch stěn ohniště

$$F_{st} = 2 \cdot a_{oh} \cdot b_{oh} + 2 \cdot b_{oh} \cdot h + 2 \cdot a_{oh} \cdot h \quad (5.11)$$

$$F_{st} = 2 \cdot 5,76 \cdot 5,04 + 2 \cdot 5,76 \cdot 17 + 2 \cdot 5,04 \cdot 17 = 425,26 [m^2]$$

4.2.3 Stupeň černosti ohniště

$$a_0 = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{R}{F_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \bar{\psi}) \cdot (1 - \frac{R}{F_{st}})} \quad (5.12)$$

$$a_0 = \frac{0,4444 + (1 - 0,4444) \cdot \frac{25,93}{425,26}}{1 - (1 - 0,4444) \cdot (1 - 0,21) \cdot (1 - \frac{25,93}{425,26})} = 0,812 [-]$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

kde a_{pl} - stupeň černosti plamene

R – plocha hořící vrstvy pliva na roštu [m^2]

F_{st} – celkový povrch stěn ohniště [m^2]

$\bar{\psi}$ - součinitel tepelné efektivity stěn

Stupeň černosti plamene

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (5.13)$$

$$a_{pl} = 1 - e^{-1,388 \cdot 0,101325 \cdot 4,12} = 0,4444 [-]$$

kde k – součinitel zeslabení sálání

p – tlak v ohništi [MPa]

s – účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} \quad (5.14)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{493,52}{425,26} = 4,12 [m]$$

kde V_0 - aktivní objem ohniště [m^3]

F_{st} - celkový povrch stěn ohniště [m^2]

Aktivní objem ohniště

$$V_0 = a_{oh} \cdot b_{oh} \cdot h \quad (5.15)$$

$$V_0 = 5,76 \cdot 5,04 \cdot 17 = 493,52 [m^3]$$

kde a_{oh}, b_{oh}, h – délka, šířka, výška ohniště

Součinitel zeslabení sálání

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot \chi_1 \cdot \chi_2 \quad (5.16)$$

$$k = 1,197 + 0,0414 + 0,15 = 1,388 [1/m \cdot MPa]$$

kde $k_{sp} \cdot r_{sp}$ - součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů

$k_p \cdot \mu$ - součinitel zeslabení sálání popílkem

$10 \cdot k_k \cdot \chi_1 \cdot \chi_2$ - součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů**

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{sp} \quad (5.17)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 4,12}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{1208,05}{1000} \right) \cdot 0,25$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 1,197 [1/m \cdot MPa]$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa];

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 MPa$$

s - účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů

Součinitel zeslabení sálání popílkem

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_0^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (5.18)$$

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1208,05^2 \cdot 20^2}} \cdot 5,1095 = 0,0414 [1/m \cdot MPa]$$

kde T_0 - teplota na konci ohniště [K]

d - střední efektivní průměr částecek popílku [mm]

μ - střední hmotová koncentrace popílku ve spalínách

Součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi

$$10 \cdot k_k \cdot \chi_1 \cdot \chi_2 = 10 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,03 = 0,15 [1/m \cdot MPa] \quad (5.19)$$

kde χ_1 - hodnota závislá na druhu paliva [8]

χ_2 - hodnota závislá na způsobu spalování [8]

k_k - součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi [8]

Plocha hořící vrstvy pliva na roštu

$$R = a_r \cdot b_r \quad (5.20)$$

$$R = 5,458 \cdot 4,75 = 25,93 m^2$$

kde a_r, b_r - délka a šířka roštu [m]

Teplo předané v I. tahu

$$Q = \varphi \cdot M_{pv} \cdot (I_a - I_0)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

(5.21)

$$Q = 0,9882 \cdot 2,375 \cdot (19165,32 - 10181,34) = 21087,6 \text{ [kW]}$$

Tabulka 6 Souhrn vypočtených hodnot pro návrh ohniště a mříže

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
OHNIŠTĚ			
Teplota na konci ohniště	ϑ_0	934,905	°C
Rychlosti spalin v I. Tahu	w_{sp}	3,35	m/s
Doba setrvání spalin na požadované teplotě	t	5,2	s
Teplo předané v I. tahu	Q	21087,6	kW
MŘÍŽ			
Výška mříže	v_m	2,7	m
Rychlosti spalin při průchodu mříží	w_{sp}	6,93	m/s

6. TEPELNÝ NÁVRH JEDNOTLIVÝCH VÝHŘEVNÝCH PLOCH**6.1 Tlakové ztráty v jednotlivých výhřevných plochách**

Tlakové ztráty jednotlivých výhřevných ploch byly voleny po konzultaci následovně:

Tabulka 7 Tlakové ztráty jednotlivých výhřevných ploch

Tlaková ztráta v přehříváku P3	Δp_{P3}	0,15	MPa
Tlaková ztráta v přehříváku P2	Δp_{P2}	0,15	MPa
Tlaková ztráta v přehříváku P1	Δp_{P1}	0,15	MPa
Tlaková ztráta v závěsných trubkách	Δp_{ZT}	0,1	MPa
Tlaková ztráta ve výparníku	Δp_{VYP}	0	MPa
Tlaková ztráta v ekonomizéru	Δp_{EKO}	0,6	MPa
Tlak přehřáté páry	p_{PP}	4,0	MPa
Tlak napájecí vody	p_{NV}	5,15	MPa

Tlak napájecí vody:

$$p_{NV} = p_P + \Delta p_{P3} + \Delta p_{P2} + \Delta p_{P1} + \Delta p_{ZT} + \Delta p_V + \Delta p_{EKO} \quad (6.1)$$

$$p_{NV} = 4,0 + 0,15 + 0,15 + 0,15 + 0,1 + 0 + 0,6 = 5,15 \text{ [MPa]}$$

6.2 ROZVRŽENÍ TEPELNÉHO VÝKONU KOTLE NA JEDNOTLIVÉ PLOCHY

Pro určení hodnot parametrů páry byl použit software termodynamických parních tabulek X-Steam.

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**6.2.1 PŘEHŘÍVÁK P3**

Entalpie páry na vstupu:

$$i_{P3}^{in} = i_{P3}^{out} - \Delta i_{P3} = 3214,4 - 180 = 3034,4 \text{ [kJ/kg]} \quad (6.2)$$

Tlak páry na vstupu:

$$p_{P3}^{in} = p_{PP} + \Delta p_{P3} = 4,0 + 0,15 = 4,15 \text{ [MPa]} \quad (6.3)$$

Tepelný výkon přehříváku P3:

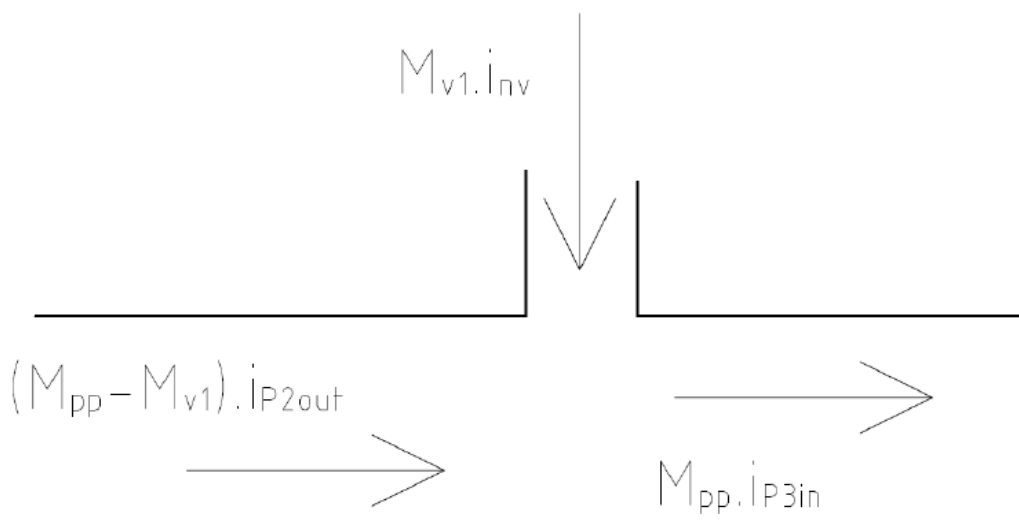
$$Q_{P3} = M_{pp} \cdot \Delta i_{P3} = 15,42 \cdot 180 = 2775 \text{ [kW]} \quad (6.4)$$

Tabulka 8 Vstupní a výstupní parametry přehříváku P3

Entalpický spád:	Δi_{P3}	180	kJ/kg
Výstup			
Teplota páry na výstupu:	t_{P3}^{out}	400	°C
Tlak páry na výstupu:	p_{P3}^{out}	4	MPa
Entalpie páry na výstupu:	i_{P3}^{out}	3214,4	kJ/kg
Vstup			
Entalpie páry na vstupu:	i_{P3}^{in}	3034,4	kJ/kg
Tlak páry na vstupu:	p_{P3}^{in}	4,15	MPa
Teplota páry na vstupu:	t_{P3}^{in}	328,45	°C
Tepelný výkon přehříváku P3:	Q_{P3}	2775	kW

6.2.2 PŘEHŘÍVÁK P2

Za přehřívákem P2 je zaveden vstřík napájecí vody, kvůli regulaci teploty přehřáté páry. Dle konzultace bylo zvoleno množství vstříku 2,16 % z celkového množství přehřáté páry. Schéma k tomuto vstříku je na obrázku (8).

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Obrázek 8** Schéma k bilanční rovnici regulačního vstřiku 1 napájecí vody

Regulační vstřik za P2:

$$M_{v1} = 0,0216 \cdot M_{pp} = 0,0216 \cdot 15,42 = 0,3333 \text{ [kg/s]} \quad (6.5)$$

Entalpie napájecí vody:

$$i_{nv} = 528,5 \text{ [kJ/kg]}$$

Entalpie páry na výstupu z P2 (z bilanční rovnice):

$$(M_{pp} - M_{v1}) \cdot i_{P2}^{out} + M_{v1} \cdot i_{nv} = M_{pp} \cdot i_{P3}^{in} \quad (6.6)$$

$$i_{P2}^{out} = \frac{M_{pp} \cdot i_{P3}^{in} - M_{v1} \cdot i_{nv}}{M_{pp} - M_{v1}}$$

$$i_{P2}^{out} = \frac{15,42 \cdot 3034,4 - 0,3333 \cdot 528,5}{15,42 - 0,3333} = 3089,75 \text{ [kJ/kg]}$$

Tlak páry na vstupu:

$$p_{P2}^{in} = p_{pp} + \Delta p_{P3} + \Delta p_{P2} = 4,0 + 0,15 + 0,15 = 4,3 \text{ [MPa]} \quad (6.7)$$

Tepelný výkon přehříváku P1:

$$Q_{P2} = (M_{pp} - M_{v1}) \cdot \Delta i_{P2} = (15,42 - 0,3333) \cdot 200 = 3016,7 \text{ [kW]} \quad (6.8)$$

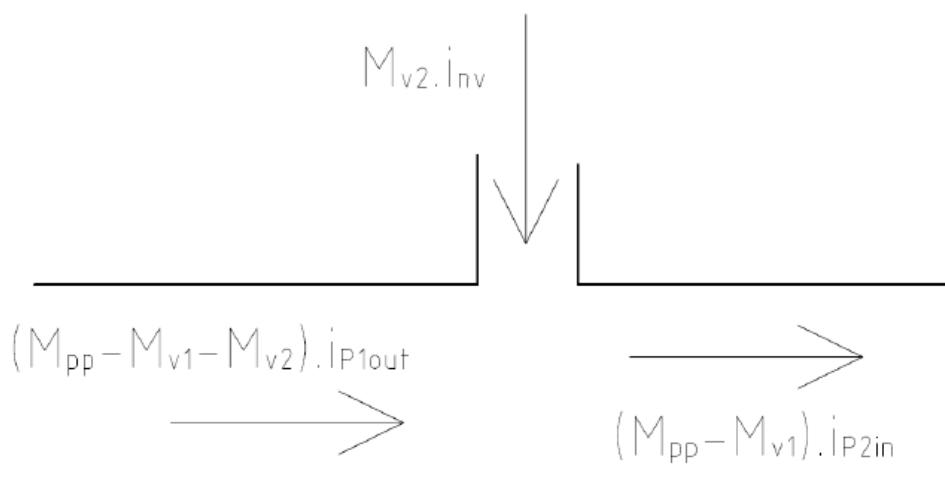
ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Tabulka 9 Vstupní a výstupní parametry přehříváku P2

Entalpický spád:	Δi_{P2}	200	kJ/kg
Výstup			
Teplota páry na výstupu:	t_{P2}^{out}	349,98	°C
Tlak páry na výstupu:	p_{P2}^{out}	4,15	MPa
Entalpie páry na výstupu:	i_{P2}^{out}	3089,75	kJ/kg
Vstup			
Entalpie páry na vstupu:	i_{P2}^{in}	2889,75	kJ/kg
Tlak páry na vstupu:	p_{P2}^{in}	4,3	MPa
Teplota páry na vstupu:	t_{P2}^{in}	279,89	°C
Tepelný výkon přehříváku P2:	Q_{P2}	3016,7	kW

6.2.3 PŘEHŘÍVÁK P1

Za přehřívákem P1 je zaveden vstřík napájecí vody, kvůli regulaci teploty přehřáté páry. Dle konzultace bylo zvoleno množství vstříku 3,6 % z celkového množství přehřáté páry. Schéma k tomuto vstříku je na obrázku (9).



Obrázek 9 Schéma k bilanční rovnici regulačního vstříku 2 napájecí vody

Regulační vstřík za P1:

$$M_{v2} = 0,036 \cdot M_{pp} = 0,036 \cdot 15,42 = 0,5555 \text{ [kg/s]} \quad (6.9)$$

Entalpie napájecí vody:

$$i_{nv} = 528,5 \text{ [kJ/kg]}$$

Entalpie páry na výstupu z P1 (z bilanční rovnice):

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$(M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot i_{P1}^{out} + M_{v2} \cdot i_{nv} = (M_{pp} - M_{v1}) \cdot i_{P2}^{in} \quad (6.10)$$

$$i_{P1}^{out} = \frac{(M_{pp} - M_{v1}) \cdot i_{P2}^{in} - M_{v2} \cdot i_{nv}}{M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}}$$

$$i_{P1}^{out} = \frac{(15,42 - 0,3333) \cdot 2980,05 - 0,5555 \cdot 528,5}{15,42 - 0,3333 - 0,5555} = 2810,05 \text{ [kJ/kg]}$$

Tlak páry na vstupu:

$$p_{P1}^{in} = p_{pp} + \Delta p_{P3} + \Delta p_{P2} + \Delta p_{P1} = 4,0 + 0,15 + 0,15 + 0,15 = 4,45 \text{ [MPa]} \quad (6.11)$$

Tepelný výkon přehříváku P1:

$$Q_{P1} = (M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot \Delta i_{P1} = (15,42 - 0,3333 - 0,5555) \cdot 170 = 2469,72 \text{ [kW]} \quad (6.12)$$

Tabulka 10 Vstupní a výstupní parametry přehříváku P1

Entalpický spád:	Δi_{P1}	170	kJ/kg
Výstup			
Teplota páry na výstupu:	t_{P1}^{out}	310,08	°C
Tlak páry na výstupu:	p_{P1}^{out}	4,3	MPa
Entalpie páry na výstupu:	i_{P1}^{out}	2980,05	kJ/kg
Vstup			
Entalpie páry na vstupu:	i_{P1}^{in}	2810,05	kJ/kg
Tlak páry na vstupu:	p_{P1}^{in}	4,45	MPa
Teplota páry na vstupu:	t_{P1}^{in}	259,61	°C
Tepelný výkon přehříváku P1:	Q_{P1}	2469,72	kW

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**6.2.4 ZÁVĚSNÉ TRUBKY**

Na závěsných trubkách jsou zavěšeny trubkové svazky přehříváků P1, P2 a P3. Závěsné trubky jsou napájené sytou parou z bubnu.

Tabulka 11 Vstupní a výstupní parametry závěsných trubek

Výstup			
Teplota páry na výstupu:	t_{ZT}^{out}	259,61	°C
Tlak páry na výstupu:	p_{ZT}^{out}	4,45	MPa
Entalpie páry na výstupu:	i_{ZT}^{out}	2810,05	kJ/kg
Vstup			
Entalpie páry na vstupu:	i_{ZT}^{in}	2797,66	kJ/kg
Tlak páry na vstupu:	p_{ZT}^{in}	4,55	MPa
Teplota páry na vstupu:	t_{ZT}^{in}	258,11	°C
Tepelný výkon závěsných trubek:	Q_{ZT}	180,06	kW

Tlak páry na vstupu:

$$p_{P1}^{in} = p_{PP} + \Delta p_{P3} + \Delta p_{P2} + \Delta p_{P1} + \Delta p_{ZT} = 4,0 + 0,15 + 0,15 + 0,15 + 0,1 = 4,55 \text{ [MPa]} \quad (6.13)$$

Tepelný výkon závěsných trubek:

$$Q_{ZT} = (M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot (i_{ZT}^{out} - i_{ZT}^{in}) \quad (6.14)$$

$$Q_{ZT} = (15,42 - 0,462 - 0,62) \cdot (2810,05 - 2797,66) = 180,06 \text{ [kW]}$$

6.2.5 VÝPARNÍK

Výparník se skládá z membránových stěn a mříže. Ve výparníku dochází k fázové přeměně, proto je ve výparníku teplota i tlak konstantní.

Tlak parovodní směsi:

$$p_{VYP} = p_{PP} + \Delta p_{P3} + \Delta p_{P2} + \Delta p_{P1} + \Delta p_{ZT} + \Delta p_{VYP} \quad (6.15)$$

$$p_{VYP} = 4,0 + 0,15 + 0,15 + 0,15 + 0,1 + 0 = 4,55 \text{ [MPa]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Tepelný výkon výparníku:

$$Q_{VÝP} = (M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot (i_{VÝP}^{out} - i_{VÝP}^{in}) \quad (6.16)$$

$$Q_{VÝP} = (15,42 - 0,3333 - 0,5555) \cdot (2797,66 - 1125,5) = 24293,05 [kW]$$

Tabulka 12 Vstupní a výstupní parametry výparníku

Výstup			
Entalpie syté páry na výstupu:	$i_{VÝP}^{out}$	258,11	°C
Tlak syté páry na výstupu:	$p_{VÝP}^{out}$	4,55	MPa
Teplota syté páry na výstupu:	$p_{VÝP}^{out}$	2797,66	kJ/kg
Vstup			
Entalpie napájecí vody na vstupu:	$i_{VÝP}^{in}$	1125,5	kJ/kg
Tlak napájecí vody na vstupu:	$p_{VÝP}^{in}$	4,55	MPa
Teplota napájecí vody na vstupu:	$t_{VÝP}^{in}$	258,11	°C
Tepelný výkon výparníku:	$Q_{VÝP}$	24293,05	kW

6.2.6 EKONOMIZÉR

Ekonomizér slouží k ohřívání napájecí vody, kterou lze ohřát spalinami na 211 °C. Další ochlazování spalin je nežádoucí z důvodu nízkoteplotní koroze, vzniká tedy nedohřev vody vůči mezi sytosti 47,11 °C. Potřebné teplo k dohřátí vody obstarají membránové stěny výparníku.

Tlak napájecí vody na vstupu:

$$p_{VÝP} = p_{PP} + \Delta p_{P3} + \Delta p_{P2} + \Delta p_{P1} + \Delta p_{ZT} + \Delta p_{VÝP} + \Delta p_{EKO} \quad (6.17)$$

$$p_{VÝP} = 4,0 + 0,15 + 0,15 + 0,15 + 0,1 + 0 + 0,6 = 5,15 [MPa]$$

Tepelný výkon výparníku:

$$Q_{VÝP} = (M_{pp} - M_{v1} - M_{v2}) \cdot (i_{EKO}^{out} - i_{EKO}^{in}) \quad (6.18)$$

$$Q_{VÝP} = (15,42 - 0,3333 - 0,5555) \cdot (903,2 - 528,5) = 5443,8 [kW]$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Tabulka 13** Vstupní a výstupní parametry ekonomizéru

Teplota nedohřevu:	Δt_{EKO}	47,11	°C
Výstup			
Entalpie napájecí vody na výstupu:	i_{EKO}^{out}	211	°C
Tlak napájecí vody na výstupu:	p_{EKO}^{out}	4,55	MPa
Teplota napájecí vody na výstupu:	p_{EKO}^{out}	903,2	kJ/kg
Vstup			
Entalpie napájecí vody na vstupu:	i_{EKO}^{in}	528,5	kJ/kg
Tlak napájecí vody na vstupu:	p_{EKO}^{in}	5,15	MPa
Teplota napájecí vody na vstupu:	t_{EKO}^{in}	125	°C
Tepelný výkon ekonomizéru:	Q_{EKO}	5443,8	kW

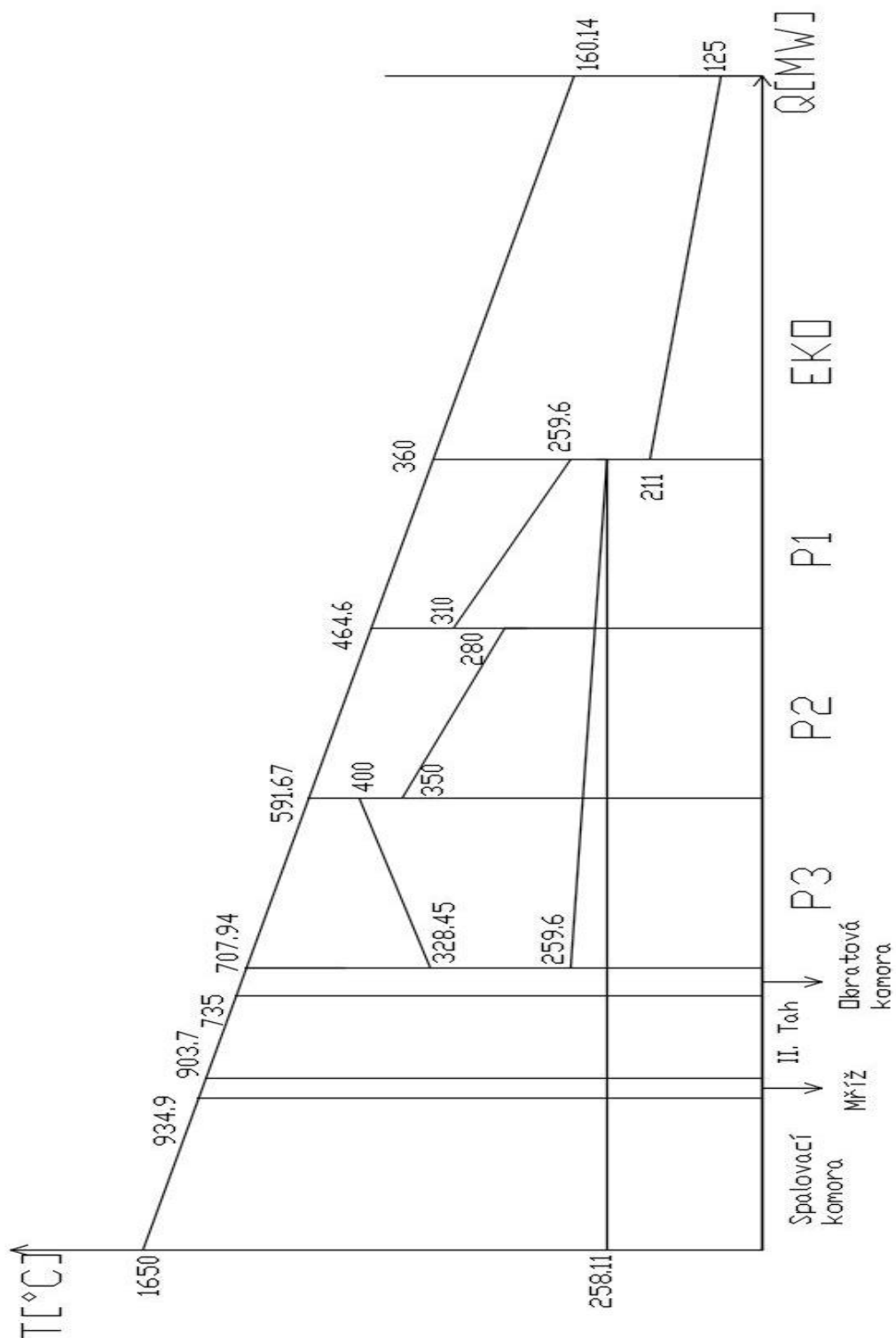
6.2.7 CELKOVÉ POTŘEBNÉ TEPLLO

$$Q_C = Q_{P3} + Q_{P2} + Q_{P1} + Q_{ZT} + Q_{VÝP} + Q_{EKO} \quad (6.19)$$

$$Q_C = 2775 + 3016,7 + 2469,72 + 180,06 + 24293,05 + 5443,8 = 38178,3 [kW]$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

6.3 PILOVÝ DIAGRAM



Obrázek 10 Pilový diagram

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

7. TEPELNÝ VÝPOČET MŘÍŽE

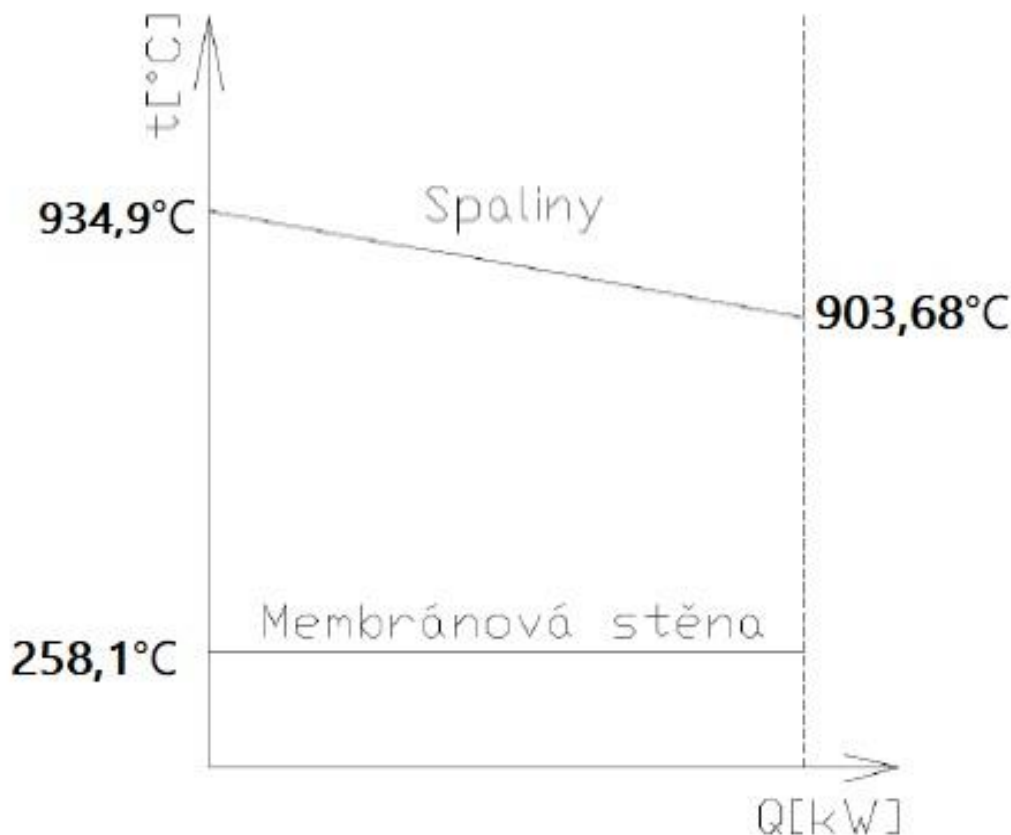
Mříž je součástí výparníku a je složena z trubek stejného průměru jako výparník. Převádí spaliny ze spalovací komory do druhého tahu kotle. Spaliny se průchodem mříží ochlazují.

Tabulka 14 Geometrické parametry mříže

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Výška mříže	v_m	2,7	m
Vnější průměr trubek	D	60,3	mm
Rozteč mezi trubkami	s_1	270	mm
Rozteč mezi řadami	s_2	150	mm
Počet řad	z_2	3	-
Počet trubek v jedné řadě	n_{tr}	18	-

Teplý výpočet stanovuje množství tepla odebraného spalínou mříží proudícím spalínám. Výpočet se skládá ze součinitele přestupu tepla ze strany spalín a součinitele přestupu tepla sáláním. Součinitel přestupu tepla ze strany vody je zanedbán, protože je dostatečně veliký a kritický odpor vedení tepla je na straně spalín.

Teplota na vstupu do mříže $t_m^{in}=934,905$ [°C] je stejná jako teplota na konci spalovací komory. Z předešlých výpočtů předpokládám teplotní spád v mříží $\Delta t_m=31,205$ [°C], proto teplota na konci mříže bude $t_m^{out}=903,7$ °C.



Obrázek 11 Teplotní průběh spalín a pracovního média v oblasti mříže

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Střední teplota proudu spalin mříží:**

$$t_{str} = \frac{t_m^{in} + t_m^{out}}{2} \quad (7.1)$$

$$t_{str} = \frac{934,905 + 903,7}{2} = 919,303 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Absolutní teplota proudu spalin

$$T = t_{str} + 273,15 = 919,303 + 273,15 = 1192,45 \text{ [K]} \quad (7.2)$$

Tabulka 15 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu (mříž)

Součinitel tepelné vodivosti spalin	λ	$103,4 \cdot 10^{-3}$	W/mK
Součinitel kinematické viskozity spalin	ν	$157,7 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Prandlovo číslo spalin	Pr	0,595	-

7.1 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ NA STANĚ SPALIN

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (7.3)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,9225 \cdot 1,2 \cdot \frac{103,4 \cdot 10^{-3}}{0,0603} \cdot \left(\frac{6,93 \cdot 0,0603}{157,7 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,595^{0,33} = 53,56 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

kde c_z – oprava na počet podélných řad c_s – oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/mK]

D – vnější průměr trubek [m]

 w_{sp} – rychlost proudu spalin [m/s] ν – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Oprava na počet podélných řadPro $z_2 < 10$ platí následující rovnice [8].

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (z_2 - 2) \quad (7.4)$$

$$c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (3 - 2) = 0,9225 \text{ [-]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Oprava na uspořádání svazku**

$$c_s = \left(1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right)^{-2} \quad (7.5)$$

$$c_s = \left(1 + (2 \cdot 4,48 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,487}{2}\right)^3\right)^{-2} = 1,2 [-]$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{270}{60,3} = 4,48 [-] \quad (7.6)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{150}{60,3} = 2,487 [-] \quad (7.7)$$

7.2 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM NA STRANĚ SPALIN

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (7.8)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,202 \cdot 1192,45^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{611,264}{1192,45}\right)^4}{1 - \frac{611,264}{1192,45}} = 33,64 [W/m^2K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8 [-]$ dle [8].

Stupeň černosti proudu spalín při teplotě proudu T

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (7.9)$$

$$a = 1 - e^{-0,226} = 0,202 [-]$$

Exponent $k \cdot p \cdot s$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s \quad (7.10)$$

$$k \cdot p \cdot s = (12,47 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 0,715 = 0,226[-]$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [1/m·MPa]

r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [-]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]
 s – efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálení tříatomových plynů

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) \quad (7.11)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 0,715}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{1192,45}{1000} \right) = 12,47 [1/m \cdot MPa]$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-]

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 [MPa]$

s - účinná tloušťka sálové vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,715 [m] \quad (7.12)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,27 \cdot 0,15}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,715 [m]$$

kde D – vnější průměr trubky [m]

s_1 – příčná rozteč svazku [m]

s_2 – podélná rozteč svazku [m]

Teplota zanášeného povrchu stěn T_z

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 80 [°C] vyšší než teplota média uvnitř a to je 258,11[°C] .

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 258,11 + 80 + 273,15 = 611,264 [K] \quad (7.13)$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 53,56 + 33,64 = 87,2 [W/m^2K] \quad (7.14)$$

7.3 SOUČINITEL PROSTUPU TEPLA

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_1} = \frac{87,2}{1 + 0,0089 \cdot 87,2} = 49,1 [W/m^2K] \quad (7.15)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

kde ε - součinitel zanesení

Součinitel zanesení ε

$$\varepsilon = c_d \cdot c_f \cdot \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon \quad (7.16)$$

$$\varepsilon = 1,6 \cdot 1 \cdot 0,0045 + 0,0017 = 0,0089 [m^2K/W]$$

kde c_d – opravný koeficient na vnější průměr trubky [-]

c_f – opravný koeficient na frakci popílkových částic [-]

ε_0 – výchozí součinitel zanesení [m^2K/W]

$\Delta\varepsilon$ – přídavek

Dle [8] volím

$$c_d = 1,6 [-]$$

$$c_f = 1 [-]$$

$$\varepsilon_0 = 0,0045 [m^2K/W]$$

$$\Delta\varepsilon = 0,0017 [m^2K/W]$$

7.4 TEPLO ODEBRANÉ MŘÍŽÍ

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta t \quad (7.17)$$

$$Q = 49,1 \cdot 27,62 \cdot 661,07 \cdot 10^3 = 896,42 [kW]$$

kde k – součinitel prostupu tepla [W/m^2K]

S – teplosměnná plocha mříže [m^2]

Δt – střední teplotní logaritmický spád [$^{\circ}C$]

Teplosměnná plocha mříže

$$S = v_m \cdot \pi \cdot n_m^{tr} \cdot D_m \quad (7.18)$$

$$S = \pi \cdot 2,7 \cdot 18 \cdot 0,0603 = 27,62 [m^2]$$

Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_1 = t_m^{in} - t_{syt} = 934,905 - 258,11 = 676,79 [^{\circ}C] \quad (7.19)$$

$$\Delta t_2 = t_m^{out} - t_{syt} = 903,7 - 258,11 = 645,6 [^{\circ}C]$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{676,79 - 645,6}{\ln \frac{676,79}{645,6}} = 661,07 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

7.5 KONTROLA TEPLoty SPALIN NA VÝSTUPU Z MŘÍŽE**Teplo spalin na vstupu**

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 10181,407 \cdot 2,375 = 24182,5 \text{ [kW]} \quad (7.20)$$

Teplo spalin na výstupu

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q = 24182,5 - 896,42 = 23286,08 \text{ [kW]} \quad (7.21)$$

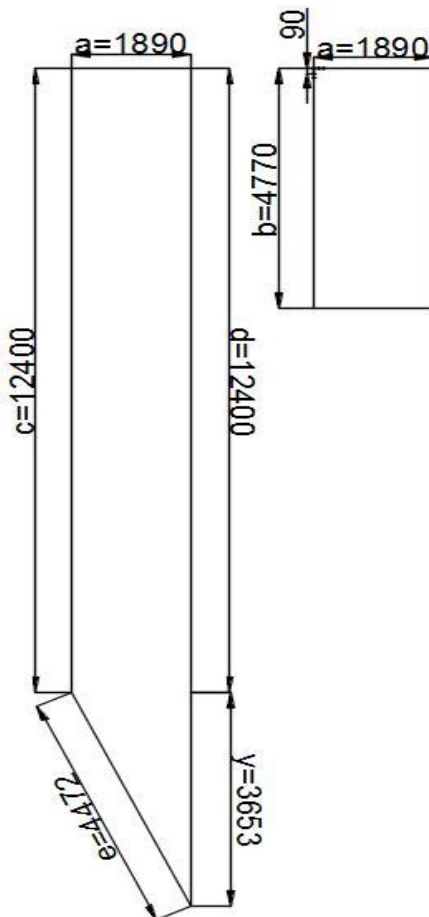
Entalpie spalin na výstupu

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{23286,08}{2,375} = 9804 \text{ [kJ/kg]} \quad (7.22)$$

Této entalpii spalin (tab. 3) na výstupu odpovídá teplota 903,68°C, která se od předpokládané teploty 903,7 °C liší pouze minimálně.

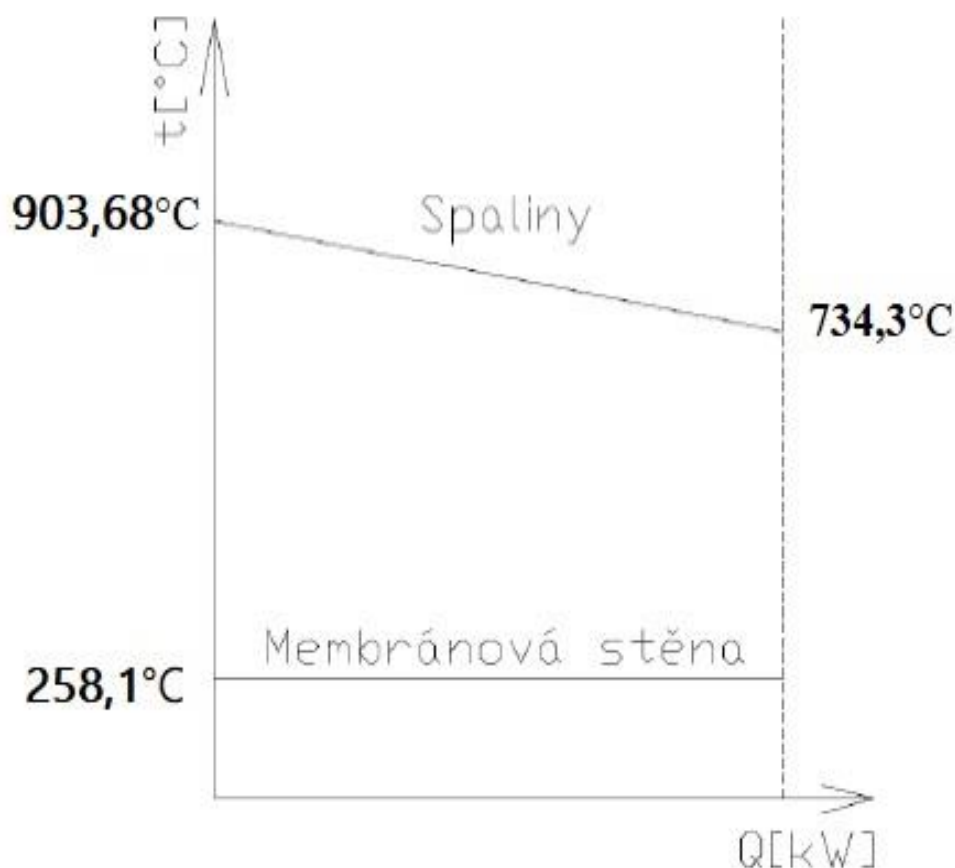
ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**8. TEPELNÝ VÝPOČET II. TAHU**

Kvůli vysoké teplotě spalin za mříží, by mohlo docházet k zalepování výhřevných ploch přehříváků popílkem. Z tohoto důvodu je za mříží II. tah prázdný. II. tah je navržen na požadovanou rychlost spalin $w_{sp} = 7,0$ m/s. Stěny II. tahu jsou tvořeny membránovou stěnou s roztečí trubek 90 mm. Teplotu spalin na výstupu z II. tahu volím $734,3$ °C. Rozměry II. tahu jsou znázorněny na obrázku (12).



Obrázek 12 Rozměry II. Tahu

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H



Obrázek 13 Teplotní průběh spaliny a pracovního média ve II. Tahu

Střední teplota proudu spaliny ve II. Tahu:

$$t_{str} = \frac{t_{II\text{tah}}^{in} + t_{II\text{tah}}^{out}}{2} \quad (8.1)$$

$$t_{str} = \frac{903,68 + 734,3}{2} = 819 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Absolutní teplota proudu spaliny

$$T = t_{str} + 273,15 = 819 + 273,15 = 1092,14 \text{ [K]} \quad (8.2)$$

Rychlost proudu spaliny ve II. Tahu

$$w_{sp} = \frac{O_{sv} \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{273,15} \cdot M_{pv}}{a_{II\text{tah}} \cdot b_{II\text{tah}}} \quad (8.3)$$

$$w_{sp} = \frac{7,132 \cdot \frac{819 + 273,15}{273,15} \cdot 2,375}{1,89 \cdot 5,04} = 7,11 \text{ [m/s]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Tabulka 16** Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu ve II. Tahu

Součinitel tepelné vodivosti spalin	λ	$94,55 \cdot 10^{-3}$	W/mK
Součinitel kinematické viskozity spalin	ν	$137,1 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Prandlovo číslo spalin	Pr	0,605	-

8.1 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA KONVEKČÍ NA STRANĚ SPALIN

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8.4)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{94,55 \cdot 10^{-3}}{2,707} \cdot \left(\frac{7,11 \cdot 2,75}{137,1 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,605^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 8,59 [W/m \cdot K]$$

kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitelé

λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/m.K]

d_e – ekvivalentní průměr [m]

w_{sp} – rychlost spalin [m/s]

ν – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot (a_{IItah} \cdot b_{IItah})}{2 \cdot (a_{IItah} + b_{IItah})} = \frac{4 \cdot (1,98 \cdot 5,04)}{2 \cdot (1,98 + 5,04)} = 2,75 [m] \quad (8.5)$$

8.2 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA SÁLÁNÍM NA STRANĚ SPALIN

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (8.6)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,3314 \cdot 1092,14^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{591,26}{1092,14} \right)^4}{1 - \frac{591,26}{1092,14}} = 44,141 [W/m^2 K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8 [-]$ dle [8].

Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu T

$$a = 1 - e^{-kps}$$

$$a = 1 - e^{-0,4025} = 0,3314 [-] \quad (8.7)$$

Exponent $k \cdot p \cdot s$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$k \cdot p \cdot s = (7,46 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 2,13 = 0,4025[-] \quad (8.8)$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$1/m \cdot MPa$]

r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [-]

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]

s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) \quad (8.9)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 2,13}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{1092,14}{1000} \right) = 7,46 [1/m \cdot MPa]$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-]

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 [MPa]$

s - účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} \quad (8.10)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{135,52}{229,245} = 2,13 [m]$$

kde V_0 - aktivní objem II. Tahu [m^3]

F_{st} - celkový povrch stěn II. Tahu [m^2]

Celkový povrch stěn II. Tahu

Tabulka 17 Rozměry II. Tahu

Rozměr	Hodnota	Jednotka
$a_{II\text{Tahu}}$	1,89	m
$b_{II\text{Tahu}}$	4,77	m
$c_{II\text{Tahu}}$	12,4	m
$d_{II\text{Tahu}}$	12,4	m
$e_{II\text{Tahu}}$	4,472	m
$y_{II\text{Tahu}}$	3,653	m

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$F_{st} = 2 \cdot a_{IItah} \cdot c_{IItah} + 2 \cdot b_{IItah} \cdot c_{IItah} + a_{IItah} \cdot b_{IItah} + y_{IItah} \cdot b_{IItah} + e_{IItah} \cdot b_{IItah} + a_{IItah} \cdot y_{IItah} \quad (8.11)$$

$$F_{st} = 2 \cdot 1,89 \cdot 12,4 + 2 \cdot 5,04 \cdot 12,4 + 1,89 \cdot 5,04 + 3,653 \cdot 5,04 + 4,472 \cdot 5,04 + 1,89 \cdot 3,653 = 229,245 [m^2]$$

Aktivní objem II. Tahu

$$V_0 = a_{IItah} \cdot b_{IItah} \cdot c_{IItah} + \frac{1}{2} \cdot (a_{IItah} \cdot b_{IItah} \cdot y_{IItah}) \quad (8.12)$$

$$V_0 = 1,89 \cdot 5,04 \cdot 12,4 + \frac{1}{2} \cdot (1,89 \cdot 5,04 \cdot 3,653) = 135,52 [m^3]$$

Teplota zanášeného povrchu stěn T_z

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 60 [°C] vyšší než teplota media uvnitř a to je 258,11[°C] .

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 258,11 + 60 + 273,15 = 591,26 [K] \quad (8.13)$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 44,141 + 8,59 = 52,73 [W/m^2K] \quad (8.14)$$

8.3 SOUČINITEL PROSTUPU TEPLA

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_1} = \frac{52,73}{1 + 0,0043 \cdot 52,73} = 42,985 [W/m^2K] \quad (8.15)$$

kde ε - součinitel zanesení

Součinitel zanesení ε

Dle [8] volím

$$\varepsilon = 0,0043 [m^2K/W]$$

8.4 TEPLA ODEBRANÉ II. TAHEM

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta t \quad (8.16)$$

$$Q = 42,985 \cdot 197,225 \cdot 556,59 \cdot 10^3 = 4718,6 [kW]$$

kde k – součinitel prostupu tepla [W/m²K]

S – teplosměnná plocha mříže [m²]

Δt – střední teplotní logaritmický spád [°C]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Teplosměnná plocha II. Tahu**

$$S = F_{st} - v_m \cdot b_{II\text{tah}} - b_{II\text{tah}} \cdot y_{II\text{tah}} \quad (8.17)$$

$$S = 219,845 - 2,7 \cdot 5,04 - 5,04 \cdot 3,653 = 197,225 \text{ [m}^2\text{]}$$

Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_1 = t_m^{in} - t_{syt} = 903,68 - 258,11 = 645,573 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.18)$$

$$\Delta t_2 = t_m^{out} - t_{syt} = 734,3 - 258,11 = 476,186 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{645,573 - 476,186}{\ln \frac{645,573}{476,186}} = 556,59 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

8.5 KONTROLA TEPLoty SPALIN NA VÝSTUPU Z II. TAHU**Teplo spalin na vstupu**

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 9804 \cdot 2,375 = 23286,08 \text{ [kW]} \quad (8.19)$$

Teplo spalin na výstupu

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q = 23286,08 - 4718,6 = 18567,5 \text{ [kW]} \quad (8.20)$$

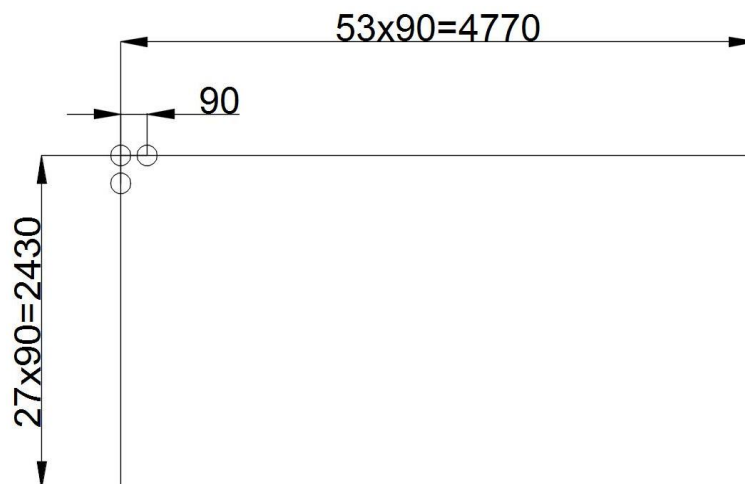
Entalpie spalin na výstupu

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{18567,5}{2,375} = 7817,356 \text{ [kJ/kg]} \quad (8.21)$$

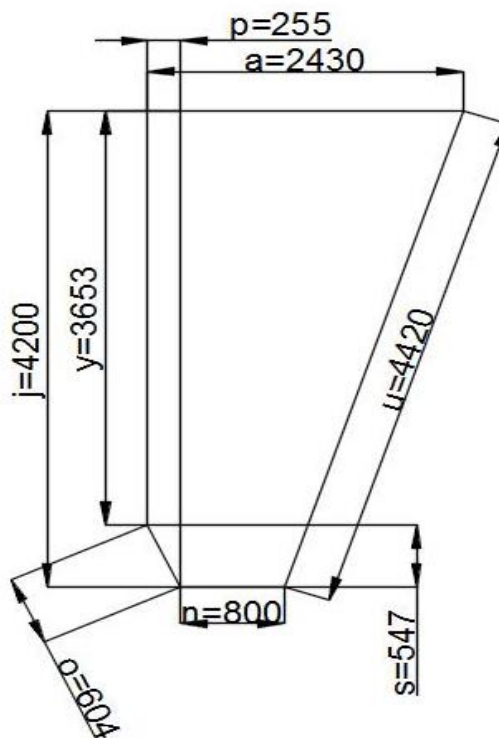
Této entalpii spalin (tab. 3) na výstupu odpovídá teplota 734,99 °C, která se od předpokládané teploty 734,3 °C liší pouze minimálně.

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**9. TEPELNÝ VÝPOČET III. TAHU**

Tento tah se skládá z membránové stěny, trubkových svazků přehříváků P3, P2, P1 a ze závěsných trubek, na kterých jsou jednotlivé přehříváky zavěšeny. Tento tah je rozdělen na 4 části, na obratovou komoru a úseky 1, 2 a 3, ve kterých jsou umístěny přehříváky. Mezi přehříváky jsou umístěny tzv. průlezy a ofukovače. Rozměry III. tahu jsou znázorněny na obrázku (14).

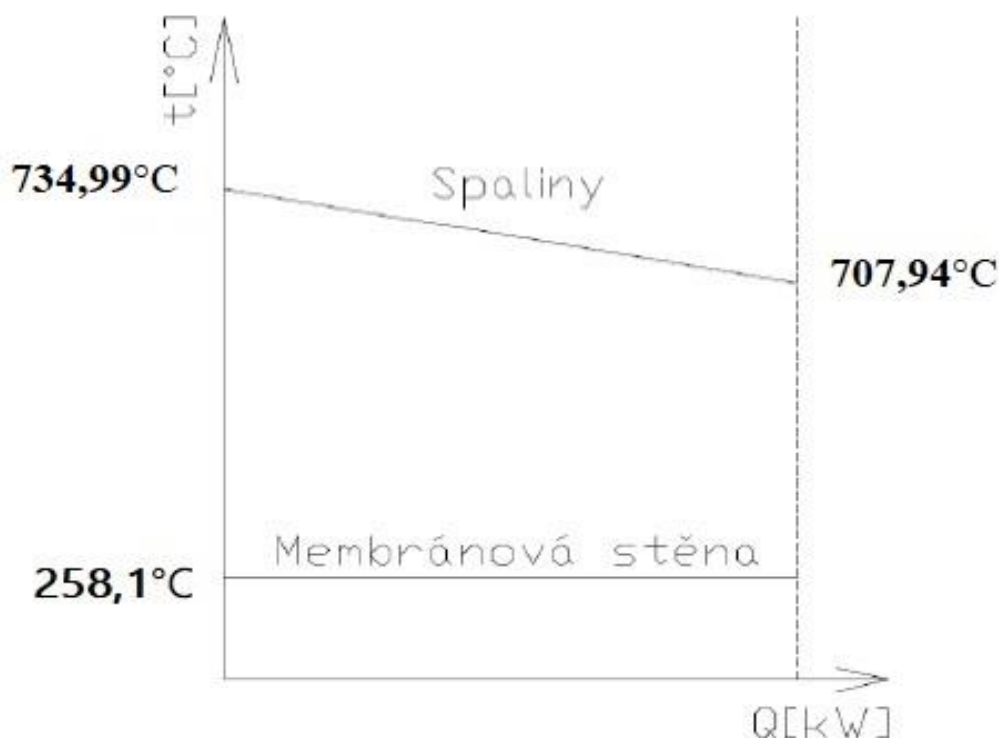


Obrázek 14 Rozměry III. tahu

9.1 OBRATOVÁ KOMORA

Obrázek 15 Rozměry obratové komory

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H



Obrázek 16 Teplotní průběh spalin a pracovního média v obratové komoře

Střední teplota spalin v obratové komoře

$$t_{str} = \frac{t_{obr}^{in} + t_{obr}^{out}}{2} \quad (9.1)$$

$$t_{str} = \frac{734,99 + 707,3}{2} = 721,15 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Absolutní teplota proudu spalin

$$T = t_{str} + 273,15 = 721,15 + 273,15 = 994,3 \text{ [K]} \quad (9.2)$$

Rychlost proudu spalin v obratové komoře

$$w_{sp} = \frac{O_{sv} \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{273,15} \cdot M_{pv}}{a_{IIIItah} \cdot b_{IIIItah}} \quad (9.3)$$

$$w_{sp} = \frac{7,132 \cdot \frac{721,15 + 273,15}{273,15} \cdot 2,375}{2,43 \cdot 5,04} = 5,03 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Tabulka 18 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu v obratové komoře

Součinitel tepelné vodivosti spalin	λ	$85,7 \cdot 10^{-3}$	W/mK
Součinitel kinematické viskozity spalin	ν	$117 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Prandlovo číslo spalin	Pr	0,6144	-

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**9.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.4)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{85,7 \cdot 10^{-3}}{3,22} \cdot \left(\frac{5,03 \cdot 3,28}{117 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,6144^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 6,52 [W/m \cdot K]$$

kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitelé

λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/m.K]

d_e – ekvivalentní průměr [m]

w_{sp} – rychlost spalin [m/s]

ν – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot (a_{III\text{tah}} \cdot b_{III\text{tah}})}{2 \cdot (a_{III\text{tah}} + b_{III\text{tah}})} = \frac{4 \cdot (2,43 \cdot 5,04)}{2 \cdot (2,43 + 5,04)} = 3,28 [m] \quad (9.5)$$

9.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.6)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,331 \cdot 994,3^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{591,26}{994,3} \right)^4}{1 - \frac{591,26}{994,3}} = 36,05 [W/m^2 K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8$ [–] dle [8].

Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu T

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (9.7)$$

$$a = 1 - e^{-0,4022} = 0,331 [–]$$

Exponent $k \cdot p \cdot s$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s \quad (9.8)$$

$$k \cdot p \cdot s = (8,487 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 1,87 = 0,4022 [–]$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [1/m·MPa]

r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [–]

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

s – efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) \quad (9.9)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 1,87}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{994,3}{1000} \right) = 8,487 [1/m \cdot MPa]$$

r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-]

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 [MPa]$$

s - účinná tloušťka sálové vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} \quad (9.10)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{39,24}{75,6} = 1,87 [m]$$

kde V_0 - aktivní objem obratové komory [m³]

F_{st} - celkový povrch stěn obratové komory [m²]

Celkový povrch stěn obratové komory

Tabulka 19 Rozměry obratové komory

Rozměr	Hodnota	Jednotka
$a_{III\text{tah}}$	1,89	m
$b_{III\text{tah}}$	5,04	m
y_{obr}	3,653	m
j_{obr}	4,2	m
p_{obr}	0,255	m
n_{obr}	0,8	m
O_{obr}	0,604	m
S_{obr}	0,547	m
u_{obr}	4,420	m

$$F_{st} = 2 \cdot n_{obr} \cdot b_{III\text{tah}} + 2 \cdot n_{obr} \cdot a_{III\text{tah}} + 2 \cdot y_{obr} \cdot p_{obr} + y_{obr} \cdot b_{III\text{tah}} + b_{III\text{tah}} \cdot o_{obr} + p_{obr} \cdot s_{obr} + u_{obr} \cdot b_{III\text{tah}} + (a_{III\text{tah}} - n_{obr}) \cdot j_{obr} + (a_{III\text{tah}} - n_{obr}) \cdot b_{obr} \quad (9.11)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$F_{st} = 2 \cdot 0,8 \cdot 5,04 + 2 \cdot 0,8 \cdot 2,43 + 2 \cdot 3,653 \cdot 0,255 + 3,653 \cdot 5,04 + 5,04 \cdot 0,604 + 0,255 \cdot 0,547 + 4,420 \cdot 5,04 + (2,43 - 0,8) \cdot 4,2 + (2,43 - 0,8) \cdot 5,04 = 75,6 [m^2]$$

Aktivní objem obrátové komory

$$V_0 = j_{obr} \cdot b_{IIIItah} \cdot n_{obr} + y_{obr} \cdot b_{IIIItah} \cdot p_{obr} + \frac{1}{2} \cdot (b_{IIIItah} \cdot s_{obr} \cdot p_{obr}) + \frac{1}{2} \cdot (b_{IIIItah} \cdot (a_{IIIItah} - n_{obr}) \cdot j_{obr}) \quad (9.12)$$

$$V_0 = 4,2 \cdot 5,04 \cdot 0,8 + 3,653 \cdot 5,04 \cdot 0,255 + \frac{1}{2} \cdot (5,04 \cdot 0,547 \cdot 0,255) + \frac{1}{2} \cdot (5,04 \cdot (2,43 - 0,8) \cdot 4,2) = 39,24 [m^3]$$

Teplota zanášeného povrchu stěn T_z

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 60 [°C] vyšší než teplota média uvnitř a to je 258,11 [°C].

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 258,11 + 60 + 273,15 = 591,26 [K] \quad (9.13)$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 36,05 + 6,52 = 42,56 [W/m^2K] \quad (9.14)$$

9.1.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_1} = \frac{42,56}{1 + 0,0043 \cdot 42,56} = 35,98 [W/m^2K] \quad (9.15)$$

kde ε - součinitel zanesení**Součinitel zanesení ε**

Dle [8] volím

$$\varepsilon = 0,0043 [m^2K/W]$$

9.1.4 Teplo odebrané obrotovou komorou

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta t \quad (9.16)$$

$$Q = 35,98 \cdot 43,35 \cdot 462,9 \cdot 10^3 = 748,17 [kW]$$

kde k – součinitel prostupu tepla [W/m²K] S – teplosměnná plocha mříže [m²] Δt – střední teplotní logaritmický spád [°C]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Teplosměnná plocha obratové komory**

$$S = F_{st} - a_{III\text{tah}} \cdot b_{III\text{tah}} - b_{III\text{tah}} \cdot y_{obr} \quad (9.17)$$

$$S = 72,34 - 2,43 \cdot 4,77 - 4,77 \cdot 3,653 = 43,35 \text{ [m}^2\text{]}$$

Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_1 = t_m^{in} - t_{syt} = 734,99 - 258,11 = 476,886 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.18)$$

$$\Delta t_2 = t_m^{out} - t_{syt} = 707,3 - 258,11 = 449,186 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{476,886 - 449,186}{\ln \frac{476,886}{449,186}} = 462,9 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

9.1.5 Kontrola teploty spalin na výstupu z obratové komory**Teplo spalin na vstupu**

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 7818,35 \cdot 2,375 = 18567,5 \text{ [kW]} \quad (9.19)$$

Teplo spalin na výstupu

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q = 18567,5 - 748,17 = 17819,33 \text{ [kW]} \quad (9.20)$$

Entalpie spalin na výstupu

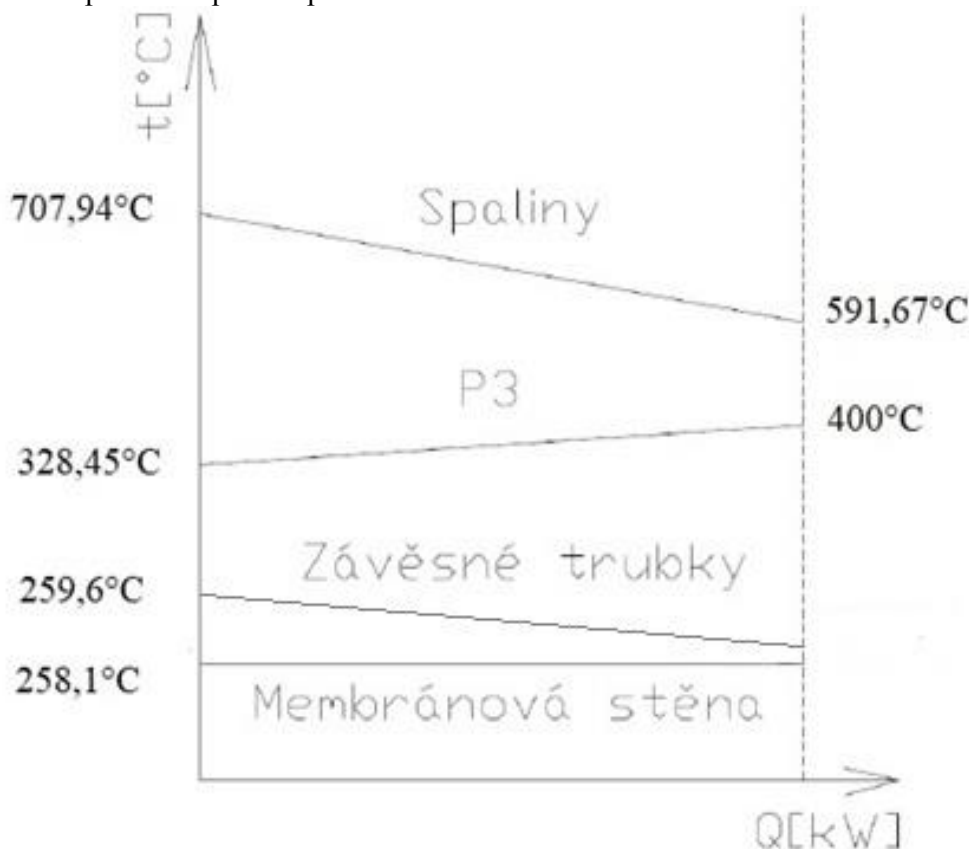
$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{17819,33}{2,375} = 7502,36 \text{ [kJ/kg]} \quad (9.21)$$

Této entalpii spalin (tab. 3) na výstupu odpovídá teplota 707,94 °C, která se od předpokládané teploty 707,3 °C liší pouze minimálně.

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

9.2 ÚSEK 1

Úsek 1 se skládá z membránových stěn výparníku, závěsných trubek a přehříváku P3. Každá výhřevná plocha je počítána samostatně a nakonec se výkon jednotlivých výhřevných ploch sečte a určí se celkové předané teplo ve spalínách.



Obrázek 17 Tepelné spády v úseku 1

Střední teplota spalin v úseku 1

$$t_{str} = \frac{t_{ú1}^{in} + t_{ú1}^{out}}{2} \quad (9.22)$$

$$t_{str} = \frac{707,94 + 591}{2} = 649,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Absolutní teplota proudu spalin

$$T = t_{str} + 273,15 = 649,5 + 273,15 = 922,62 \text{ [K]} \quad (9.23)$$

Tabulka 20 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu v úseku 1

Součinitel tepelné vodivosti spalin	λ	$79,4 \cdot 10^{-3}$	W/mK
Součinitel kinematické viskozity spalin	ν	$103,4 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Prandlovo číslo spalin	Pr	0,622	-

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Rychlost proudu spalin v úseku 1**

$$w_{sp} = \frac{O_{SV} \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{273,15} \cdot M_{pv}}{a_{III\text{tah}} \cdot b_{III\text{tah}} - D_{P3} \cdot l_{P3} \cdot n_{tr}^{P2} - \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4} \cdot n_{tr,ZT} \cdot n_{rad,ZT}} \quad (9.24)$$

$$w_{sp} = \frac{7,132 \cdot \frac{649,5 + 273,15}{273,15} \cdot 2,375}{2,43 \cdot 5,04 - 0,038 \cdot 2,33 \cdot 22 - \frac{\pi \cdot 0,032^2}{4} \cdot 2 \cdot 42} = 5,6 \text{ [m/s]}$$

kde O_{SV} – objem spalin

M_{pv} – palivo skutečně spálené

t_{str} – střední teplota v úseku 1

$a_{III\text{tah}} \cdot b_{III\text{tah}}$ – rozměry průřezu úseku 1

D_{P3} – vnější průměr trubek přehříváku P3

l_{P3} – délka trubky přehříváku P3

D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek

n_{tr}^{P3} – počet trubek přehříváku v jedné řadě

$n_{tr,ZT}$ – počet závěsných trubek

$n_{rad,ZT}$ – počet řad závěsných trubek

9.2.1 MEMBRÁNOVÁ STĚNA**9.2.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.25)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{79,4 \cdot 10^{-3}}{0,2365} \cdot \left(\frac{5,6 \cdot 0,2365}{103,4 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,622^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 12,325 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$$

kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitelé

λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/m.K]

d_e – ekvivalentní průměr [m]

w_{sp} – rychlost spalin [m/s]

ν – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 10,23}{2 \cdot 173,03} = 0,2365 \text{ [m]} \quad (9.26)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Světlý průřez kanálu**

$$F = a_{III\text{tah}} \cdot b_{III\text{tah}} - D_{P2} \cdot l_{P2} \cdot n_{tr}^{P3} - \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4} \cdot n_{zt} \quad (9.27)$$

$$F = 2,43 \cdot 5,04 - 0,038 \cdot 2,33 \cdot 22 - \frac{\pi \cdot 0,032^2}{4} \cdot 42 = 10,23 \text{ [m}^2\text{]}$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a_{III\text{tah}} + b_{III\text{tah}}) + \pi \cdot D_{zt} \cdot n_{zt} + 2 \cdot n_{tr}^{P3} \cdot (D_{P3} + l_{P3}) \quad (9.28)$$

$$O = 2 \cdot (2,43 + 5,04) + \pi \cdot 0,032 \cdot 42 + 2 \cdot 22 \cdot (0,038 + 2,33) = 173,03 \text{ [m]}$$

9.2.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.29)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,208 \cdot 922,62^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{591,26}{922,62}\right)^4}{1 - \frac{591,26}{922,62}} = 19,38 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8$ [-] dle [8].

Stupeň černosti proudu spalín při teplotě proudu T

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (9.30)$$

$$a = 1 - e^{-0,233} = 0,208 \text{ [-]}$$

Exponent $k \cdot p \cdot s$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s \quad (9.31)$$

$$k \cdot p \cdot s = (17,02 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 0,54 = 0,233 \text{ [-]}$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [1/m·MPa]

r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [-]

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]

s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Součinitel zeslabení sálání tříatomových plyny**

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) \quad (9.32)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 0,54}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{922,62}{1000} \right) = 17,02 [1/m \cdot MPa]$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-]

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 [MPa]$$

s - účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy je pro celý úsek 1 konstantní. Tato hodnota platí i pro následující výpočty všech výhřevných ploch v úseku 1.

$$s = 0,9 \cdot D_{P3} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D_{P3}} - 1 \right) \quad (9.33)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,23 \cdot 0,07}{0,038^2} - 1 \right) = 0,54 [m]$$

kde D_{P3} - vnější průměr trubky P3 [m]

s_1 - příčná rozteč svazku [m]

s_2 - podélná rozteč svazku [m]

Teplota zanášeného povrchu stěn T_z

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 60 [°C] vyšší než teplota media uvnitř a to je 258,11 [°C] .

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 258,11 + 60 + 273,15 = 591,26 [K] \quad (9.34)$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 19,38 + 12,325 = 31,707 [W/m^2K]$$

9.2.1.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_1} = \frac{32,707}{1 + 0,0043 \cdot 32,707} = 27,9 [W/m^2K] \quad (9.35)$$

kde ε - součinitel zanesení

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Součinitel zanesení ε

Dle [8] volim

$$\varepsilon = 0,0043 [m^2 K/W]$$

9.2.1.4 Teplo odebrané membranovou stěnou

$$Q_{MS} = k \cdot S \cdot \Delta t \tag{9.36}$$

$$Q_{MS} = 27,9 \cdot 26 \cdot 388,426 \cdot 10^3 = 281,75 [kW]$$

kde k – součinitel prostupu tepla [W/m²K]S – teplosměnná plocha membranové stěny [m²] Δt – střední teplotní logaritmický spád [°C]**9.2.1.5 Teplosměnná plocha membranové stěny**

$$S = a_{III\text{tah}} \cdot v_{\dot{u}1} + b_{III\text{tah}} \cdot v_{\dot{u}1} \tag{9.37}$$

$$S = 2,43 \cdot 3,48 + 5,04 \cdot 3,48 = 26 [m^2]$$

9.2.1.6 Střední teplotní logaritmický spád

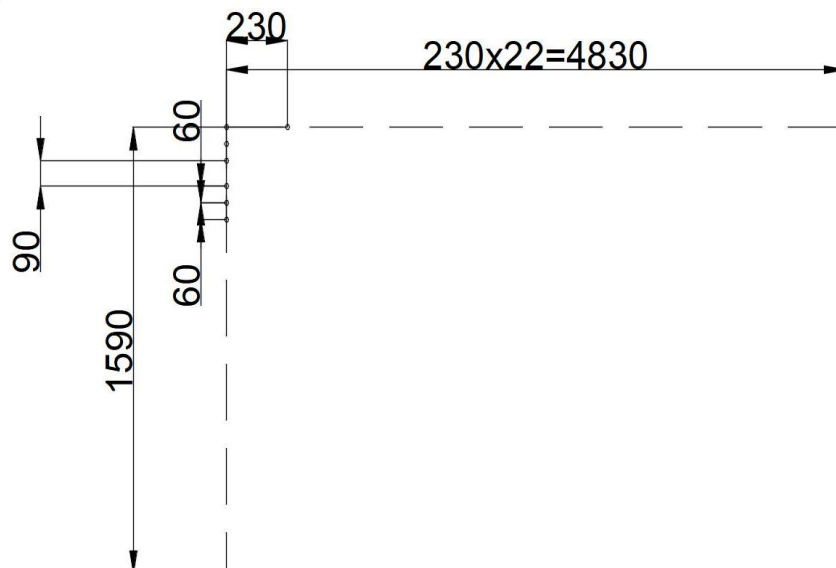
$$\Delta t_1 = t_{\dot{u}1}^{in} - t_{syt} = 707,94 - 258,11 = 449,82 [^\circ C] \tag{9.38}$$

$$\Delta t_2 = t_{\dot{u}1}^{out} - t_{syt} = 591 - 258,11 = 332,88 [^\circ C]$$

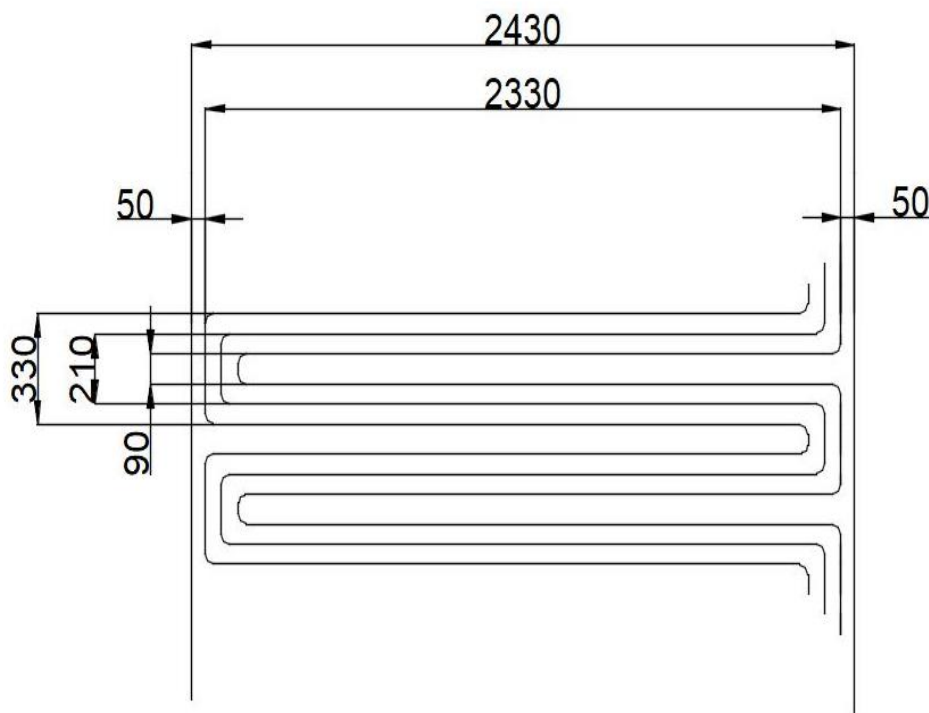
$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{449,82 - 332,88}{\ln \frac{449,82}{332,88}} = 388,426 [^\circ C]$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**9.2.2 PŘEHŘÍVÁK P3**

Přehřívák P3 je tvořen trubkovým svazkem, jenž je řešen jako trojhad. Počet řad tohoto přehříváku je 12. Je rozdělen na dva stupně. Po šířce kotle je umístěno 22 smyček. Trubky mají vnější průměr 38 mm a tloušťku stěny 4 mm. Příčná rozteč byla zvolena dle konzultace 230 mm z důvodu snížení zanášení trubkových svazků částicemi popílku, které jsou unášeny proudem spalin.



Obrázek 18 Konstrukční řešení přehříváku P3



Obrázek 19 Rozměry přehříváku P3

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Tabulka 21 Geometrické parametry přehříváku P3

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Výška přehříváku P3	v_{P3}	2,43	m
Delka přehříváku P3	l_{P3}	2,33	m
Výška úseku 1	$v_{ú1}$	3,48	m
Vnější průměr trubek	D_{P3}	38	mm
Tloušťka stěny	tl_{P3}	4	mm
Vnitřní průměr trubek	d_{P3}	30	mm
Příčná rozteč	s_1	230	mm
Podelná rozteč	s_2	70	mm
Počet řad	z_2	12	-
Počet trubek v jedné řadě	n_{tr}^{P3}	22	-
Počet smyček v jedné řadě	n_{sm}	22	-
Počet hadů přehříváku P3	n_{had}	3	-

Tabulka 22 Parametry páry přehříváku P3

Hmotnostní tok páry	M_p	15,42	kg/s
Výstup			
Měrný objem páry na výstupu:	v_{P3}^{out}	0,073432	m ³ /kg
Tlak páry na výstupu:	p_{P3}^{out}	4	MPa
Teplota páry na výstupu:	t_{P3}^{out}	400	°C
Vstup			
Měrný objem páry na vstupu:	v_{P2}^{in}	0,06077	m ³ /kg
Tlak páry na vstupu:	p_{P3}^{in}	4,15	MPa
Teplota páry na vstupu:	t_{P3}^{in}	328,45	°C
Tepelný výkon přehříváku P3:	Q_{P3}	2775	kW
Střední měrný objem v P3:	v_{P3}^{str}	0,067101	m³/kg
Střední teplota páry:	t_{P3}^{str}	364,23	°C
Střední tlak páry:	p_{P3}^{str}	4,075	MPa

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TRÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

9.2.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

Tabulka 23 Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v P3

Součinitel tepelné vodivosti páry	λ_p	0,056	W/mK
Součinitel kinematické viskozity páry	ν_p	$1,532 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Prandlovo číslo páry	Pr_p	0,9988	-

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{P3}} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_{P3}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.39)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,056}{0,03} \cdot \left(\frac{22,17 \cdot 0,03}{1,532 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,9988^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1327,91 [W/m \cdot K]$$

Kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitelé λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu a tlak páry [W/m.K] d_{P3} – vnitřní průměr trubek P3 [m] w_p – rychlost páry [m/s] ν_p – součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu proudu [m²/s] Pr_p – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu**Rychlost proudění páry:**

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{P3}^{str}}{F_p} \quad (9.40)$$

$$w_p = \frac{15,42 \cdot 0,067101}{0,0466} = 22,17 [m/s]$$

Průtočný průřez páry:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{P3}^2}{4} \cdot n_{sm} \cdot n_{had} \quad (9.41)$$

$$F_p = \frac{\pi \cdot 0,003^2}{4} \cdot 22 \cdot 3 = 0,0466 [m^2]$$

9.2.2.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D_{P3}} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D_{P3}}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (9.42)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,997 \cdot 1 \cdot \frac{79,4 \cdot 10^{-3}}{0,038} \cdot \left(\frac{5,6 \cdot 0,038}{103,4 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} \cdot 0,622^{0,33} = 50,71 [W/m^2K]$$

kde c_z – oprava na počet podélných řad [-] c_s – oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči [-] λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/mK]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

D_{P3} – vnější průměr trubek P3 [m]

w_{sp} – rychlost proudu spalin [m/s]

ν – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m^2/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Oprava na počet podélných řad

Pro $z_2 > 10$ platí $c_z = 1$ [8].

Oprava na uspořádání svazku

$$c_s = \left(1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right)^{-2} \quad (9.43)$$

$$c_s = \left(1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,84}{2}\right)^3\right)^{-2} = 0,997 [-]$$

Poměrná příčná rozteč

Pro $\sigma_2 < 2$ a $\sigma_1 > 3$ do vzorce dosazujeme $\sigma_1 = 3$ [8].

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{270}{38} = 6,05 [-] \quad (9.44)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{70}{38} = 1,84 [-] \quad (9.45)$$

9.2.2.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.46)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,208 \cdot 922,62^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{697,38}{922,62}\right)^4}{1 - \frac{697,38}{922,62}} = 23,1 [W/m^2K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8$ [-] dle [8].

Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu T

$$a = 1 - e^{-kps}$$

$$a = 1 - e^{-0,233} = 0,208 [-] \quad (9.47)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Exponent $k \cdot p \cdot s$**

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s \quad (9.48)$$

$$k \cdot p \cdot s = (17,02 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 0,54 = 0,233[-]$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$1/m \cdot MPa$]

r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [-]

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]

s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) \quad (9.49)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 0,54}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{922,62}{1000} \right) = 17,02 [1/m \cdot MPa]$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-]

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 [MPa]$

s - účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]

Teplota zanášeného povrchu stěn T_z

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 60 [$^{\circ}C$] vyšší než teplota media uvnitř a to je 364,23 [$^{\circ}C$].

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 364,23 + 60 + 273,15 = 697,38 [K] \quad (9.50)$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 23,1 + 50,71 = 73,82 [W/m^2K] \quad (9.51)$$

9.2.2.4 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,65 \cdot 73,82}{1 + \frac{73,82}{1327,91}} = 45,45 [W/m^2K] \quad (9.52)$$

kde $\psi = 0,65 [-]$ - součinitel tepelné efektivnosti, dle [8].

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**9.2.2.5 Střední teplotní logaritmický spád**

$$\Delta t_1 = t_{ú1}^{in} - t_{p3}^{in} = 707,94 - 328,45 = 379,5 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.53)$$

$$\Delta t_2 = t_{ú1}^{out} - t_{p3}^{out} = 591 - 400 = 191 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{379,5 - 191}{\ln \frac{379,5}{191}} = 274,54 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

9.2.2.6 Velikost teplosměnné plochy při navrhovaném výkonu P3

$$S_{návrh} = \frac{Q_{P3,návrh}}{k \cdot \Delta t \cdot 10^{-3}} \quad (9.54)$$

$$S_{návrh} = \frac{2775 \cdot 10^3}{45,45 \cdot 274,54 \cdot 10^{-3}} = 222,37 \text{ [m}^2\text{]}$$

kde $Q_{P3,návrh}$ - navrhovaný výkon přehříváku [kW]

9.2.2.7 Počet řad P3 (trojhadů)

$$n_{P3} = \frac{S_{návrh}}{\pi \cdot D_{P3} \cdot l_{P3} \cdot n_{had} \cdot n_{sm}} \quad (9.55)$$

$$n_{P3} = \frac{222,37}{\pi \cdot 0,038 \cdot 2,33 \cdot 3 \cdot 22} = 12,1$$

Volíme 12 řad

9.2.2.8 Skutečná výrobní plocha přehříváku P3

$$S_{SKUT}^{P3} = \pi \cdot D_{P3} \cdot l_{P3} \cdot n_{had} \cdot n_{sm} \cdot n_{P3} \quad (9.56)$$

$$S_{SKUT}^{P3} = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,33 \cdot 3 \cdot 22 \cdot 12 = 220,3 \text{ [m}^2\text{]}$$

9.2.2.9 Skutečný výkon přehříváku P3

$$Q_{SKUT}^{P3} = k \cdot S_{SKUT}^{P3} \cdot \Delta t \quad (9.57)$$

$$Q_{SKUT}^{P3} = 45,45 \cdot 220,3 \cdot 274,54 = 2749,16 \text{ [kW]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

9.2.3 ZÁVĚSNÉ TRUBKY

Tabulka 24 Geometrické parametry závěsných trubek (úsek 1)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr trubek	D_{ZT}	32	mm
Tloušťka stěny	tl_{ZT}	4	mm
Vnitřní průměr trubek	d_{ZT}	24	mm
Počet řad	$n_{řad,ZT}$	2	-
Počet trubek	$n_{tr,ZT}$	42	-

Tabulka 25 Parametry páry v závěsných trubkách (úsek 1)

Hmotnostní tok páry	M_p^{ZT}	14,52	kg/s
Výstup			
Měrný objem páry na výstupu:	v_{ZT}^{out}	0,04515	m ³ /kg
Tlak páry na výstupu:	p_{ZT}^{out}	4,45	MPa
Teplota páry na výstupu:	t_{ZT}^{out}	259,61	°C
Vstup			
Měrný objem páry na vstupu:	v_{ZT}^{in}	0,04355	m ³ /kg
Tlak páry na vstupu:	p_{ZT}^{in}	4,55	MPa
Teplota páry na vstupu:	t_{ZT}^{in}	258,11	°C
Tepelný výkon závěsných trubek:	Q_{ZT}	180,06	kW
Střední měrný objem:	v_{ZT}^{str}	0,04435	m³/kg
Střední teplota páry:	t_{ZT}^{str}	258,86	°C
Střední tlak páry:	p_{ZT}^{str}	4,5	MPa

9.2.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry:

Tabulka 26 Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v závěsných trubkách (úsek 1)

Součinitel tepelné vodivosti páry	λ_p	0,0525	W/mK
Součinitel kinematické viskozity páry	ν_p	$7,887 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
Prandlovo číslo páry	Pr_p	1,4	-

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{ZT}} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_{ZT}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.58)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0525}{0,024} \cdot \left(\frac{16,96 \cdot 0,024}{7,887 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,4^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2139,75 [W/m \cdot K]$$

Kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitele

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu a tlak páry [W/m.K]

d_{ZT} – vnitřní průměr trubek [m]

w_p – rychlost páry [m/s]

ν_p – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr_p – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{M_p^{ZT} \cdot v_{ZT}^{str}}{F_p^{ZT}} \quad (9.59)$$

$$w_p = \frac{14,52 \cdot 0,04435}{0,038} = 16,96 \text{ [m/s]}$$

Průtočný průřez páry:

$$F_p^{ZT} = \frac{\pi \cdot d_{ZT}^2}{4} \cdot n_{tr,ZT} \cdot n_{rad,ZT} \quad (9.60)$$

$$F_p^{ZT} = \frac{\pi \cdot 0,024^2}{4} \cdot 42 \cdot 2 = 0,038 \text{ [m}^2\text{]}$$

9.2.3.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.61)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{79,4 \cdot 10^{-3}}{0,2365} \cdot \left(\frac{5,6 \cdot 0,2365}{103,4 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,622^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 12,325 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$$

Kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitelé

λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/m.K]

d_e – ekvivalentní průměr [m]

w_{sp} – rychlost spalin [m/s]

ν – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

9.2.3.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.62)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,208 \cdot 922,62^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{592}{922,62} \right)^4}{1 - \frac{592}{922,62}} = 19,4 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}**

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8 [-]$ dle [8].

Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu T

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (9.63)$$

$$a = 1 - e^{-0,233} = 0,208 [-]$$

Exponent $k \cdot p \cdot s$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s \quad (9.64)$$

$$k \cdot p \cdot s = (17,02 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 0,54 = 0,233[-]$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [1/m·MPa]

r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [-]

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]

s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) \quad (9.65)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 0,54}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{922,62}{1000} \right) = 17,02 [1/m \cdot MPa]$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-]

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 [MPa]$

s - účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]

Teplota zanášeného povrchu stěn T_z

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 60 [°C] vyšší než teplota média uvnitř a to je 258,11[°C] .

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 258,86 + 60 + 273,15 = 592 [K] \quad (9.66)$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 19,4 + 12,325 = 31,73 [W/m^2K] \quad (9.67)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**9.2.3.4 Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,65 \cdot 31,73}{1 + \frac{31,73}{2139,75}} = 20,32 [W/m^2K] \quad (9.68)$$

kde $\psi = 0,65 [-]$ - součinitel tepelné efektivity, dle [8].

9.2.3.5 Teplo odebrané závěsnými trubkami

$$Q_{ZT} = k \cdot S \cdot \Delta t \quad (9.69)$$

$$Q_{ZT} = 20,32 \cdot 14,7 \cdot 387,6 \cdot 10^3 = 115,75 [kW]$$

kde k – součinitel prostupu tepla [W/m^2K]
 S – teplosměnná plocha závěsných trubek [m^2]
 Δt – střední teplotní logaritmický spád [$^{\circ}C$]

Teplosměnná plocha závěsných trubek

$$S = \pi \cdot D_{ZT} \cdot v_{\dot{u}1} \cdot n_{tr} \cdot n_{ZT} \quad (9.70)$$

$$S = \pi \cdot 0,032 \cdot 3,48 \cdot 42 \cdot 2 = 14,7 [m^2]$$

9.2.3.6 Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_1 = t_{\dot{u}1}^{in} - t_{ZT}^{out} = 707,94 - 259,6 = 449,82 [^{\circ}C] \quad (9.71)$$

$$\Delta t_2 = t_{\dot{u}1}^{out} - t_{ZT}^{in} = 591 - 258,11 = 331,4 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{449,82 - 331,4}{\ln \frac{449,82}{331,4}} = 387,6 [^{\circ}C]$$

9.2.4 KONTROLA SPALIN NA VÝSTUPU Z ÚSEKU 1**Teplo odebrané spalinám v úseku 1**

$$Q_{CELK}^{\dot{u}1} = Q_{ZT} + Q_{MS} + Q_{SKUT}^{P3} = 115,75 + 281,75 + 2749,16 = 3146,65 [kW] \quad (9.72)$$

Teplo spalin na vstupu do úseku 1

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 7502,36 \cdot 2,375 = 17819,33 [kW] \quad (9.73)$$

Teplo spalin na výstupu z úseku 1

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q = 17819,33 - 3146,65 = 14672,67 [kW] \quad (9.74)$$

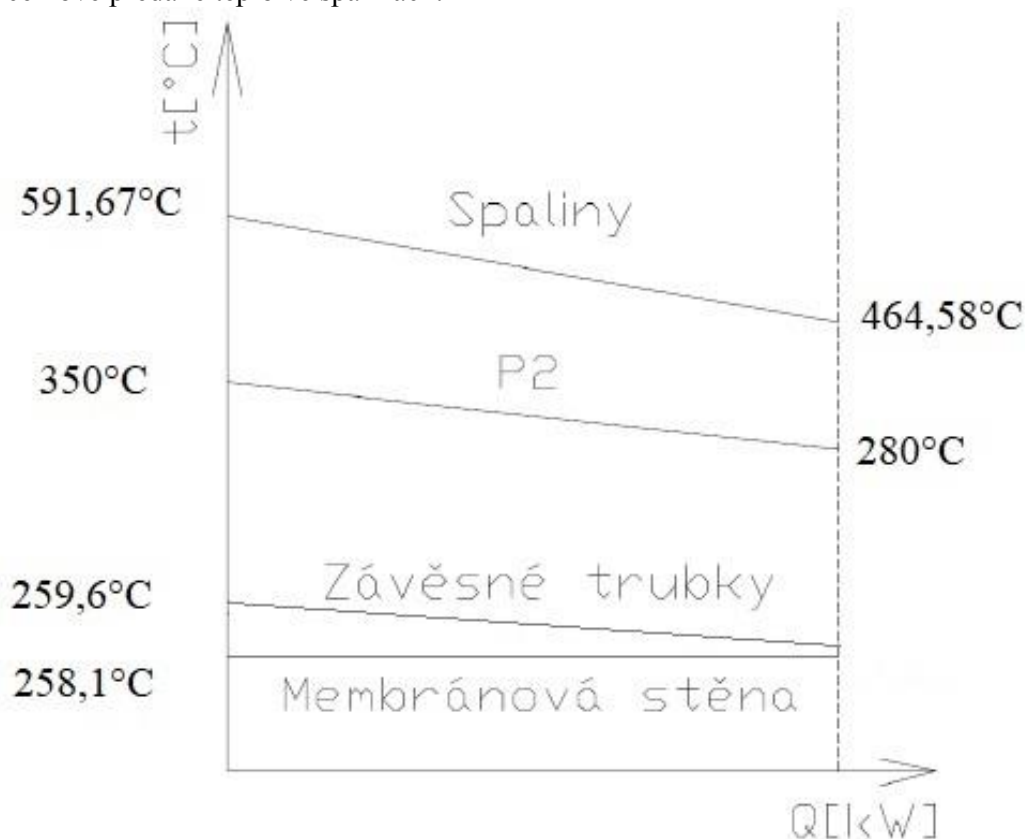
ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Entalpie spalin na výstupu z úseku 1**

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{14672,67}{2,375} = 6177,54 \text{ [kJ/kg]} \quad (9.75)$$

Této entalpii spalin (tab. 3) na výstupu odpovídá teplota 591,67 °C, která se od předpokládané teploty 591 °C liší pouze minimálně.

9.3 ÚSEK 2

Úsek 2 se skládá z membránových stěn výparníku, závěsných trubek a přehříváku P2. Každá výhřevná plocha je počítána samostatně a nakonec se výkon jednotlivých výhřevných ploch sečte a určí se celkové předané teplo ve spalinách.



Obrázek 20 Tepelné spády v úseku 2

Střední teplota spalin v úseku 2

$$t_{str} = \frac{t_{ú2}^{in} + t_{ú2}^{out}}{2} \quad (9.76)$$

$$t_{str} = \frac{591,67 + 464,58}{2} = 527,93 \text{ [°C]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Absolutní teplota proudu spalin**

$$T = t_{str} + 273,15 = 527,93 + 273,15 = 801,08 \text{ [K]} \quad (9.77)$$

Tabulka 27 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu v úseku 2

Součinitel tepelné vodivosti spalin	λ	$68,7 \cdot 10^{-3}$	W/mK
Součinitel kinematické viskozity spalin	ν	$8,17 \cdot 10^{-5}$	m ² /s
Prandlovo číslo spalin	Pr	0,634	-

Rychlost proudu spalin v úseku 2

$$w_{sp} = \frac{O_{sv} \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{273,15} \cdot M_{pv}}{a_{IIIItah} \cdot b_{IIIItah} - D_{P2} \cdot l_{P2} \cdot n_{tr}^{P2} - \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4} \cdot n_{tr,ZT} \cdot n_{řad,ZT}} \quad (9.78)$$

$$w_{sp} = \frac{7,132 \cdot \frac{527,93 + 273,15}{273,15} \cdot 2,375}{2,43 \cdot 5,04 - 0,035 \cdot 2,33 \cdot 43 - \frac{\pi \cdot 0,032^2}{4} \cdot 2 \cdot 42} = 5,73 \text{ [m/s]}$$

kde O_{sv} – objem spalin

M_{pv} – palivo skutečně spálené

t_{str} – střední teplota v úseku 2

$a_{IIIItah} \cdot b_{IIIItah}$ – rozměry průřezu úseku 2

D_{P2} – vnější průměr trubek přehříváku P2

l_{P2} – délka trubky přehříváku P2

D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek

n_{tr}^{P2} – počet trubek přehříváku P2 v jedné řadě

$n_{tr,ZT}$ – počet závěsných trubek

$n_{řad,ZT}$ – počet řad závěsných trubek

9.3.1 MEMBRÁNOVÁ STĚNA**9.3.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.79)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{68,7 \cdot 10^{-3}}{0,158} \cdot \left(\frac{5,6 \cdot 0,158}{8,17 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,634^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 14,34 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$$

Kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitelé

λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/m.K]

d_e – ekvivalentní průměr [m]

w_{sp} – rychlost spalin [m/s]

ν – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Ekvivalentní průměr**

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 8,673}{2 \cdot 219,624} = 0,158 \text{ [m]} \quad (9.80)$$

Světlý průřez kanálu

$$F = a_{III\text{tah}} \cdot b_{III\text{tah}} - D_{P2} \cdot l_{P2} \cdot n_{tr}^{P2} - \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4} \cdot n_{tr,ZT} \cdot n_{rad,ZT} \quad (9.81)$$

$$F = 2,43 \cdot 5,04 - 0,035 \cdot 2,33 \cdot 43 - \frac{\pi \cdot 0,032^2}{4} \cdot 2 \cdot 42 = 8,673 \text{ [m}^2\text{]}$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a_{III\text{tah}} + b_{III\text{tah}}) + \pi \cdot D_{zt} \cdot n_{tr,ZT} \cdot n_{rad,ZT} + 2 \cdot n_{tr}^{P2} \cdot (D_{P2} + l_{P2}) \quad (9.82)$$

$$O = 2 \cdot (2,43 + 5,04) + \pi \cdot 0,032 \cdot 2 \cdot 42 + 2 \cdot 22 \cdot (0,035 + 2,33) = 219,624 \text{ [m]}$$

9.3.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.83)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,164 \cdot 801,08^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{591,26}{801,08}\right)^4}{1 - \frac{591,26}{801,08}} = 11,6 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8$ [-] dle [8].

Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu T

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (9.84)$$

$$a = 1 - e^{-0,179} = 0,164 \text{ [-]}$$

Exponent $k \cdot p \cdot s$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s \quad (9.85)$$

$$k \cdot p \cdot s = (25,9 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 0,272 = 0,179 \text{ [-]}$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [1/m·MPa]

r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [-]

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]

s – efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Součinitel zeslabení sálání tříatomových plyny**

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) \quad (9.86)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 0,272}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{801,08}{1000} \right) = 25,9 \text{ [1/m} \cdot \text{MPa]}$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-]

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 \text{ [MPa]}$

s - účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy je pro celý úsek 2 konstantní. Tato hodnota platí i pro následující výpočty všech výhřevných ploch v úseku 2.

$$s = 0,9 \cdot D_{P2} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D_{P2}} - 1 \right) \quad (9.87)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,035 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,115 \cdot 0,075}{0,035^2} - 1 \right) = 0,272 \text{ [m]}$$

kde D_{P2} - vnější průměr trubky P2 [m]

s_1 - příčná rozteč svazku [m]

s_2 - podélná rozteč svazku [m]

Teplota zanášeného povrchu stěn T_z

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 60 [°C] vyšší než teplota media uvnitř a to je 258,11[°C] .

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 258,11 + 60 + 273,15 = 591,26 \text{ [K]} \quad (9.88)$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 11,6 + 14,34 = 25,93 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.89)$$

9.3.1.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_1} = \frac{25,93}{1 + 0,0043 \cdot 25,93} = 23,33 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.90)$$

kde ε - součinitel zanesení

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Součinitel zanesení ε

Dle [8] volim

$$\varepsilon = 0,0043 [m^2 K/W]$$

9.3.1.4 Teplo odebrané membranovou stěnou

$$Q_{MS} = k \cdot S \cdot \Delta t \tag{9.91}$$

$$Q_{MS} = 23,33 \cdot 27,71 \cdot 264,72 \cdot 10^3 = 171,15 [kW]$$

kde k – součinitel prostupu tepla [W/m²K]S – teplosměnná plocha membranové stěny [m²] Δt – střední teplotní logaritmický spád [°C]**9.3.1.5 Teplosměnná plocha membranové stěny**

$$S = a_{III\text{tah}} \cdot v_{\dot{u}2} + b_{III\text{tah}} \cdot v_{\dot{u}2} \tag{9.92}$$

$$S = 2,43 \cdot 3,71 + 5,04 \cdot 3,71 = 27,71 [m^2]$$

9.3.1.6 Střední teplotní logaritmický spád

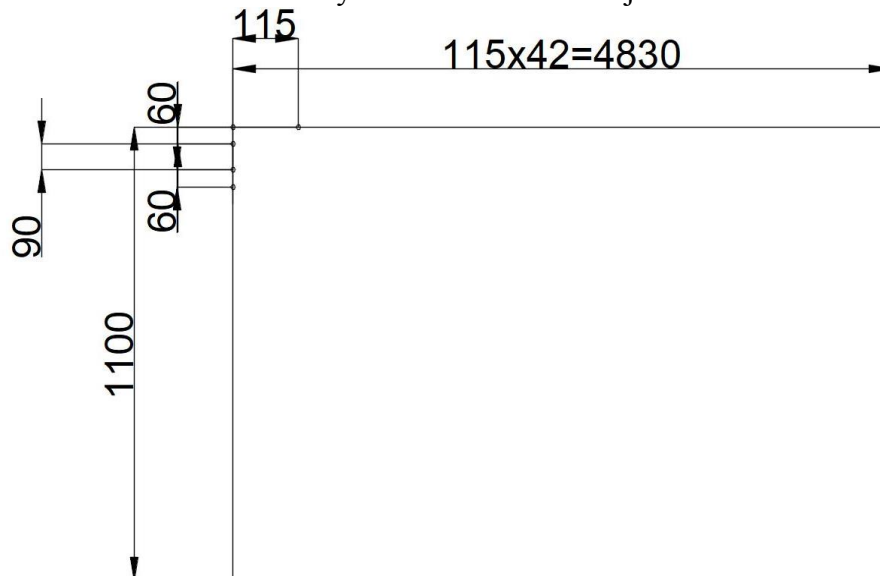
$$\Delta t_1 = t_{\dot{u}2}^{in} - t_{syt} = 591,67 - 258,11 = 333,56 [^\circ C] \tag{9.93}$$

$$\Delta t_2 = t_{\dot{u}2}^{out} - t_{syt} = 464,2 - 258,11 = 206,1 [^\circ C]$$

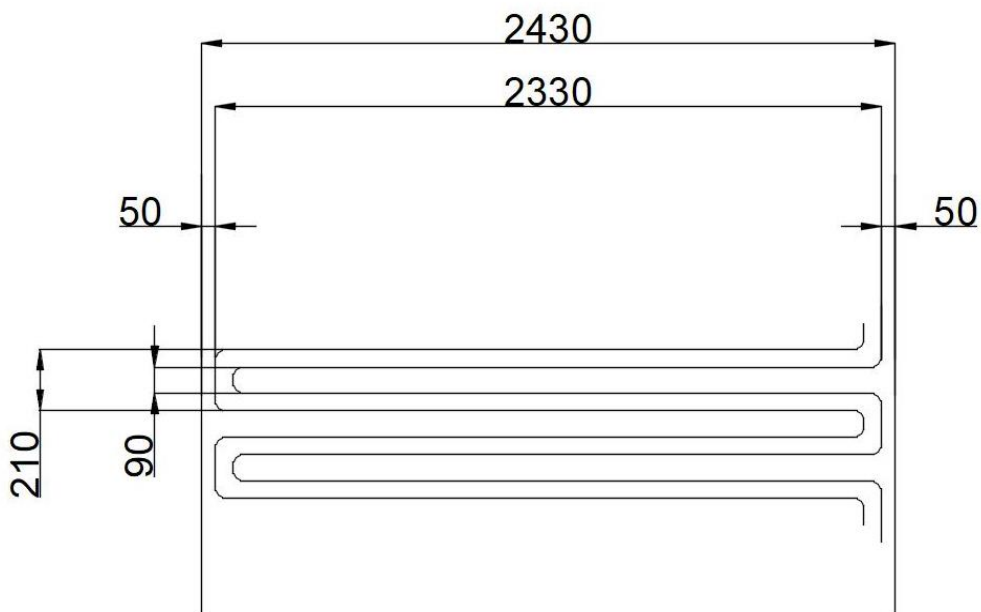
$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{333,56 - 206,1}{\ln \frac{333,56}{206,1}} = 264,72 [^\circ C]$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**9.3.2 PŘEHŘÍVÁK P2**

Přehřívák P2 je tvořen trubkovým svazkem, jenž je řešen jako dvojhad. Počet řad tohoto přehříváku je 16. Je rozdělen na dva stupně. Po šířce kotle je umístěno 43 smyček. Trubky mají vnější průměr 35 mm a tloušťku stěny 4 mm. Příčná rozteč je 115 mm.



Obrázek 21 Konstrukční řešení přehříváku P2



Obrázek 22 Rozměry přehříváku P2

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Tabulka 28 Geometrické parametry přehříváku P2

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Výška přehříváku P2	v_{P2}	2,31	m
Delka přehříváku P2	l_{P2}	2,33	m
Výška úseku 2	$v_{ú2}$	3,71	m
Vnější průměr trubek	D_{P2}	35	mm
Tloušťka stěny	tl_{P2}	4	mm
Vnitřní průměr trubek	d_{P2}	27	mm
Příčná rozteč	s_1	115	mm
Podelná rozteč	s_2	75	mm
Počet řad	z_2	16	-
Počet trubek v jedné řadě	n_{tr}^{P2}	43	-
Počet smyček v jedné řadě	n_{sm}	43	-
Počet hadů přehříváku P2	n_{had}	2	-

Tabulka 29 Parametry páry přehříváku P2

Hmotnostní tok páry	M_p	15,08	kg/s
Výstup			
Měrný objem páry na výstupu:	v_{P2}^{out}	0,063855	m ³ /kg
Tlak páry na výstupu:	p_{P2}^{out}	4,15	MPa
Teplota páry na výstupu:	t_{P2}^{out}	350	°C
Vstup			
Měrný objem páry na vstupu:	v_{P2}^{in}	0,06077	m ³ /kg
Tlak páry na vstupu:	p_{P2}^{in}	4,3	MPa
Teplota páry na vstupu:	t_{P2}^{in}	280	°C
Tepelný výkon přehříváku P2:	Q_{P2}	3016,7	kW
Střední měrný objem v P2:	v_{P2}^{str}	0,057375	m³/kg
Střední teplota páry:	t_{P2}^{str}	315	°C
Střední tlak páry:	p_{P2}^{str}	4,225	MPa

9.3.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry:

Tabulka 30 Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v P2

Součinitel tepelné vodivosti páry	λ_p	0,053	W/mK
Součinitel kinematické viskozity páry	ν_p	$1,184 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Prandlovo číslo páry	Pr_p	1,067	-

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{P2}} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_{P2}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.94)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,053}{0,027} \cdot \left(\frac{17,96 \cdot 0,027}{1,184 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 1,067^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1356,85 [W/m \cdot K]$$

Kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitele

λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu a tlak páry [W/m.K]

d_{P2} – vnitřní průměr trubek P2 [m]

w_p – rychlost páry [m/s]

ν_p – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr_p – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{P2}^{str}}{F_p} \quad (9.95)$$

$$w_p = \frac{15,08 \cdot 0,057375}{0,04924} = 17,96 [m/s]$$

Průtočný průřez páry:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{P2}^2}{4} \cdot n_{sm} \cdot n_{had} \quad (9.96)$$

$$F_p = \frac{\pi \cdot 0,027^2}{4} \cdot 43 \cdot 2 = 0,04924 [m^2]$$

9.3.2.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D_{P2}} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D_{P2}}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (9.97)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1,003 \cdot 1 \cdot \frac{68,7 \cdot 10^{-3}}{0,035} \cdot \left(\frac{5,73 \cdot 0,035}{8,17 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,634^{0,33} = 54,12 [W/m^2 K]$$

kde c_z – oprava na počet podélných řad [-]

c_s – oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči [-]

λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/mK]

D_{P2} – vnější průměr trubek P2 [m]

w_{sp} – rychlost proudu spalín [m/s]

ν – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Oprava na počet podélných řad

Pro $z_2 > 10$ platí $c_z = 1$ [8].

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Oprava na uspořádání svazku**

$$c_s = \left(1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right)^{-2} \quad (9.98)$$

$$c_s = \left(1 + (2 \cdot 3,286 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,143}{2}\right)^3\right)^{-2} = 1,003 [-]$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{115}{38} = 3,286 [-] \quad (9.99)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{75}{35} = 2,143 [-] \quad (9.100)$$

9.3.2.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.101)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,164 \cdot 801,08^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{648,15}{801,08}\right)^4}{1 - \frac{648,15}{801,08}} = 12,92 [W/m^2K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8 [-]$ dle [8].

Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu T

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (9.102)$$

$$a = 1 - e^{-0,179} = 0,164 [-]$$

Exponent $k \cdot p \cdot s$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s \quad (9.103)$$

$$k \cdot p \cdot s = (25,9 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 0,272 = 0,179 [-]$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [1/m·MPa]

r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [-]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]
 s – efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) \quad (9.104)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 0,272}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{801,08}{1000} \right) = 25,9 \text{ [1/m} \cdot \text{MPa]}$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-]

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 \text{ [MPa]}$

s - účinná tloušťka sálové vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]

Teplota zanášeného povrchu stěn T_z

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 60 [°C] vyšší než teplota média uvnitř a to je 364,23[°C] .

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 315 + 60 + 273,15 = 648,15 \text{ [K]} \quad (9.105)$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 12,92 + 54,12 = 67,034 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.106)$$

9.3.2.4 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,65 \cdot 67,034}{1 + \frac{67,034}{1356,85}} = 41,52 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.107)$$

kde $\psi = 0,65$ [-] - součinitel tepelné efektivity, dle [8].

9.3.2.5 Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_1 = t_{\dot{u}2}^{in} - t_{p2}^{out} = 591,67 - 350 = 241,7 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.108)$$

$$\Delta t_2 = t_{\dot{u}2}^{out} - t_{p2}^{in} = 464,2 - 280 = 184,3 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{241,7 - 184,3}{\ln \frac{241,7}{184,3}} = 211,7 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**9.3.2.6 Velikost teplosměnné plochy při navrhovaném výkonu P2**

$$S_{návrh} = \frac{Q_{P2,návrh}}{k \cdot \Delta t \cdot 10^{-3}} \quad (9.109)$$

$$S_{návrh} = \frac{3016,7 \cdot 10^3}{41,52 \cdot 211,7 \cdot 10^{-3}} = 343,2 [m^2]$$

kde $Q_{P2,návrh}$ - navrhovaný výkon přehříváku [kW]

9.3.2.7 Počet řad P2 (dvojhadů)

$$n_{P2} = \frac{S_{návrh}}{\pi \cdot D_{P2} \cdot l_{P2} \cdot n_{had} \cdot n_{sm}} \quad (9.110)$$

$$n_{P2} = \frac{343,2}{\pi \cdot 0,035 \cdot 2,33 \cdot 2 \cdot 43} = 15,6 [-]$$

Volíme 16 řad

9.3.2.8 Skutečná výrobní plocha přehříváku P2

$$S_{SKUT}^{P2} = \pi \cdot D_{P2} \cdot l_{P2} \cdot n_{had} \cdot n_{sm} \cdot n_{P2} \quad (9.111)$$

$$S_{SKUT}^{P2} = \pi \cdot 0,035 \cdot 2,33 \cdot 3 \cdot 43 \cdot 16 = 352,53 [m^2]$$

9.3.2.9 Skutečný výkon přehříváku P2

$$Q_{SKUT}^{P2} = k \cdot S_{SKUT}^{P2} \cdot \Delta t \quad (9.112)$$

$$Q_{SKUT}^{P2} = 41,52 \cdot 352,53 \cdot 211,7 = 3098,7 [kW]$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

9.3.3 ZÁVĚSNÉ TRUBKY

Tabulka 31 Geometrické parametry závěsných trubek (úsek 2)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr trubek	D_{ZT}	32	mm
Tloušťka stěny	tl_{ZT}	4	mm
Vnitřní průměr trubek	d_{ZT}	24	mm
Počet řad	n_{ZT}	2	-
Počet trubek	n_{tr}	42	-

Tabulka 32 Parametry páry v závěsných trubkách (úsek 2)

Hmotnostní tok páry	M_p^{ZT}	14,52	kg/s
Výstup			
Měrný objem páry na výstupu:	v_{ZT}^{out}	0,04515	m ³ /kg
Tlak páry na výstupu:	p_{ZT}^{out}	4,45	MPa
Teplota páry na výstupu:	t_{ZT}^{out}	259,61	°C
Vstup			
Měrný objem páry na vstupu:	v_{ZT}^{in}	0,04355	m ³ /kg
Tlak páry na vstupu:	p_{ZT}^{in}	4,55	MPa
Teplota páry na vstupu:	t_{ZT}^{in}	258,11	°C
Tepelný výkon závěsných trubek:	Q_{ZT}	180,06	kW
Střední měrný objem:	v_{ZT}^{str}	0,04435	m³/kg
Střední teplota páry:	t_{ZT}^{str}	258,86	°C
Střední tlak páry:	p_{ZT}^{str}	4,5	MPa

9.3.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry:

Tabulka 33 Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v závěsných trubkách (úsek 2)

Součinitel tepelné vodivosti páry	λ_p	0,0525	W/mK
Součinitel kinematické viskozity páry	ν_p	$7,887 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
Prandlovo číslo páry	Pr_p	1,4	-

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{ZT}} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_{ZT}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.113)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0525}{0,024} \cdot \left(\frac{16,96 \cdot 0,024}{7,887 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,4^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2139,75 [W/m \cdot K]$$

Kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitele λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu a tlak páry [W/m.K]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

d_{zT} – vnitřní průměr trubek [m]

w_p – rychlost páry [m/s]

ν_p – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr_p – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{M_p^{zT} \cdot v_{zT}^{str}}{F_p^{zT}} \quad (9.114)$$

$$w_p = \frac{14,52 \cdot 0,04435}{0,038} = 16,96 \text{ [m/s]}$$

Průtočný průřez páry:

$$F_p^{zT} = \frac{\pi \cdot d_{zT}^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{zT} \quad (9.115)$$

$$F_p^{zT} = \frac{\pi \cdot 0,024^2}{4} \cdot 42 \cdot 2 = 0,038 \text{ [m}^2\text{]}$$

9.3.3.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.116)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{68,7 \cdot 10^{-3}}{0,158} \cdot \left(\frac{5,73 \cdot 0,158}{8,17 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,634^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 14,34 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$$

Kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitelé

λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/m.K]

d_e – ekvivalentní průměr [m]

w_{sp} – rychlost spalin [m/s]

ν – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

9.3.3.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.117)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,164 \cdot 801,08^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{592}{801,08} \right)^4}{1 - \frac{592}{801,08}} = 11,6 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8$ [–] dle [8].

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Stupeň černosti proudu spalín při teplotě proudu T**

$$a = 1 - e^{-kps}$$

(9.118)

$$a = 1 - e^{-0,179} = 0,164 [-]$$

Exponent $k \cdot p \cdot s$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s$$

(9.119)

$$k \cdot p \cdot s = (25,9 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 0,272 = 0,233[-]$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [1/m·MPa] r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [-]

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]

s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů

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

(9.120)

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 0,272}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{801,08}{1000} \right) = 25,9 [1/m \cdot MPa]$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-] p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa] $p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 [MPa]$

s - účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

 T_0 - teplota na konci ohniště [K] r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]**Teplota zanášeného povrchu stěn T_z**

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 60 [°C] vyšší než teplota média uvnitř a to je 258,11 [°C] .

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 258,86 + 60 + 273,15 = 592 [K] \quad (9.121)$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 11,6 + 14,34 = 25,93 [W/m^2K] \quad (9.122)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**9.3.3.4 Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,65 \cdot 25,93}{1 + \frac{25,93}{2139,75}} = 16,7 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.123)$$

kde $\psi = 0,65$ [-] - součinitel tepelné efektivnosti, dle [8].

9.3.3.5 Teplo odebrané závěsnými trubkami

$$Q_{ZT} = k \cdot S \cdot \Delta t \quad (9.124)$$

$$Q_{ZT} = 16,7 \cdot 15,66 \cdot 263,84 \cdot 10^3 = 68,87 \text{ [kW]}$$

kde k – součinitel prostupu tepla [W/m²K]

S – teplosměnná plocha závěsných trubek [m²]

Δt – střední teplotní logaritmický spád [°C]

9.3.3.6 Teplosměnná plocha závěsných trubek

$$S = \pi \cdot D_{ZT} \cdot v_{\dot{u}2} \cdot n_{tr} \cdot n_{ZT} \quad (9.125)$$

$$S = \pi \cdot 0,032 \cdot 3,71 \cdot 42 \cdot 2 = 15,66 \text{ [m}^2\text{]}$$

9.3.3.7 Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_1 = t_{\dot{u}2}^{in} - t_{ZT}^{out} = 591,67 - 259,6 = 333,56 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.126)$$

$$\Delta t_2 = t_{\dot{u}2}^{out} - t_{ZT}^{in} = 464,2 - 258,11 = 204,59 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{333,56 - 204,59}{\ln \frac{333,56}{204,59}} = 263,84 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

9.3.4 KONTROLA SPALIN NA VÝSTUPU Z ÚSEKU 2**Teplo odebrané spalinám v úseku 2**

$$Q_{CELK}^{\dot{u}2} = Q_{ZT} + Q_{MS} + Q_{SKUT}^{P3} = 68,87 + 171,15 + 3098,72 = 3338,75 \text{ [kW]} \quad (9.127)$$

Teplo spalin na vstupu do úseku 2

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 6177,54 \cdot 2,375 = 14672,67 \text{ [kW]} \quad (9.128)$$

Teplo spalin na výstupu z úseku 2

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q = 14672,67 - 3338,75 = 11333,93 \text{ [kW]} \quad (9.129)$$

Entalpie spalin na výstupu z úseku 2

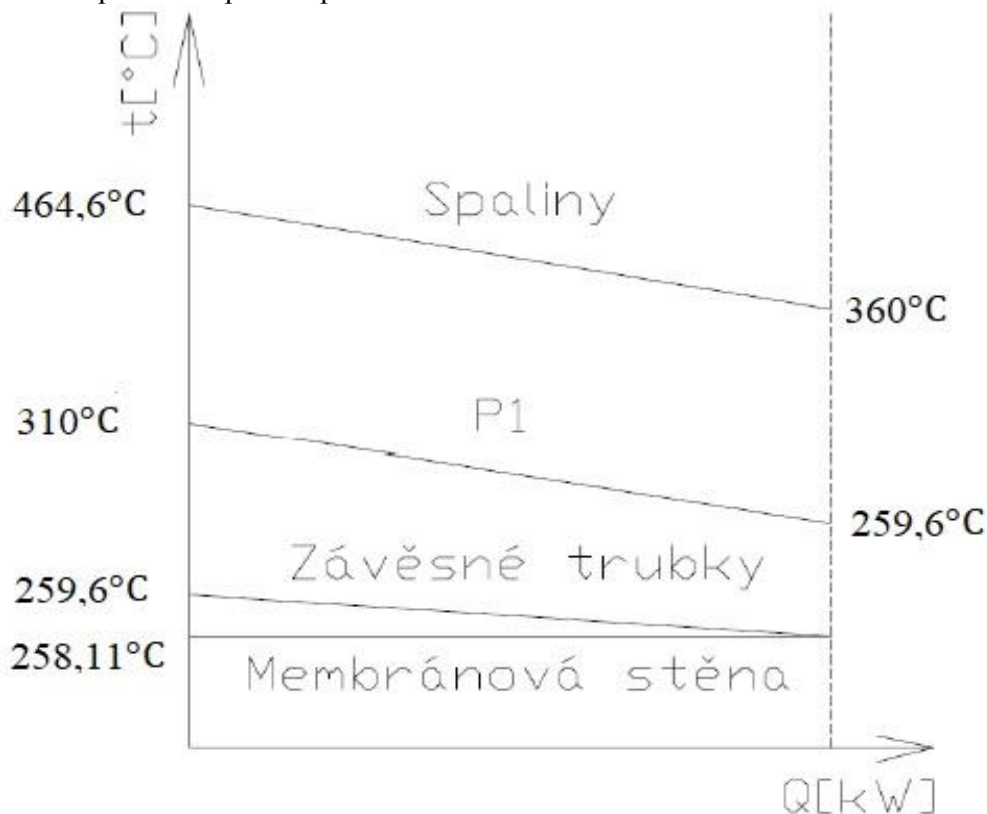
ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{11333,93}{2,375} = 4771,85 \text{ [kJ/kg]} \quad (9.130)$$

Této entalpii spalin (tab. 3) na výstupu odpovídá teplota 464,58 °C, která se od předpokládané teploty 464,2 °C liší pouze minimálně.

9.4 ÚSEK 3

Úsek 3 se skládá z membránových stěn výparníku, závěsných trubek a přehříváku P1. Každá výhřevná plocha je počítána samostatně a nakonec se výkon jednotlivých výhřevných ploch sečte a určí se celkové předané teplo ve spalinách.



Obrázek 23 Tepelné spády v úseku 3

Střední teplota spalin v úseku 3

$$t_{str} = \frac{t_{ú3}^{in} + t_{ú3}^{out}}{2} \quad (9.131)$$

$$t_{str} = \frac{464,6 + 359,5}{2} = 412,04 \text{ [°C]}$$

Absolutní teplota proudu spalin

$$T = t_{str} + 273,15 = 412,04 + 273,15 = 685,2 \text{ [K]} \quad (9.132)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Tabulka 34 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu (úsek 3)

Součinitel tepelné vodivosti spalin	λ	$58,6 \cdot 10^{-3}$	W/mK
Součinitel kinematické viskozity spalin	ν	$8,17 \cdot 10^{-5}$	m ² /s
Prandlovo číslo spalin	Pr	0,645	-

Rychlost proudu spalin v úseku 3

$$w_{sp} = \frac{O_{SV} \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{273,15} \cdot M_{pv}}{a_{IIIItah} \cdot b_{IIIItah} - D_{P1} \cdot l_{P1} \cdot n_{tr}^{P1} - \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4} \cdot n_{tr,ZT} \cdot n_{řad,ZT}} \quad (9.133)$$

$$w_{sp} = \frac{7,132 \cdot \frac{527,93 + 273,15}{273,15} \cdot 2,375}{2,43 \cdot 5,04 - 0,035 \cdot 2,33 \cdot 43 - \frac{\pi \cdot 0,032^2}{4} \cdot 2 \cdot 42} = 4,9 \text{ [m/s]}$$

kde O_{SV} – objem spalin M_{pv} – palivo skutečně spálené t_{str} – střední teplota v úseku 3 $a_{IIIItah} \cdot b_{IIIItah}$ – rozměry průřezu úseku 3 D_{P1} – vnější průměr trubek přehříváku P1 l_{P1} – délka trubky přehříváku P1 D_{zt} – vnější průměr závěsných trubek n_{tr}^{P1} – počet trubek přehříváku P1 v jedné řadě $n_{tr,ZT}$ – počet závěsných trubek $n_{řad,ZT}$ – počet řad závěsných trubek

9.4.1 MEMBRÁNOVÁ STĚNA

9.4.1.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.134)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{58,6 \cdot 10^{-3}}{0,158} \cdot \left(\frac{4,9 \cdot 0,158}{8,17 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,645^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 10,87 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$$

Kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitelé λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/m.K] d_e – ekvivalentní průměr [m] w_{sp} – rychlost spalin [m/s] ν – součinitel kinematické viskozity pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 8,673}{2 \cdot 219,624} = 0,158 \text{ [m]} \quad (9.135)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Světlý průřez kanálu**

$$F = a_{III\text{tah}} \cdot b_{III\text{tah}} - D_{P1} \cdot l_{P1} \cdot n_{tr}^{P1} - \frac{\pi \cdot D_{zt}^2}{4} \cdot n_{tr,ZT} \cdot n_{\text{rad},ZT} \quad (9.136)$$

$$F = 2,43 \cdot 5,04 - 0,035 \cdot 2,33 \cdot 43 - \frac{\pi \cdot 0,032^2}{4} \cdot 2 \cdot 42 = 8,673 \text{ [m}^2\text{]}$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a_{III\text{tah}} + b_{III\text{tah}}) + \pi \cdot D_{zt} \cdot n_{tr,ZT} \cdot n_{\text{rad},ZT} + 2 \cdot n_{tr}^{P1} \cdot (D_{P1} + l_{P1}) \quad (9.137)$$

$$O = 2 \cdot (2,43 + 5,04) + \pi \cdot 0,032 \cdot 2 \cdot 42 + 2 \cdot 22 \cdot (0,035 + 2,33) = 219,624 \text{ [m]}$$

9.4.1.2 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.138)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,173 \cdot 685,2^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{591,26}{685,2}\right)^4}{1 - \frac{591,26}{685,2}} = 9,26 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8$ [-] dle [8].

Stupeň černosti proudu spalín při teplotě proudu T

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (9.139)$$

$$a = 1 - e^{-0,189} = 0,173 \text{ [-]}$$

Exponent $k \cdot p \cdot s$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s \quad (9.140)$$

$$k \cdot p \cdot s = (27,5 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 0,272 = 0,179 \text{ [-]}$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [1/m·MPa]

r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [-]

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]

s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Součinitel zeslabení sálání tříatomových plyny**

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) \quad (9.141)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 0,272}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{685,2}{1000} \right) = 27,5 [1/m \cdot MPa]$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-]

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 [MPa]$

s - účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy je pro celý úsek 3 konstantní. Tato hodnota platí i pro následující výpočty všech výhřevných ploch v úseku 3.

$$s = 0,9 \cdot D_{P1} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D_{P1}} - 1 \right) \quad (9.142)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,035 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,115 \cdot 0,075}{0,035^2} - 1 \right) = 0,272 [m]$$

kde D_{P1} - vnější průměr trubky P2 [m]

s_1 - příčná rozteč svazku [m]

s_2 - podélná rozteč svazku [m]

Teplota zanášeného povrchu stěn T_z

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 60 [°C] vyšší než teplota media uvnitř a to je 258,11 [°C] .

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 258,11 + 60 + 273,15 = 591,26 [K] \quad (9.143)$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 9,26 + 10,87 = 20,14 [W/m^2K] \quad (9.144)$$

9.4.1.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_1} = \frac{20,14}{1 + 0,0043 \cdot 20,14} = 18,53 [W/m^2K] \quad (9.145)$$

kde ε - součinitel zanesení

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Součinitel zanesení ε

Dle [8] volim

$$\varepsilon = 0,0043 [m^2 K/W]$$

9.4.1.4 Teplo odebrané membranovou stěnou

$$Q_{MS} = k \cdot S \cdot \Delta t \tag{9.146}$$

$$Q_{MS} = 18,53 \cdot 41,16 \cdot 147,75 \cdot 10^3 = 112,7 [kW]$$

kde k – součinitel prostupu tepla [W/m²K]S – teplosměnná plocha membranové stěny [m²] Δt – střední teplotní logaritmický spád [°C]**9.4.1.5 Teplosměnná plocha membranové stěny**

$$S = a_{III\text{tah}} \cdot v_{\dot{u}3} + b_{III\text{tah}} \cdot v_{\dot{u}3} \tag{9.147}$$

$$S = 2,43 \cdot 5,51 + 5,04 \cdot 5,51 = 41,16 [m^2]$$

9.4.1.6 Střední teplotní logaritmický spád

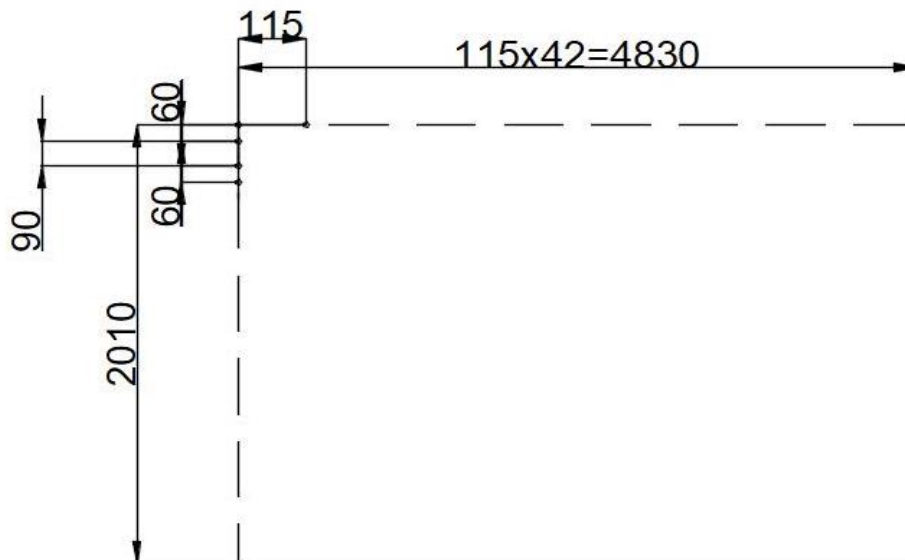
$$\Delta t_1 = t_{\dot{u}3}^{in} - t_{syt} = 464,6 - 258,11 = 206,5 [^\circ C] \tag{9.148}$$

$$\Delta t_2 = t_{\dot{u}3}^{out} - t_{syt} = 359,5 - 258,11 = 101,4 [^\circ C]$$

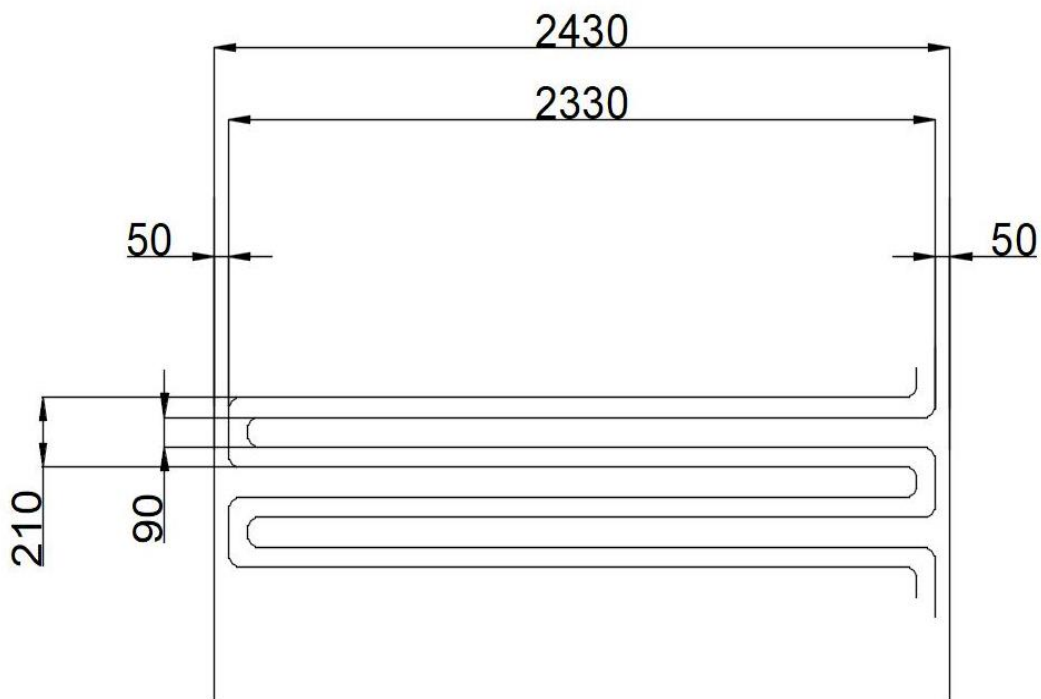
$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{206,5 - 101,4}{\ln \frac{206,5}{101,4}} = 147,75 [^\circ C]$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**9.4.2 PŘEHŘÍVÁK P1**

Přehřívák P1 je tvořen trubkovým svazkem, jenž je řešen jako dvojhad. Počet řad tohoto přehříváku je 28. Je rozdělen na dva stupně. Po šířce kotle je umístěno 43 smyček. Trubky mají vnější průměr 35 mm a tloušťku stěny 4 mm. Příčná rozteč je 115 mm.



Obrázek 24 Konstrukční řešení přehříváku P1



Obrázek 25 Rozměry přehříváku P1

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Tabulka 35 Geometrické parametry přehříváku P1

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Výška přehříváku P1	v_{P1}	2,31	m
Delka přehříváku P1	l_{P1}	2,33	m
Výška úseku 3	$v_{ú3}$	5,51	m
Vnější průměr trubek	D_{P1}	35	mm
Tloušťka stěny	tl_{P1}	4	mm
Vnitřní průměr trubek	d_{P1}	27	mm
Příčná rozteč	s_1	115	mm
Podelná rozteč	s_2	75	mm
Počet řad	z_2	28	-
Počet trubek v jedné řadě	n_{tr}^{P1}	43	-
Počet smyček v jedné řadě	n_{sm}	43	-
Počet hadů přehříváku P1	n_{had}	2	-

Tabulka 36 Parametry páry přehříváku P1

Hmotnostní tok páry	M_p	14,52	kg/s
Výstup			
Měrný objem páry na výstupu:	v_{P1}^{out}	0,055714	m ³ /kg
Tlak páry na výstupu:	p_{P1}^{out}	4,3	MPa
Teplota páry na výstupu:	t_{P1}^{out}	310	°C
Vstup			
Měrný objem páry na vstupu:	v_{P1}^{in}	0,04515	m ³ /kg
Tlak páry na vstupu:	p_{P1}^{in}	4,45	MPa
Teplota páry na vstupu:	t_{P1}^{in}	259,6	°C
Tepelný výkon přehříváku P1:	Q_{P1}	2469,72	kW
Střední měrný objem v P1:	v_{P1}^{str}	0,050432	m³/kg
Střední teplota páry:	t_{P1}^{str}	284,8	°C
Střední tlak páry:	p_{P1}^{str}	4,375	MPa

9.4.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry:

Tabulka 37 Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v P1

Součinitel tepelné vodivosti páry	λ_p	0,052	W/mK
Součinitel kinematické viskozity páry	ν_p	$9,7 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
Prandlovo číslo páry	Pr_p	1,16	-

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{p1}} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_{p1}}{v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.149)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,052}{0,027} \cdot \left(\frac{15,8 \cdot 0,027}{9,7 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,16^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1463 [W/m \cdot K]$$

Kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitelé

λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu a tlak páry [W/m.K]

d_{p1} – vnitřní průměr trubek P1 [m]

w_p – rychlost páry [m/s]

v_p – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr_p – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{p1}^{str}}{F_p} \quad (9.150)$$

$$w_p = \frac{14,52 \cdot 0,050432}{0,04924} = 15,8 [m/s]$$

Průtočný průřez páry:

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{p1}^2}{4} \cdot n_{sm} \cdot n_{had} \quad (9.151)$$

$$F_p = \frac{\pi \cdot 0,027^2}{4} \cdot 43 \cdot 2 = 0,04924 [m^2]$$

9.4.2.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D_{p1}} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D_{p1}}{v} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (9.152)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1,003 \cdot 1 \cdot \frac{58,6 \cdot 10^{-3}}{0,035} \cdot \left(\frac{5,73 \cdot 0,035}{8,17 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,645^{0,33} = 41,95 [W/m^2K]$$

kde c_z – oprava na počet podélných řad [-]

c_s – oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči [-]

λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/mK]

D_{p1} – vnější průměr trubek P1 [m]

w_{sp} – rychlost proudu spalín [m/s]

v – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Oprava na počet podélných řad

Pro $z_2 > 10$ platí $c_z = 1$ [8].

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Oprava na uspořádání svazku**

$$c_s = \left(1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right)^{-2} \quad (9.153)$$

$$c_s = \left(1 + (2 \cdot 3,286 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,143}{2}\right)^3\right)^{-2} = 1,003 [-]$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{115}{38} = 3,286 [-] \quad (9.154)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{75}{35} = 2,143 [-] \quad (9.155)$$

9.4.2.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.156)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,173 \cdot 685,2^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{618}{685,2}\right)^4}{1 - \frac{618}{685,2}} = 9,83 [W/m^2K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8 [-]$ dle [8].

Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu T

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (9.157)$$

$$a = 1 - e^{-0,19} = 0,173 [-]$$

Exponent $k \cdot p \cdot s$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s \quad (9.158)$$

$$k \cdot p \cdot s = (27,5 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 0,272 = 0,19[-]$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [1/m·MPa]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [-]

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]

s – efektivní tloušťka sálové vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálení tříatomových plynů

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) \quad (9.159)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 0,272}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{685,2}{1000} \right) = 27,5 [1/m \cdot MPa]$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-]

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 [MPa]$

s - účinná tloušťka sálové vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]

Teplota zanášeného povrchu stěn T_z

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 60 [°C] vyšší než teplota media uvnitř a to je 284,84[°C] .

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 284,84 + 60 + 273,15 = 618 [K] \quad (9.160)$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 9,83 + 41,95 = 51,78 [W/m^2K] \quad (9.161)$$

9.4.2.4 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,65 \cdot 51,78}{1 + \frac{51,78}{1463}} = 32,51 [W/m^2K] \quad (9.162)$$

kde $\psi = 0,65 [-]$ - součinitel tepelné efektivnosti, dle [8].

9.4.2.5 Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_1 = t_{ú3}^{in} - t_{p1}^{out} = 591,67 - 350 = 154,5 [°C] \quad (9.163)$$

$$\Delta t_2 = t_{ú3}^{out} - t_{p1}^{in} = 464,2 - 280 = 99,99 [°C]$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{154,5 - 99,89}{\ln \frac{154,5}{99,89}} = 125,22 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

9.4.2.6 Velikost teplosměnné plochy při navrhovaném výkonu P1

$$S_{návrh} = \frac{Q_{P1,návrh}}{k \cdot \Delta t \cdot 10^{-3}} \quad (9.164)$$

$$S_{návrh} = \frac{2469,72 \cdot 10^3}{32,51 \cdot 125,22 \cdot 10^{-3}} = 606,73 \text{ [m}^2\text{]}$$

kde $Q_{P1,návrh}$ - navrhovaný výkon přehříváku [kW]

9.4.2.7 Počet řad P1 (dvojhadů)

$$n_{P1} = \frac{S_{návrh}}{\pi \cdot D_{P1} \cdot l_{P1} \cdot n_{had} \cdot n_{sm}} \quad (9.165)$$

$$n_{P1} = \frac{606,73}{\pi \cdot 0,035 \cdot 2,33 \cdot 2 \cdot 43} = 27,54 \text{ [-]}$$

Volíme 28 řad

9.4.2.8 Skutečná výrobní plocha přehříváku P1

$$S_{SKUT}^{P1} = \pi \cdot D_{P1} \cdot l_{P1} \cdot n_{had} \cdot n_{sm} \cdot n_{P1} \quad (9.166)$$

$$S_{SKUT}^{P2} = \pi \cdot 0,035 \cdot 2,33 \cdot 3 \cdot 43 \cdot 28 = 616,92 \text{ [m}^2\text{]}$$

9.4.2.9 Skutečný výkon přehříváku P1

$$Q_{SKUT}^{P1} = k \cdot S_{SKUT}^{P1} \cdot \Delta t \quad (9.167)$$

$$Q_{SKUT}^{P2} = 32,51 \cdot 616,92 \cdot 125,22 = 2511,2 \text{ [kW]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

9.4.3 ZÁVĚSNÉ TRUBKY

Tabulka 38 Geometrické parametry závěsných trubek (úsek 3)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr trubek	D_{ZT}	32	mm
Tloušťka stěny	tl_{ZT}	4	mm
Vnitřní průměr trubek	d_{ZT}	24	mm
Počet řad	n_{ZT}	2	-
Počet trubek	n_{tr}	42	-

Tabulka 39 Parametry páry v závěsných trubkách (úsek 3)

Hmotnostní tok páry	M_p^{ZT}	14,52	kg/s
Výstup			
Měrný objem páry na výstupu:	v_{ZT}^{out}	0,04515	m ³ /kg
Tlak páry na výstupu:	p_{ZT}^{out}	4,45	MPa
Teplota páry na výstupu:	t_{ZT}^{out}	259,61	°C
Vstup			
Měrný objem páry na vstupu:	v_{ZT}^{in}	0,04355	m ³ /kg
Tlak páry na vstupu:	p_{ZT}^{in}	4,55	MPa
Teplota páry na vstupu:	t_{ZT}^{in}	258,11	°C
Tepelný výkon závěsných trubek:	Q_{ZT}	180,06	kW
Střední měrný objem:	v_{ZT}^{str}	0,04435	m³/kg
Střední teplota páry:	t_{ZT}^{str}	258,86	°C
Střední tlak páry:	p_{ZT}^{str}	4,5	MPa

9.4.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry:

Tab. 9-16. Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v závěsných trubkách (úsek 3)

Tabulka 40 Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v závěsných trubkách (úsek 3)

Součinitel tepelné vodivosti páry	λ_p	0,0525	W/mK
Součinitel kinematické viskozity páry	ν_p	$7,887 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
Prandlovo číslo páry	Pr_p	1,4	-

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{ZT}} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_{ZT}}{\nu_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.168)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0525}{0,024} \cdot \left(\frac{16,96 \cdot 0,024}{7,887 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,4^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2139,75 [W/m \cdot K]$$

Kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitele

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

λ_p – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu a tlak páry [W/m.K]

d_{zT} – vnitřní průměr trubek [m]

w_p – rychlost páry [m/s]

ν_p – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m^2/s]

Pr_p – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Rychlost proudění páry:

$$w_p = \frac{M_p^{zT} \cdot v_{zT}^{str}}{F_p^{zT}} \quad (9.169)$$

$$w_p = \frac{14,52 \cdot 0,04435}{0,038} = 16,96 \text{ [m/s]}$$

Průtočný průřez páry:

$$F_p^{zT} = \frac{\pi \cdot d_{zT}^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{zT} \quad (9.170)$$

$$F_p^{zT} = \frac{\pi \cdot 0,024^2}{4} \cdot 42 \cdot 2 = 0,038 \text{ [m}^2\text{]}$$

9.4.3.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (9.171)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{58,6 \cdot 10^{-3}}{0,158} \cdot \left(\frac{4,9 \cdot 0,158}{8,17 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,645^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 10,87 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$$

Kde c_l, c_m, c_t – opravní součinitelé

λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/m.K]

d_e – ekvivalentní průměr [m]

w_{sp} – rychlost spalín [m/s]

ν – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m^2/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

9.4.3.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (9.172)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,173 \cdot 685,2^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{592}{685,2} \right)^4}{1 - \frac{592}{685,2}} = 9,3 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}**

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8$ [-] dle [8].

Stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu T

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (9.173)$$

$$a = 1 - e^{-0,19} = 0,173 \text{ [-]}$$

Exponent $k \cdot p \cdot s$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s \quad (9.174)$$

$$k \cdot p \cdot s = (27,5 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 0,272 = 0,19 \text{ [-]}$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$1/m \cdot MPa$]

r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [-]

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]

s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) \quad (9.175)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 0,272}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{685,2}{1000} \right) = 27,5 \text{ [1/m} \cdot \text{MPa]}$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-]

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 \text{ [MPa]}$

s - účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]

Teplota zanášeného povrchu stěn T_z

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 60 [$^{\circ}C$] vyšší než teplota media uvnitř a to je $258,11$ [$^{\circ}C$].

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 258,86 + 60 + 273,15 = 592 \text{ [K]} \quad (9.176)$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 10,87 + 9,3 = 20,15 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.177)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**9.4.3.4 Součinitel prostupu tepla**

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0,65 \cdot 20,15}{1 + \frac{20,15}{2139,75}} = 12,98 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.178)$$

kde $\psi = 0,65$ [-] - součinitel tepelné efektivity, dle [7].

9.4.3.5 Teplo odebrané závěsnými trubkami

$$Q_{ZT} = k \cdot S \cdot \Delta t \quad (9.179)$$

$$Q_{ZT} = 12,98 \cdot 23,3 \cdot 146,8 \cdot 10^3 = 44,32 \text{ [kW]}$$

kde k – součinitel prostupu tepla [W/m²K]
 S – teplosměnná plocha závěsných trubek [m²]
 Δt – střední teplotní logaritmický spád [°C]

9.4.3.6 Teplosměnná plocha závěsných trubek

$$S = \pi \cdot D_{ZT} \cdot v_{\dot{u}3} \cdot n_{tr} \cdot n_{ZT} \quad (9.180)$$

$$S = \pi \cdot 0,032 \cdot 5,51 \cdot 42 \cdot 2 = 23,3 \text{ [m}^2\text{]}$$

9.4.3.7 Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_1 = t_{\dot{u}3}^{in} - t_{ZT}^{out} = 464,2 - 259,6 = 206,5 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.181)$$

$$\Delta t_2 = t_{\dot{u}3}^{out} - t_{ZT}^{in} = 359,5 - 258,11 = 99,89 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{206,5 - 99,89}{\ln \frac{206,5}{99,89}} = 146,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

9.4.4 KONTROLA SPALIN NA VÝSTUPU Z ÚSEKU 3**Teplo odebrané spalinám v úseku 3**

$$Q_{CELK}^{\dot{u}2} = Q_{ZT} + Q_{MS} + Q_{SKUT}^{P3} = 44,32 + 112,7 + 2511,2 = 2668,23 \text{ [kW]} \quad (9.182)$$

Teplo spalin na vstupu do úseku 3

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 4771,85 \cdot 2,375 = 11333,93 \text{ [kW]} \quad (9.183)$$

Teplo spalin na výstupu z úseku 3

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q = 11333,93 - 2668,23 = 8665,7 \text{ [kW]} \quad (9.184)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Entalpie spalin na výstupu z úseku 3**

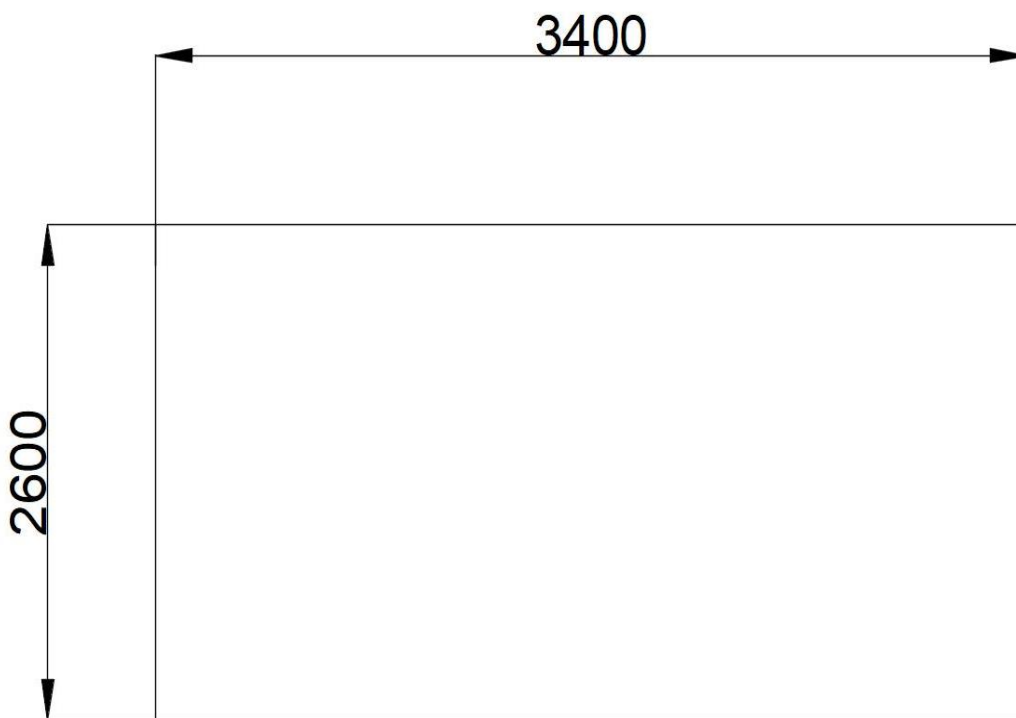
$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{8665,7}{2,375} = 3648,5 \text{ [kJ/kg]} \quad (9.185)$$

Této entalpii spalin (tab. 3) na výstupu odpovídá teplota 360 °C, která se od předpokládané teploty 359,5 °C liší pouze minimálně.

10. TEPELNÝ VÝPOČET IV. A V. TAHU

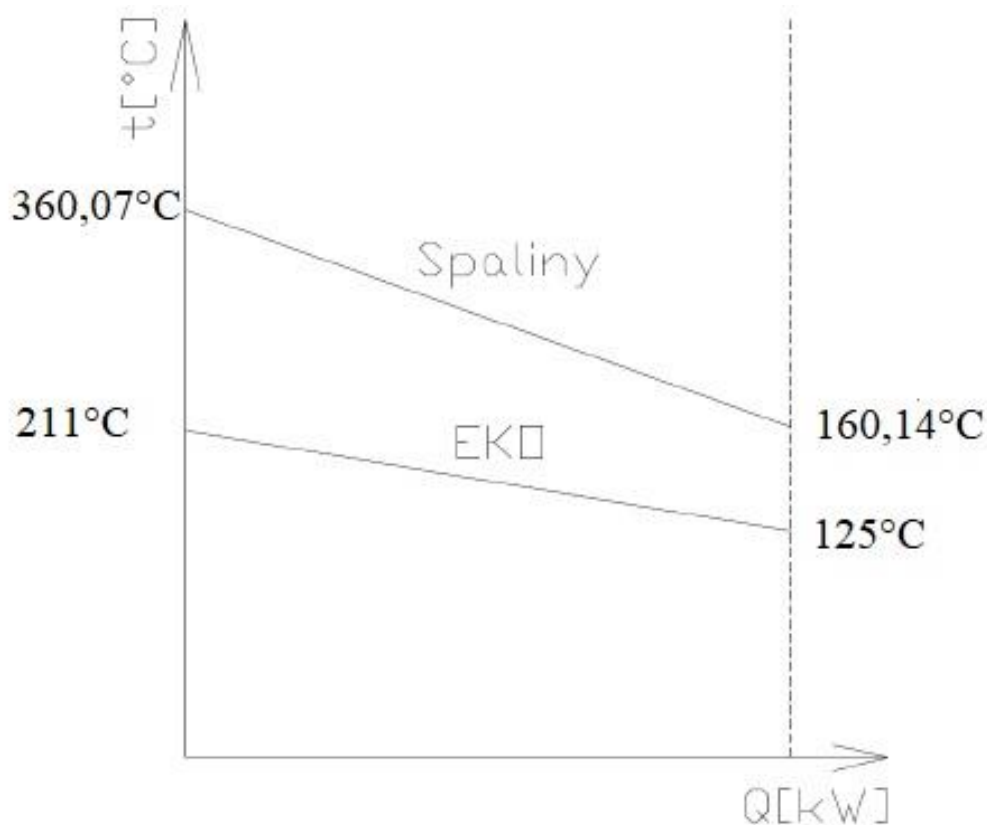
Poslední tah je tvořen pouze plechovým kanálem, kde jsou umístěny jednotlivé trubkové svazky ohříváku vody. Ten je zde rozdělen na 7 těchto svazků, přičemž každý svazek je tvořen 34 trubkami o vnějším průměru 32 mm a tloušťkou stěny 4 mm. Počet řad každého svazku je 28. Ohřívák vody je řešen jako jednohad. Mezi jednotlivými svazky jsou umístěny tzv. průlezy a ofukovače. Rozměry IV. A V. tahu jsou znázorněny na obrázku (16).

Součinitel přestupu tepla ze strany vody dosahuje velmi vysokých hodnot, a při výpočtu součinitele prostupu tepla by výsledek ovlivnil jen velmi málo, proto tento součinitel ve výpočtu neuvažují.



Obrázek 26 Rozměry IV. A V. tahu

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H



Obrázek 27 Teplotní průběh spalin a pracovního média ve IV. A V. tahu

Střední teplota proudu spalin ve IV. A V. tahu:

$$t_{str} = \frac{t_{IV.tah}^{in} + t_{V.tah}^{out}}{2} \quad (10.1)$$

$$t_{str} = \frac{360,07 + 160}{2} = 260,04 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Absolutní teplota proudu spalin

$$T = t_{str} + 273,15 = 260,04 + 273,15 = 533,2 \text{ [K]} \quad (10.2)$$

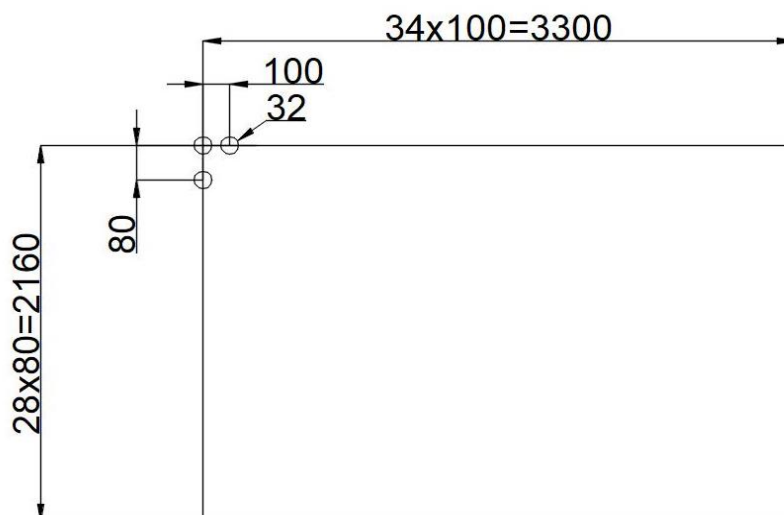
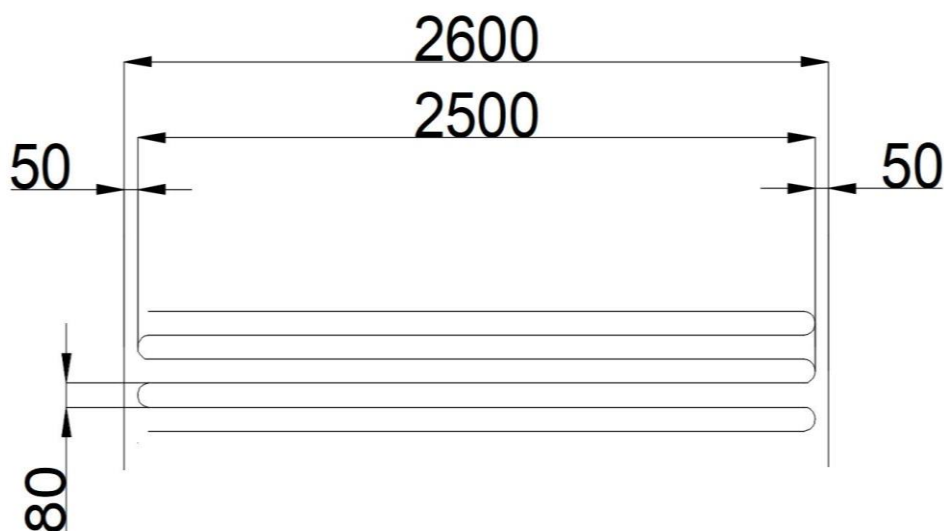
Rychlost proudu spalin ve IV. A V. tahu

$$w_{sp} = \frac{O_{sv} \cdot \frac{t_{str} + 273,15}{273,15} \cdot M_{pv}}{a_{IVtah} \cdot b_{IVtah} - D_{EKO} \cdot l_{EKO} \cdot n_{tr}^{EKO}} \quad (10.3)$$

$$w_{sp} = \frac{7,132 \cdot \frac{260,04 + 273,15}{273,15} \cdot 2,375}{2,6 \cdot 3,4 - 0,032 \cdot 3,3 \cdot 34} = 5,1 \text{ [m/s]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H*Tabulka 41 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu ve IV. A V. tahu*

Součinitel tepelné vodivosti spalin	λ	$45,4 \cdot 10^{-3}$	W/mK
Součinitel kinematické viskozity spalin	ν	$4,06 \cdot 10^{-5}$	m ² /s
Prandlovo číslo spalin	Pr	0,665	-

10.1 OHŘÍVÁK VODY*Obrázek 28 Konstrukční řešení ohříváku vody**Obrázek 29 Rozměry ohříváku vody*

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Tabulka 42 Geometrické parametry ohříváku vody

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Výška jednoho svazků	v_{EKO}	2,16	m
Delka ohříváku vody	l_{EKO}	2,5	m
Vnější průměr trubek	D_{EKO}	32	mm
Tloušťka stěny	tl_{EKO}	4	mm
Vnitřní průměr trubek	d_{EKO}	24	mm
Příčná rozteč	s_1	100	mm
Podelná rozteč	s_2	80	mm
Počet řad	z_2	28	-
Počet trubek v jedné řadě	n_{tr}^{EKO}	34	-

Tabulka 43 Parametry vody ohříváku vody

Hmotnostní tok páry	M_p	14,53	kg/s
Výstup			
Měrný objem vody na výstupu:	v_{EKO}^{out}	0,001271	m ³ /kg
Tlak vody na výstupu:	p_{EKO}^{out}	4,55	MPa
Teplota vody na výstupu:	t_{EKO}^{out}	211	°C
Vstup			
Měrný objem vody na vstupu:	v_{EKO}^{in}	0,001062	m ³ /kg
Tlak vody na vstupu:	p_{EKO}^{in}	5,15	MPa
Teplota vody na vstupu:	t_{EKO}^{in}	125	°C
Tepelný výkon EKO:	Q_{EKO}	5443,8	kW
Střední měrný objem EKO:	v_{EKO}^{str}	0,00116674	m³/kg
Střední teplota páry:	t_{EKO}^{str}	168	°C
Střední tlak páry:	p_{EKO}^{str}	4,85	MPa

10.1.1 Rychlost proudění vody:

$$w_p = \frac{M_{pp} \cdot v_{EKO}^{str}}{F_p} \quad (10.4)$$

$$w_p = \frac{14,53 \cdot 0,00116674}{0,01312} = 1,23 \text{ [m/s]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Průtočný průřez vody:**

$$F_p = \frac{\pi \cdot d_{EKO}^2}{4} \cdot n_{tr} \quad (10.5)$$

$$F_p = \frac{\pi \cdot 0,024^2}{4} \cdot 34 = 0,01312 \text{ [m}^2\text{]}$$

10.1.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D_{EKO}} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D_{EKO}}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (10.6)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1,11 \cdot 1 \cdot \frac{45,4 \cdot 10^{-3}}{0,032} \cdot \left(\frac{5,6 \cdot 0,032}{4,06 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,665^{0,33} = 60,34 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

kde c_z – oprava na počet podélných řad [-] c_s – oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči [-] λ – součinitel tepelné vodivosti pro střední teplotu proudu [W/mK] D_{EKO} – vnější průměr trubek EKO [m] w_{sp} – rychlost proudu spalin [m/s] ν – součinitel kinematické vazkosti pro střední teplotu proudu [m²/s]

Pr – Prandtlovo číslo při střední teplotě proudu

Oprava na počet podélných řadPro $z_2 > 10$ platí $c_z = 1$ [8].**Oprava na uspořádání svazku**

$$c_s = \left(1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right)^{-2} \quad (10.7)$$

$$c_s = \left(1 + (2 \cdot 3,125 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,5}{2} \right)^3 \right)^{-2} = 1,11 \text{ [-]}$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{100}{32} = 3,125 \text{ [-]} \quad (10.8)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{80}{32} = 2,5 \text{ [-]} \quad (10.9)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**10.1.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (10.10)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,178 \cdot 533,2^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{466,15}{533,2}\right)^4}{1 - \frac{466,15}{533,2}} = 4,6 [W/m^2K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn a_{st}

Pro výpočet uvažují $a_{st} = 0,8 [-]$ dle [8].

Stupeň černosti proudu spalín při teplotě proudu T

$$a = 1 - e^{-kps} \quad (10.11)$$

$$a = 1 - e^{-0,195} = 0,178 [-]$$

Exponent $k \cdot p \cdot s$

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp}) \cdot p \cdot s \quad (10.12)$$

$$k \cdot p \cdot s = (30,87 \cdot 0,25) \cdot 0,101325 \cdot 0,25 = 0,195[-]$$

kde k_{sp} – součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny [$1/m \cdot MPa$]

r_{sp} – objemová část tříatomových plynů [-]

p – tlak ve spalovací komoře [MPa]

s – efektivní tloušťka sálavé vrstvy [m]

Součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) \quad (10.13)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,133}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 0,25}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{533,2}{1000} \right) = 30,87 [1/m \cdot MPa]$$

kde r_{H_2O} - objemová část vodní páry [-]

p_{sp} - celkový parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,101325 \cdot 0,25 = 0,0253 [MPa]$

s - účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

T_0 - teplota na konci ohniště [K]

r_{sp} - objemová část tříatomových plynů [-]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Teplota zanášeného povrchu stěn T_z**

Teplotu vnějšího povrchu nánosů na trubkách, volím dle [8] o 25 [°C] vyšší než teplota media uvnitř a to je 168[°C] .

$$T_z = t + \Delta t + 273,15 = 168 + 60 + 273,15 = 466,15 \text{ [K]} \quad (10.14)$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad (10.15)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,08}{0,032^2} - 1 \right) = 0,25 \text{ [m]}$$

kde D – vnější průměr trubky [m]

s_1 – příčná rozteč svazku [m]

s_2 – podélná rozteč svazku [m]

Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \alpha_s + \alpha_k = 4,6 + 60,34 = 64,9 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (10.16)$$

10.1.4 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_1} = \frac{64,9}{1 + 0,00525 \cdot 64,9} = 48,41 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (10.17)$$

kde ε - součinitel zanesení

Součinitel zanesení ε

$$\varepsilon = c_d \cdot c_f \cdot \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon \quad (10.18)$$

$$\varepsilon = 0,75 \cdot 1 \cdot 0,007 + 0 = 0,00525 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

kde c_d – opravný koeficient na vnější průměr trubky [-]

c_f – opravný koeficient na frakci popílkových částic [-]

ε_0 – výchozí součinitel zanesení [m²K/W]

$\Delta\varepsilon$ – přídavek

Dle [8] volím

$$c_d = 0,75 \text{ [-]}$$

$$c_f = 1 \text{ [-]}$$

$$\varepsilon_0 = 0,007 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$\Delta\varepsilon = 0,0 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_1 = t_{IVtah}^{in} - t_{EKO}^{out} = 360,07 - 211 = 149,07 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.19)$$

$$\Delta t_2 = t_{Vtah}^{out} - t_{EKO}^{in} = 160 - 125 = 35 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{149,07 - 35}{\ln \frac{149,07}{35}} = 78,72 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Velikost teplosměnné plochy při navrhovaném výkonu EKO

$$S_{návrh} = \frac{Q_{EKO,návrh}}{k \cdot \Delta t \cdot 10^{-3}} \quad (10.20)$$

$$S_{návrh} = \frac{5443,8 \cdot 10^3}{48,41 \cdot 78,72 \cdot 10^{-3}} = 1428,5 \text{ [m}^2\text{]}$$

kde $Q_{EKO,návrh}$ - navrhovaný výkon EKO [kW]

Počet řad EKO

$$n_{P3} = \frac{S_{návrh}}{\pi \cdot D_{EKO} \cdot l_{EKO} \cdot n_{tr}} \quad (10.21)$$

$$n_{P3} = \frac{222,37}{\pi \cdot 0,032 \cdot 2,5 \cdot 34} = 195,99$$

Volíme 196 řad

Skutečná výrobní plocha EKO

$$S_{SKUT}^{EKO} = \pi \cdot D_{EKO} \cdot l_{EKO} \cdot n_{sm} \cdot n_{EKO} \quad (10.22)$$

$$S_{SKUT}^{EKO} = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,5 \cdot 34 \cdot 196 = 1428,55 \text{ [m}^2\text{]}$$

Skutečný výkon EKO

$$Q_{SKUT}^{EKO} = k \cdot S_{SKUT}^{EKO} \cdot \Delta t \quad (10.23)$$

$$Q_{SKUT}^{EKO} = 48,41 \cdot 1428,55 \cdot 78,72 = 5444 \text{ [kW]}$$

10.1.5 KONTROLA TEPLoty SPALIN NA VÝSTUPU Z V. TAHU**Teplo spalin na vstupu**

$$Q_{sp}^{in} = I_{sp}^{in} \cdot M_{pv} = 3648,46 \cdot 2,375 = 8665,7 \text{ [kW]} \quad (10.24)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Teplo spalin na výstupu**

$$Q_{sp}^{out} = Q_{sp}^{in} - Q = 8665,7 - 5444 = 3221,7 \text{ [kW]} \quad (10.25)$$

Entalpie spalin na výstupu

$$I_{sp}^{out} = \frac{Q_{sp}^{out}}{M_{pv}} = \frac{3221,7}{2,375} = 1356,41 \text{ [kJ/kg]} \quad (10.26)$$

Této entalpii spalin (tab. 3) na výstupu odpovídá teplota 160,14 °C, která se od předpokládané teploty 160 °C liší pouze minimálně.

11. KONTROLA TEPELNÉ BILANCE KOTLE

$$\Delta Q = Q_p^p \cdot \eta_k - \Sigma Q_i \cdot \left(1 - \frac{Z_c}{100}\right) \quad (11.1)$$

$$\Delta Q = 19000 \cdot 0,887 - 17599,6 \cdot \left(1 - \frac{3,3}{100}\right) = -56 \text{ [kJ/kg]}$$

kde Q_p^p - teplo přivedené do kotle palivem [kJ/kg]

η_k - tepelná účinnost kotle

Z_c - ztráta mechanickým nedopalem [%]

Teplo odevzdané do jednotlivých výhřevných ploch z rovnice bilance na straně spalin

$$\Sigma Q_i = \varphi \cdot (I_u - I_{SP,out}) \quad (11.2)$$

$$\Sigma Q_i = 0,988 \cdot (19165,32 - 1356,41) = 17599,6 \text{ [kJ/kg]}$$

kde φ - součinitel uchování tepla

I_u - užitečné teplo uvolněné v ohništi [kJ/kg]

$I_{SP,out}$ - entalpie spalin na výstupu z ekonomizéru [kJ/kg]

Výpočet odchylky

$$\Delta = \frac{\Delta Q}{Q_p^p} \cdot 100 \quad (11.3)$$

$$\Delta = \frac{-56}{19000} \cdot 100 = 0,3 \text{ [%]}$$

Dle [8] by při správném výpočtu neměla být hodnota ΔQ větší než 0,5 %. Tato podmínka je splněna a výpočet vyhovuje.

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

12. KONTROLA CHLÓROVÉ KOROZE V OBLASTI PŘEHŘÍVÁKŮ PÁRY**Chlórová koroze**

Molární hmotnosti: $M_{m,Cl} = 35,45$ [kg/mol], $M_{m,S} = 32,066$ [kg/mol].

Poměr obsahu síry a chlóru

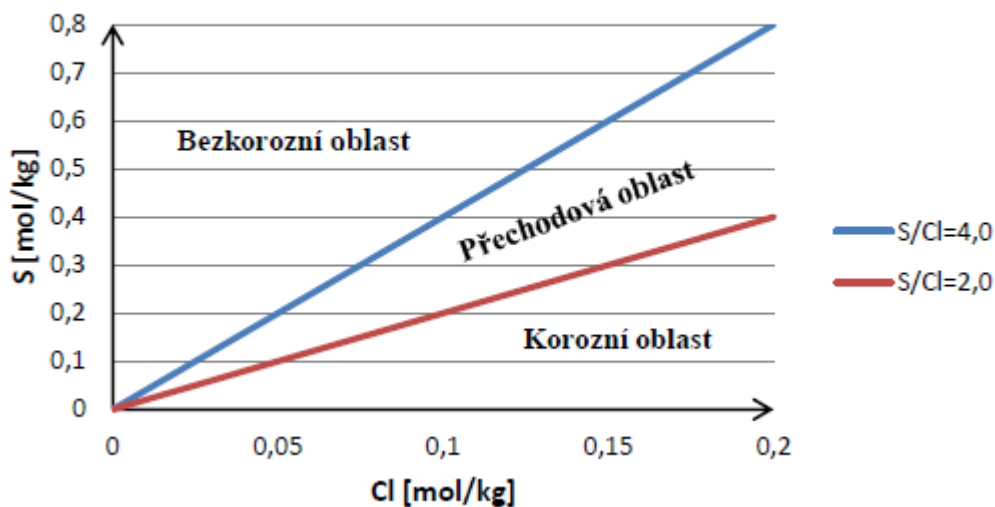
$$\frac{S}{Cl} = \frac{0,0066}{0,025} = 0,27 [-] \quad (12.1)$$

Obsah síry

$$S = \frac{1}{M_{m,S}} \cdot S^r = \frac{1}{32,066} \cdot 0,211 = 0,0066 \text{ [mol/kg]} \quad (12.2)$$

Obsah chlóru

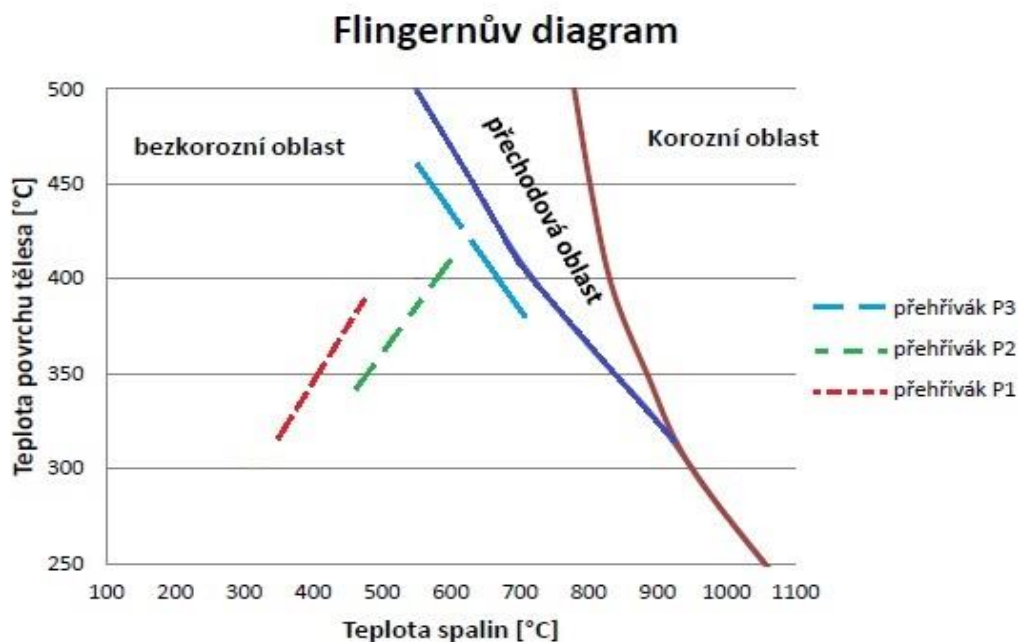
$$Cl = \frac{1}{M_{m,Cl}} \cdot Cl^r = \frac{1}{35,45} \cdot 0,874 = 0,025 \text{ [mol/kg]} \quad (12.3)$$

Diagram chlorové koroze

Obrázek 30 Korozní diagram (2)

Na základě (12.1) a obr. (30) je patrné, že se nacházíme v přechodové oblasti. Z tohoto důvodu je nutné využít Flingernův diagram, podle kterého určíme, zda je potřebná antikoroziční ochrana.

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H



Obrázek 31 Flingernův diagram v oblasti přehříváků

Dle obrázku (31) je patrné, že není nutné přehříváky P3, P2 a P1 chránit žádným opatřením proti chlоровé korozi.

13. NÁVRH ROZMĚRŮ BUBNŮ A JEJICH KONTROLA

Tabulka 44 Parametry bubnu

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Průměr bubnu	D_B	1800	mm
Tloušťka stěny	tl_B	60	mm
Délka bubnu	L_B	7,958	m
Výška umístění bubnu	h_B	23,253	m
Parní výkon kotle	M_p	15,42	kg/s
Tlak v bubnu	p_B	4,55	MPa

Vnitřní průměr bubnu

$$d_B = D_B - 2 \cdot tl_B = 1,8 - 2 \cdot 0,06 = 1,68 \text{ [m]} \quad (13.1)$$

Poloviční objem bubnu

$$V_B = \frac{\pi \cdot d_B^2 \cdot L_B}{8} = \frac{\pi \cdot 1,68^2 \cdot 7,958}{8} = 8,82 \text{ [m}^3\text{]} \quad (13.2)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Zatížení bubnu**

$$z_B = \frac{M_p}{V_B} = \frac{15,42}{8,82} = 1,75 \text{ [kg/s} \cdot \text{m}^3] \quad (13.3)$$

Kontrola:

$$z_{mez} = 6,5 \text{ [kg/s} \cdot \text{m}^3] \quad (13.4)$$

$$z_B < z_{mez}$$

$$1,75 < 6,5$$

Navržený buben vyhovuje.

14.NÁVRH ZAVODŇOVACÍCH A PŘEVÁDĚCÍCH POTRUBÍ

Tabulka 45 Parametry zavodňovacích a převáděcích potrubí

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Průměr trubek výparníku	D_V	60,3	mm
Vnitřní průměr trubek výparníku	d_V	47,7	mm
Tloušťka stěny trubek výparníku	tl_V	6,3	mm
Počet trubek výparníku	n_{tr}^V	506	-
Průměru zavodňovacích potrubí	D_Z	219,1	mm
Vnitřní průměr zavodňovacích potrubí	d_Z	179,1	mm
Tloušťka stěny zavodňovacích potrubí	tl_Z	20	mm
Průměru převáděcího potrubí	D_P	60,3	mm
Vnitřní průměr převáděcího potrubí	d_P	47,7	mm
Tloušťka stěny převáděcího potrubí	tl_P	6,3	mm
Výška umístění bubnu	h_B	23,253	m
Parní výkon kotle	M_p	15,42	kg/s
Tlak v bubnu	p_B	4,55	MPa

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**14.1 Návrh rozměrů a počtu zavodňovacích potrubí**

Výpočet průřezu všech varných trubek

$$S_{OS} = \frac{\pi \cdot d_V^2}{4} \cdot n_{tr}^V = \frac{\pi \cdot 0,0477^2}{4} \cdot 506 = 0,904 [m^2] \quad (14.1)$$

Výpočet průtočného průřezu zavodňovacích potrubí

$$S_{OZ} = (0,06 + 0,016 \cdot p_B + 0,005 \cdot h_B) \cdot S_{OS} \quad (14.2)$$

$$S_{OZ} = (0,06 + 0,016 \cdot 4,55 + 0,005 \cdot 23,253) \cdot 0,904 = 0,225 [m^2]$$

Určení počtu zavodňovacích potrubí

$$n_Z = \frac{S_{OZ}}{\frac{\pi \cdot d_Z^2}{4}} = \frac{0,225}{\frac{\pi \cdot 0,1791^2}{4}} = 8,9 [-] \quad (14.3)$$

Volíme $n_Z = 9 [-]$ **14.2 Návrh rozměrů a počtu převáděcích potrubí**

Výpočet průtočného průřezu převáděcích potrubí

$$S_{OP} = (0,01 + 0,01 \cdot p_B + 0,01 \cdot h_B) \cdot S_{OS} \quad (14.4)$$

$$S_{OP} = (0,01 + 0,01 \cdot 4,55 + 0,01 \cdot 23,253) \cdot 0,904 = 0,261 [m^2]$$

Určení počtu převáděcích potrubí:

$$n_P = \frac{S_{OP}}{\frac{\pi \cdot d_P^2}{4}} = \frac{0,261}{\frac{\pi \cdot 0,0477^2}{4}} = 146,25 [-] \quad (14.5)$$

Volíme $n_P = 146 [-]$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

15. HYDRAULICKÝ VÝPOČET KOTLE

Cílem hydraulického výpočtu je určení tlakových ztrát parovodního traktu kotle [9]. Tlaková ztráta se počítá pro každou výhřevnou plochu zvlášť. Při výpočtu se uvažuje jednofázové proudění. Všechny hodnoty jsou uvedené pro střední teplotu a tlak pracovního média. Tlaková ztráta ve výparníku se nepočítá, a pro zjednodušení se považuje za nulu.

15.1 Tlaková ztráta v přehříváku P3

Tabulka 46 Parametry přehříváku P3 pro výpočet tlakové ztráty (hydraulický výpočet)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnitřní průměr trubek P3	d_{P3}	30	mm
Rychlost proudění páry	w_p	22,2	m/s
Střední teplota páry	$t_{P3}^{stř}$	364,23	°C
Střední tlak páry	$p_{P3}^{stř}$	4,075	mm
Hustota páry	$\rho_{P3}^{stř}$	14,89	kg/m ³
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_{P3}^{stř}$	$1,532 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Celková délka přehříváku P3	L_{P3}	101,152	m
Počet hadů	n_{had}	3	-
Počet vstupu do trubek	n_{vstup}	2	-
Počet výstupu z trubek	$n_{výstup}$	2	-
Počet ohýbu trubek	$n_{ohýb}$	14	-
Součinitele tlakové ztráty pro výpočet ztráty místními odpory [9]			
Pro vstup do trubek	ξ_{vstup}	0,5	-
Pro výstup z trubek	$\xi_{výstup}$	1,0	-
Pro ohýb trubek	$\xi_{ohýb}$	0,11	-

15.1.1 Tlaková ztráta třením

$$\Delta p_\lambda = \lambda \cdot \frac{L_{P3}}{d_{P3}} \cdot \frac{(w_p)^2}{2} \cdot \rho_{P3}^{stř} \quad (15.1)$$

$$\Delta p_\lambda = 0,021 \cdot \frac{101,152}{0,03} \cdot \frac{22,2^2}{2} \cdot 14,89 = 204682 [Pa]$$

Kde λ - je součinitel tření [-]

L - je délka P3 [m]

d_{P3} - vnitřní průměr trubek P3 [m]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{P3}^{stř}$ - střední hustota páry [kg/m³]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Reynoldsovo číslo**

$$Re = \frac{w_p \cdot d_{p3}}{\nu_{p3}^{Stř}} \quad (15.2)$$

$$Re = \frac{22,2 \cdot 0,03}{1,532 \cdot 10^{-6}} = 5,5 \cdot 10^5 [-]$$

kde $\nu_{p3}^{Stř}$ - je součinitel kinematické viskozity páry pro střední teplotu a tlak páry [m^2/s]

Pro $Re = 5,5 \cdot 10^5 [-]$ a vnitřní průměr trubek $d_{p3} = 0,03 [m]$, dle [9] volíme $\lambda = 0,021 [-]$

15.1.2 Tlaková ztráta místními odpory**Tlaková ztráta pro vstup do trubek**

$$\Delta p_{\xi_1} = \xi_{vstup} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_{p3}^{Stř} \cdot n_{vstup} \quad (15.3)$$

$$\Delta p_{\xi_1} = 0,5 \cdot \frac{22,2^2}{2} \cdot 14,89 \cdot 2 = 3661,6 [Pa]$$

kde ξ_{vstup} - je součinitel tlakové ztráty pro vstup do trubek [-]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{p3}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m^3]

n_{vstup} - počet vstupu do trubek [-]

Tlaková ztráta pro výstup z trubek

$$\Delta p_{\xi_2} = \xi_{výstup} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_{p3}^{Stř} \cdot n_{výstup} \quad (15.4)$$

$$\Delta p_{\xi_2} = 1,0 \cdot \frac{22,2^2}{2} \cdot 14,89 \cdot 2 = 7323,2 [Pa]$$

kde $\xi_{výstup}$ - je součinitel tlakové ztráty pro výstup z trubek [-]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{p3}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m^3]

$n_{výstup}$ - počet výstupu z trubek [-]

Tlaková ztráta pro ohýb trubek

$$\Delta p_{\xi_3} = \xi_{ohýb} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_{p3}^{Stř} \cdot n_{ohýb} \cdot n_{had}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

(15.4)

$$\Delta p_{\xi 3} = 0,11 \cdot \frac{22,2^2}{2} \cdot 14,89 \cdot 14 \cdot 3 = 33833 [Pa]$$

kde $\xi_{ohýb}$ - je součinitel tlakové ztráty pro výstup z trubek [-] w_P - rychlost proudění páry [m/s] $\rho_{P3}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m³] $n_{ohýb}$ - počet ohýbu trubek [-] n_{had} - počet hadů [-]**15.1.3 Celková tlaková ztráta v přehříváku P3**

$$\Delta p_{P3} = \Delta p_{\lambda} + \Delta p_{\xi 1} + \Delta p_{\xi 2} + \Delta p_{\xi 3}$$

(15.5)

$$\Delta p_{P3} = 204682 + 3661,6 + 7323,2 + 16916,5 = 232583 [Pa] = 0,2326 [MPa]$$

15.2 Tlaková ztráta v přehříváku P2*Tabulka 47 Parametry přehříváku P2 pro výpočet tlakové ztráty (hydraulický výpočet)*

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnitřní průměr trubek P2	d_{P2}	27	mm
Rychlost proudění páry	w_p	17,96	m/s
Střední teplota páry	$t_{P2}^{Stř}$	315	°C
Střední tlak páry	$p_{P2}^{Stř}$	4,225	MPa
Hustota páry	$\rho_{P2}^{Stř}$	17,4	kg/m ³
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_{P2}^{Stř}$	$1,184 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Celková délka přehříváku P2	L_{P2}	70,7	m
Počet hadů	n_{had}	2	-
Počet vstupu do trubek	n_{vstup}	2	-
Počet výstupu z trubek	$n_{výstup}$	2	-
Počet ohýbu trubek	$n_{ohýb}$	14	-
Součinitele tlakové ztráty pro výpočet ztráty místními odpory [9]			
Pro vstup do trubek	ξ_{vstup}	0,5	-
Pro výstup z trubek	$\xi_{výstup}$	1,0	-
Pro ohýb trubek	$\xi_{ohýb}$	0,11	-

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**15.2.1 Tlaková ztráta třením**

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \cdot \frac{L_{P2}}{d_{P2}} \cdot \frac{(w_p)^2}{2} \cdot \rho_{P2}^{Stř}$$
(15.6)

$$\Delta p_{\lambda} = 0,0215 \cdot \frac{101,152}{0,027} \cdot \frac{17,96^2}{2} \cdot 17,4 = 121704 [Pa]$$

Kde λ - je součinitel tření [-]

L_{P2} - je délka P2 [m]

d_{P2} - vnitřní průměr trubek P2 [m]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{P2}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m³]

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w_p \cdot d_{P2}}{\nu_{P2}^{Stř}}$$
(15.7)

$$Re = \frac{17,96 \cdot 0,027}{1,184 \cdot 10^{-6}} = 5,31 \cdot 10^5 [-]$$

kde $\nu_{P2}^{Stř}$ - je součinitel kinematické viskozity páry pro střední teplotu a tlak páry [m²/s]

Pro $Re = 5,31 \cdot 10^5 [-]$ a vnitřní průměr trubek $d_{P2} = 0,027 [m]$, dle [9] volíme $\lambda = 0,0215 [-]$

15.2.2 Tlaková ztráta místními odpory**Tlaková ztráta pro vstup do trubek**

$$\Delta p_{\xi_1} = \xi_{vstup} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_{P2}^{Stř} \cdot n_{vstup}$$
(15.8)

$$\Delta p_{\xi_1} = 0,5 \cdot \frac{17,96^2}{2} \cdot 17,4 \cdot 2 = 2802,3 [Pa]$$

kde ξ_{vstup} - je součinitel tlakové ztráty pro vstup do trubek [-]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{P2}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m³]

n_{vstup} - počet vstupu do trubek [-]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Tlaková ztráta pro výstup z trubek**

$$\Delta p_{\xi 2} = \xi_{výstup} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_{P2}^{Stř} \cdot n_{výstup} \quad (15.9)$$

$$\Delta p_{\xi 2} = 1,0 \cdot \frac{17,96^2}{2} \cdot 17,4 \cdot 2 = 5604,6 [Pa]$$

kde $\xi_{výstup}$ - je součinitel tlakové ztráty pro výstup z trubek [-]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{P2}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m³]

$n_{výstup}$ - počet výstupu z trubek [-]

Tlaková ztráta pro ohýb trubek

$$\Delta p_{\xi 3} = \xi_{ohýb} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_{P2}^{Stř} \cdot n_{ohýb} \cdot n_{had} \quad (15.10)$$

$$\Delta p_{\xi 3} = 0,11 \cdot \frac{17,96^2}{2} \cdot 17,4 \cdot 14 \cdot 2 = 8361,1 [Pa]$$

kde $\xi_{ohýb}$ - je součinitel tlakové ztráty pro výstup z trubek [-]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{P2}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m³]

$n_{ohýb}$ - počet ohýbu trubek [-]

n_{had} - počet hadů [-]

15.2.3 Celková tlaková ztráta v přehříváku P2

$$\Delta p_{P2} = \Delta p_{\lambda} + \Delta p_{\xi 1} + \Delta p_{\xi 2} + \Delta p_{\xi 3} \quad (15.11)$$

$$\Delta p_{P2} = 121704 + 2802,3 + 5604,6 + 8361,1 = 138742 [Pa] = 0,1387 [MPa]$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

15.3 Tlaková ztráta v přehříváku P1

Tabulka 48 Parametry přehříváku P1 pro výpočet tlakové ztráty (hydraulický výpočet)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnitřní průměr trubek P1	d_{P1}	27	mm
Rychlost proudění páry	w_p	15,8	m/s
Střední teplota páry	$t_{P1}^{Stř}$	284,8	°C
Střední tlak páry	$p_{P1}^{Stř}$	4,375	mm
Hustota páry	$\rho_{P1}^{Stř}$	19,73	kg/m ³
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_{P1}^{Stř}$	$9,7 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
Celková délka přehříváku P1	L_{P1}	121,52	m
Počet hadů	n_{had}	2	-
Počet vstupu do trubek	n_{vstup}	2	-
Počet výstupu z trubek	$n_{výstup}$	2	-
Počet ohýbů trubek	$n_{ohýb}$	26	-
Součinitele tlakové ztráty pro výpočet ztráty místními odpory [9]			
Pro vstup do trubek	ξ_{vstup}	0,5	-
Pro výstup z trubek	$\xi_{výstup}$	1,0	-
Pro ohýb trubek	$\xi_{ohýb}$	0,11	-

15.3.1 Tlaková ztráta třením

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \cdot \frac{L_{P1}}{d_{P1}} \cdot \frac{(w_p)^2}{2} \cdot \rho_{P1}^{Stř} \quad (15.12)$$

$$\Delta p_{\lambda} = 0,021 \cdot \frac{121,52}{0,027} \cdot \frac{15,8^2}{2} \cdot 19,73 = 183638 [Pa]$$

Kde λ - je součinitel tření [-]

L_{P1} - je délka P1 [m]

d_{P1} - vnitřní průměr trubek P1 [m]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{P1}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m³]

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w_p \cdot d_{P1}}{\nu_{P1}^{Stř}} \quad (15.13)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$Re = \frac{15,8 \cdot 0,027}{9,7 \cdot 10^{-7}} = 5,55 \cdot 10^5 [-]$$

kde $\nu_{ST}^{Stř}$ - je součinitel kinematické viskozity páry pro střední teplotu a tlak páry [m^2/s]

Pro $Re = 5,55 \cdot 10^5 [-]$ a vnitřní průměr trubek $d_{p1} = 0,027 [m]$, dle [9] volíme $\lambda = 0,021 [-]$

15.3.2 Tlaková ztráta místními odpory**Tlaková ztráta pro vstup do trubek**

$$\Delta p_{\xi_1} = \xi_{vstup} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_{p1}^{Stř} \cdot n_{vstup} \quad (15.14)$$

$$\Delta p_{\xi_1} = 0,5 \cdot \frac{15,8^2}{2} \cdot 19,73 \cdot 2 = 2460 [Pa]$$

kde ξ_{vstup} - je součinitel tlakové ztráty pro vstup do trubek [-]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{p1}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m^3]

n_{vstup} - počet vstupu do trubek [-]

Tlaková ztráta pro výstup z trubek

$$\Delta p_{\xi_2} = \xi_{výstup} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_{p1}^{Stř} \cdot n_{výstup} \quad (15.15)$$

$$\Delta p_{\xi_2} = 1,0 \cdot \frac{15,8^2}{2} \cdot 19,73 \cdot 2 = 4920 [Pa]$$

kde $\xi_{výstup}$ - je součinitel tlakové ztráty pro výstup z trubek [-]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{p1}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m^3]

$n_{výstup}$ - počet výstupu z trubek [-]

Tlaková ztráta pro ohýb trubek

$$\Delta p_{\xi_3} = \xi_{ohýb} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_{p1}^{Stř} \cdot n_{ohýb} \cdot n_{had} \quad (15.16)$$

$$\Delta p_{\xi_3} = 0,11 \cdot \frac{15,8^2}{2} \cdot 19,73 \cdot 26 \cdot 2 = 14071,5 [Pa]$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

kde $\xi_{ohýb}$ - je součinitel tlakové ztráty pro výstup z trubek [-]

w_P - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{p1}^{stř}$ - střední hustota páry [kg/m³]

$n_{ohýb}$ - počet ohýbu trubek [-]

n_{had} - počet hadů [-]

15.3.3 Celková tlaková ztráta v přehříváku P1

$$\Delta p_{P1} = \Delta p_{\lambda} + \Delta p_{\xi_1} + \Delta p_{\xi_2} + \Delta p_{\xi_3}$$

(15.17)

$$\Delta p_{P1} = 183638 + 2460 + 4920 + 14071,5 = 205089 \text{ [Pa]} = 0,2051 \text{ [MPa]}$$

15.4 Tlaková ztráta v ohříváku vody

Tabulka 49 Parametry ohříváku vody pro výpočet tlakové ztráty (hydraulický výpočet)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnitřní průměr trubek EKO	d_{EKO}	24	mm
Rychlost proudění vody	w_v	1,23	m/s
Střední teplota vody	$t_{EKO}^{stř}$	168	°C
Střední tlak vody	$p_{EKO}^{stř}$	4,85	mm
Hustota vody	$\rho_{EKO}^{stř}$	902	kg/m ³
Součinitel kinematické viskozity vody	$\nu_{EKO}^{stř}$	$5,96 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Celková délka EKO	L_{EKO}	474,32	m
Počet vstupu do trubek	n_{vstup}	7	-
Počet výstupu z trubek	$n_{výstup}$	7	-
Počet ohýbu trubek	$n_{ohýb}$	189	-
Součinitele tlakové ztráty pro výpočet ztráty místními odpory [9]			
Pro vstup do trubek	ξ_{vstup}	0,5	-
Pro výstup z trubek	$\xi_{výstup}$	1,0	-
Pro ohýb trubek	$\xi_{ohýb}$	0,11	-

15.4.1 Tlaková ztráta třením

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \cdot \frac{L_{EKO}}{d_{EKO}} \cdot \frac{(w_v)^2}{2} \cdot \rho_{EKO}^{stř}$$

(15.18)

$$\Delta p_{\lambda} = 0,026 \cdot \frac{474,32}{0,024} \cdot \frac{1,23^2}{2} \cdot 902 = 261954 \text{ [Pa]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Kde λ - je součinitel tření [-]

L_{EKO} - je délka EKO [m]

d_{EKO} - vnitřní průměr trubek EKO [m]

w_v - rychlost proudění vody [m/s]

$\rho_{EKO}^{Stř}$ - střední hustota vody [kg/m³]

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w_v \cdot d_{EKO}}{\nu_{EKO}^{Stř}} \quad (15.19)$$

$$Re = \frac{1,23 \cdot 0,024}{5,96 \cdot 10^{-6}} = 2,2 \cdot 10^5 [-]$$

kde $\nu_{ZT}^{Stř}$ - je součinitel kinematické viskozity páry pro střední teplotu a tlak páry [m²/s]

Pro $Re = 2,2 \cdot 10^5 [-]$ a vnitřní průměr trubek $d_{EKO} = 0,024 [m]$, dle [9] volíme $\lambda = 0,026 [-]$

15.4.2 Tlaková ztráta místními odpory**Tlaková ztráta pro vstup do trubek**

$$\Delta p_{\xi 1} = \xi_{vstup} \cdot \frac{w_v^2}{2} \cdot \rho_{EKO}^{Stř} \cdot n_{vstup} \quad (15.20)$$

$$\Delta p_{\xi 1} = 0,5 \cdot \frac{1,23^2}{2} \cdot 902 \cdot 7 = 2379 [Pa]$$

kde ξ_{vstup} - je součinitel tlakové ztráty pro vstup do trubek [-]

w_v - rychlost proudění vody [m/s]

$\rho_{EKO}^{Stř}$ - střední hustota vody [kg/m³]

n_{vstup} - počet vstupu do trubek [-]

Tlaková ztráta pro výstup z trubek

$$\Delta p_{\xi 2} = \xi_{výstup} \cdot \frac{w_v^2}{2} \cdot \rho_{EKO}^{Stř} \cdot n_{výstup} \quad (15.21)$$

$$\Delta p_{\xi 2} = 1,0 \cdot \frac{1,23^2}{2} \cdot 902 \cdot 7 = 4758 [Pa]$$

kde $\xi_{výstup}$ - je součinitel tlakové ztráty pro výstup z trubek [-]

w_v - rychlost proudění vody [m/s]

$\rho_{EKO}^{Stř}$ - střední hustota vody [kg/m³]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$n_{výstup}$ - počet výstupu z trubek [-]

Tlaková ztráta pro ohýb trubek

$$\Delta p_{\xi 3} = \xi_{ohýb} \cdot \frac{w_v^2}{2} \cdot \rho_{EKO}^{Stř} \cdot n_{ohýb} \quad (15.22)$$

$$\Delta p_{\xi 3} = 0,11 \cdot \frac{1,23^2}{2} \cdot 902 \cdot 189 = 14131,4 \text{ [Pa]}$$

kde $\xi_{ohýb}$ - je součinitel tlakové ztráty pro výstup z trubek [-]

w_v - rychlost proudění vody [m/s]

$\rho_{EKO}^{Stř}$ - střední hustota vody [kg/m³]

$n_{ohýb}$ - počet ohýbu trubek [-]

15.4.3 Celková tlaková ztráta v ohříváku vody

$$\Delta p_{EKO} = \Delta p_{\lambda} + \Delta p_{\xi 1} + \Delta p_{\xi 2} + \Delta p_{\xi 3} \quad (15.23)$$

$$\Delta p_{EKO} = 261954 + 2379 + 4758 + 14131,4 = 283222,4 \text{ [Pa]} = 0,2832 \text{ [MPa]}$$

15.5 Tlaková ztráta v závěsných trubkách

Tabulka 50 Parametry přehříváku P1 pro výpočet tlakové ztráty (hydraulický výpočet)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnitřní průměr závěsných trubek	d_{ZT}	24	mm
Rychlost proudění páry	w_p	16,96	m/s
Střední teplota páry	$t_{ZT}^{Stř}$	258,86	°C
Střední tlak páry	$p_{ZT}^{Stř}$	4,5	mm
Hustota páry	$\rho_{ZT}^{Stř}$	22,55	kg/m ³
Součinitel kinematické viskozity páry	$\nu_{ZT}^{Stř}$	$7,89 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
Celková délka závěsných trubek	L_{ZT}	14,36	m
Počet hadů	n_{had}	2	-
Počet vstupu do trubek	n_{vstup}	2	-
Počet výstupu z trubek	$n_{výstup}$	1	-
Počet ohýbů trubek	$n_{ohýb}$	50	-
Součinitele tlakové ztráty pro výpočet ztráty místními odpory [9]			
Pro vstup do trubek	ξ_{vstup}	0,5	-
Pro výstup z trubek	$\xi_{výstup}$	1,0	-
Pro ohýb trubek	$\xi_{ohýb}$	0,11	-

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**15.5.1 Tlaková ztráta třením**

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \cdot \frac{L_{ZT}}{d_{ZT}} \cdot \frac{(w_p)^2}{2} \cdot \rho_{ZT}^{Stř} \quad (15.24)$$

$$\Delta p_{\lambda} = 0,026 \cdot \frac{14,36}{0,024} \cdot \frac{16,96^2}{2} \cdot 22,55 = 31274,72 [Pa]$$

Kde λ - je součinitel tření [-]

L_{ZT} - je délka ZT [m]

d_{ZT} - vnitřní průměr trubek [m]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{ZT}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m³]

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w_p \cdot d_{ZT}}{\nu_{ZT}^{Stř}} \quad (15.25)$$

$$Re = \frac{16,96 \cdot 0,024}{9,7 \cdot 10^{-7}} = 6,23 \cdot 10^5 [-]$$

kde $\nu_{ZT}^{Stř}$ - je součinitel kinematické viskozity páry pro střední teplotu a tlak páry [m²/s]

Pro $Re = 6,23 \cdot 10^5 [-]$ a vnitřní průměr trubek $d_{ZT} = 0,024 [m]$, dle [9] volíme $\lambda = 0,026 [-]$

15.5.2 Tlaková ztráta místními odpory**Tlaková ztráta pro vstup do trubek**

$$\Delta p_{\xi_1} = \xi_{vstup} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_{ZT}^{Stř} \cdot n_{vstup} \quad (15.26)$$

$$\Delta p_{\xi_1} = 0,5 \cdot \frac{16,96^2}{2} \cdot 22,55 \cdot 2 = 3241,53 [Pa]$$

kde ξ_{vstup} - je součinitel tlakové ztráty pro vstup do trubek [-]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{ZT}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m³]

n_{vstup} - počet vstupu do trubek [-]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Tlaková ztráta pro výstup z trubek**

$$\Delta p_{\xi 2} = \xi_{výstup} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_{ZT}^{Stř} \cdot n_{výstup} \quad (15.27)$$

$$\Delta p_{\xi 2} = 1,0 \cdot \frac{16,96^2}{2} \cdot 22,55 \cdot 1 = 3241,53 [Pa]$$

kde $\xi_{výstup}$ - je součinitel tlakové ztráty pro výstup z trubek [-]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{ZT}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m³]

$n_{výstup}$ - počet výstupu z trubek [-]

Tlaková ztráta pro ohýb trubek

$$\Delta p_{\xi 3} = \xi_{ohýb} \cdot \frac{w_p^2}{2} \cdot \rho_{ZT}^{Stř} \cdot n_{ohýb} \quad (15.28)$$

$$\Delta p_{\xi 3} = 0,11 \cdot \frac{16,96^2}{2} \cdot 22,55 \cdot 50 = 17828,4 [Pa]$$

kde $\xi_{ohýb}$ - je součinitel tlakové ztráty pro výstup z trubek [-]

w_p - rychlost proudění páry [m/s]

$\rho_{ZT}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m³]

$n_{ohýb}$ - počet ohýbu trubek [-]

n_{had} - počet hadů [-]

15.5.3 Celková tlaková ztráta v závěsných trubkách

$$\Delta p_{ZT} = \Delta p_{\lambda} + \Delta p_{\xi 1} + \Delta p_{\xi 2} + \Delta p_{\xi 3} \quad (15.29)$$

$$\Delta p_{ZT} = 31274,72 + 3241,53 + 3241,53 + 17828,4 = 55586 [Pa] = 0,0556 [MPa]$$

15.6 POROVNÁNÍ SKUTEČNÝCH A ZVOLENÝCH HODNOT TLAKOVÝCH ZTRÁT

Tabulka 51 Porovnání skutečných a zvolených hodnot tlakových ztrát (hydraulický výpočet)

Výhřevná plocha	Značení	Skutečná hodnota	Zvolená hodnota	Jednotka
Tlaková ztráta v přehříváku P3	Δp_{P3}	0,2326	0,15	MPa
Tlaková ztráta v přehříváku P2	Δp_{P2}	0,1387	0,15	MPa
Tlaková ztráta v přehříváku P1	Δp_{P1}	0,2051	0,15	MPa
Tlaková ztráta v závěsných trubkách	Δp_{ZT}	0,0556	0,1	MPa
Tlaková ztráta v ekonomizéru	Δp_{EKO}	0,2832	0,6	MPa

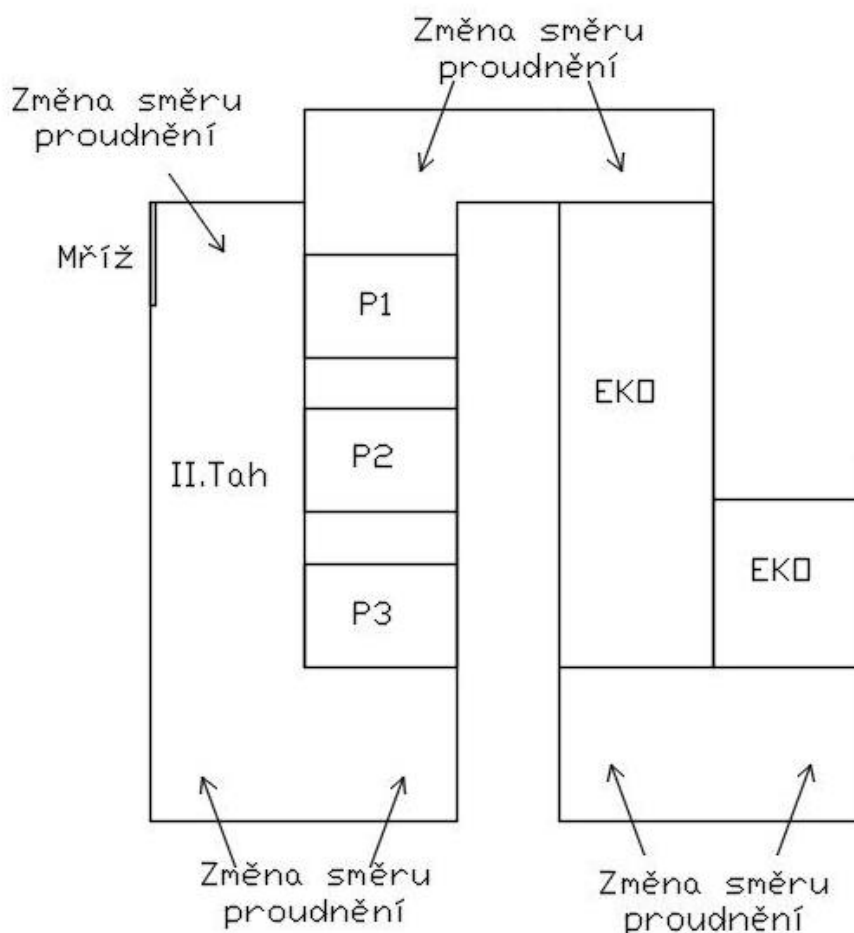
ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Skutečný tlak napájecí vody**

$$p_{NV} = p_P + \Delta p_{P3} + \Delta p_{P2} + \Delta p_{P1} + \Delta p_{ZT} + \Delta p_V + \Delta p_{EKO} \quad (15.30)$$

$$p_{NV} = 4,0 + 0,2326 + 0,1387 + 0,2051 + 0,0556 + 0 + 0,2832 = 4,915 \text{ [MPa]}$$

16. AERODYNAMICKÝ VÝPOČET KOTLE

Aerodynamický výpočet kotle slouží k určování odporů (tlakových ztrát) při proudění spalin jednotlivými částmi kotle [10]. Postup výpočtu je uveden na obr. (16-1).



Obrázek 32 Schema aerodynamického výpočtu kotle

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

16.1 VÝSTUP Z OHNIŠTĚ (MŘÍŽ)

Tabulka 52 Parametry mříže pro výpočet tlakové ztráty (aerodynamický výpočet)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr trubek	D	60,3	mm
Střední teplota spalin	T_p	1192,45	K
Rychlost proudění spalin	w_{SP}	6,92	m/s
Příčná rozteč	s_1	270	mm
Podélná rozteč	s_2	150	mm
Počet řad	z_2	3	-
Hustota spalin	$\rho_{SP}^{Stř}$	0,234	kg/m ³
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_{SP}^{Stř}$	$159 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Ekvivalentní průměr	d_e	1,73	m
Teplota stěny trubky	T_{st}	611,3	K
Součinitele „x“ [10]			
Součinitel x_3	x_3	0,7	-
Součinitel x_4	x_4	0,64	-

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w_{SP} \cdot d_e}{\nu_{SP}^{Stř}} \quad (16.1)$$

$$Re = \frac{6,92 \cdot 1,73}{159 \cdot 10^{-6}} = 7,5 \cdot 10^5 [-]$$

kde $\nu_{SP}^{Stř}$ - je součinitel kinematické viskozity páry pro střední teplotu a tlak páry [m²/s]

d_e - ekvivalentní průměr [m]

Odpor svazku trubek uspořádaných vystřídane v n-řadách za sebou

$$\Delta p_{z1} = x_3 \cdot x_4 \cdot Re^{-0,27} \cdot \rho_M^{Stř} \cdot \frac{w_{SP}^2}{2} \cdot \left(\frac{T_p}{T_{st}} \right)^{0,583} \cdot (n + 1) \quad (16.2)$$

$$\Delta p_{z1} = 0,7 \cdot 0,64 \cdot (7,5 \cdot 10^5)^{-0,27} \cdot 0,234 \cdot \frac{6,92^2}{2} \cdot \left(\frac{1192,45}{611,3} \right)^{0,583} \cdot (3 + 1) = 0,72 [Pa]$$

kde x_3 - závisí na poměrných roztečích příčné $\frac{s_1}{D}$ a podélné $\frac{s_2}{D}$

x_4 - závisí na teplotě proudu t_p a teplotě stěny trubky t_{st}

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Re - Reynoldsovo číslo

$\rho_M^{Stř}$ – hustota spalin [kg/m^3]

w_{SP} – rychlost spalin [m/s]

T_p - teplota proudu [K]

T_{st} - teplotě stěny trubky [K]

16.2 II. TAH

Výpočet je rozdělen čtyři částí: místní odpor při změně směru proudu na výstupu z mříže, odpor třením po délce kanálů, místní odpor při změně směru proudu na výstupu z II. Tahu a výpočet vztlaku.

Tabulka 53 Parametry II.tahu pro výpočet tlakové ztráty (aerodynamický výpočet)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr trubek	D	60,3	mm
Střední teplota spalin	t_p	819	°C
Rychlost proudění spalin	w_{SP}	7,11	m/s
Hustota spalin	$\rho_{SP}^{Stř}$	0,256	kg/m^3
Hustota vlhkého vzduchu při 30°C	ρ_v	1,19	kg/m^3
Součinitel kinematické viskozity spalin	$\nu_{SP}^{Stř}$	$139 \cdot 10^{-6}$	m^2/s
Délka II. Tahu	L	12,4	m
Ekvivalentní průměr	d_e	2,75	m
Vzdálenost od středu počátečního a konečného průřezu	z	13,135	m
Teplota stěny trubky	t_{st}	318,11	°C

16.2.1 Místní odpor při změně směru proudu na výstupu z mříže

Tabulka 54 Opravné součinitele pro výpočet místního odporu při změně směru proudu na výstupu z mříže [10]

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Opravní součinitel x_1	x_1	1,3	-
Opravní součinitel x_2	x_2	1,0	-
Opravní součinitel x_3	x_3	0,9	-
Součinitel ξ_0	ξ_0	0,09	-
Poměr r/b	r/b	5	-
Úhel	α	90	°

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Reynoldsovo číslo**

Reynoldsovo číslo je pro II. Tah konstantní. Tato hodnota platí i pro následující výpočty všech odporů ve II. Tahu.

$$Re = \frac{w_{SP} \cdot d_e}{\nu_{SP}^{Stř}} \quad (16.3)$$

$$Re = \frac{7,11 \cdot 2,75}{139 \cdot 10^{-6}} = 1,41 \cdot 10^5 [-]$$

Součinitel místního odporu pro oblouková kolena

$$\xi = \xi_0 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (16.4)$$

$$\xi = 0,09 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 0,9 = 0,1053 [-]$$

Tlaková ztráta při změně směru proudu na výstupu z mříže

$$\Delta p_{m1} = \xi \cdot \frac{w_{SP}^2}{2} \cdot \rho_{SP}^{Stř} \quad (16.5)$$

$$\Delta p_{m1} = 0,1053 \cdot \frac{7,11^2}{2} \cdot 0,256 = 0,68 [\text{Pa}]$$

kde ξ - je součinitel místního odporu [-]

w_{SP} - rychlost proudění spalin [m/s]

$\rho_{SP}^{Stř}$ - střední hustota páry [kg/m³]

16.2.2 Tlaková ztráta třením po délce kanálů

$$\Delta p_t = \lambda \cdot \frac{L}{d_e} \cdot \frac{w_{SP}^2}{2} \cdot \rho_{SP}^{Stř} \cdot \left(\frac{T_p}{T_{st}} \right)^{0,583} \quad (16.6)$$

$$\Delta p_t = 0,017 \cdot \frac{12,4}{2,75} \cdot \frac{7,11^2}{2} \cdot 0,256 \cdot \left(\frac{819 + 273,15}{318,11 + 273,15} \right)^{0,583} = 0,7 [\text{Pa}]$$

kde λ - součinitel tření [-]

Jakimovův vztah [10]

$$\lambda = 0,857 (\lg Re)^{-2,4} \quad (16.7)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$\lambda = 0,857(\lg 1,41 \cdot 10^5)^{-2,4} = 0,017 [-]$$

16.2.3 Místní odpor při změně směru proudu na výstupu z II. Tahu

Tabulka 55 Opravné součinitele pro výpočet místního odporu při změně směru proudu na výstupu z II. Tahu [10]

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Opravní součinitel x_2	x_2	0,5	-
Úhel	α	30	°

Součinitel místního odporu pro ostrá kolena

$$\xi = 1,2 \cdot x_2 \tag{16.8}$$

$$\xi = 1,2 \cdot 0,5 = 0,6 [-]$$

Tlaková ztráta při změně směru proudu na výstupu z II. Tahu

$$\Delta p_{m2} = \xi \cdot \frac{w_{SP}^2}{2} \cdot \rho_{SP}^{Stř} \tag{16.9}$$

$$\Delta p_{m2} = 0,6 \cdot \frac{7,11^2}{2} \cdot 0,256 = 3,9 \text{ [Pa]}$$

16.2.4 Vztlak II. Tahu

$$\Delta p_V = z \cdot \left(\rho_{VZ} - \rho_{sp} \cdot \frac{273,15}{273,15 + t_S} \right) \cdot g \tag{16.10}$$

$$\Delta p_V = 13,135 \cdot \left(1,19 - 0,256 \cdot \frac{273,15}{273,15 + 318,11} \right) \cdot 9,81 = 145,1 \text{ [Pa]}$$

kde z - je vzdálenost od středu počátečního a konečného průřezu [m]

ρ_{VZ} - je hustota vzduchu $\rho_{VZ} = 1,19 \frac{kg}{m^3}$ při 20 °C

g - je gravitační zrychlení [m/s^2]

t_S - je střední teplota spalin [°C]

16.2.5 Celková tlaková ztráta II. Tahu

$$\Delta p_{z2} = \Delta p_{m1} + \Delta p_t + \Delta p_{m2} + \Delta p_V \tag{16.11}$$

$$\Delta p_{z2} = 0,68 + 0,7 + 3,9 + 145,1 = 150,35 \text{ [Pa]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**16.3 III. TAH**

Výpočet je rozdělen pět částí: místní odpor při změně směru proudu ve vratné komoře, tlaková ztráta při obtekání svazku přehříváků P3, P2, P1 (uspořádání trubek za sebou), místní odpor při změně směru proudu na výstupu z III. Tahu a výpočet vztlaku.

16.3.1 Místní odpor při změně směru proudu ve vratné komoře

Tabulka 56 Parametry vratné komory pro výpočet tlakové ztráty (aerodynamický výpočet)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Střední teplota spalin	t_p	721,15	°C
Rychlost proudění spalin	w_{SP}	5,034	m/s
Hustota spalin	$\rho_{SP}^{Stř}$	0,281	kg/m ³

Tabulka 57 Opravné součinitele pro výpočet místního odporu při změně směru proudu ve vratné komoře [10]

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Opravní součinitel x_2	x_2	0,35	-
Úhel	α	21	°

Součinitel místního odporu pro ostrá kolena

$$\xi = 1,2 \cdot x_2$$

(16.12)

$$\xi = 1,2 \cdot 0,35 = 0,42 [-]$$

Tlaková ztráta při změně směru proudu ve vratné komoře

$$\Delta p_{m3} = \xi \cdot \frac{w_{SP}^2}{2} \cdot \rho_{SP}^{Stř}$$

(16.13)

$$\Delta p_{m3} = 0,42 \cdot \frac{5,034^2}{2} \cdot 0,281 = 1,5 \text{ [Pa]}$$

Pro zjednodušení výpočtu volíme další tlakové ztráty při změně směru proudu se rovnají střední hodnotě tlakové ztráty při změně směru proudu na výstupu z II. Tahu a tlakové ztrátě při změně směru proudu ve vratné komoře.

$$\Delta p_{mi} = \frac{\Delta p_{m3} + \Delta p_{m2}}{2}$$

(16.14)

$$\Delta p_{mi} = \frac{3,9 + 1,5}{2} = 2,7 \text{ [Pa]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

16.3.2 Tlaková ztráta při obtekání svazku přehřívaků P3

Tabulka 58 Parametry přehřívaků P3 pro výpočet tlakové ztráty (aerodynamický výpočet)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr trubek	D	38	mm
Střední teplota spalin	t_p	649,5	°C
Rychlost proudění spalin	w_{SP}	5,6	m/s
Příčná rozteč	s_1	230	mm
Podélná rozteč	s_2	70	mm
Poměr $\frac{s_2}{s_1-d}$	$\frac{s_2}{s_1-d}$	7,2	-
Počet řad	z_2	48	-
Hustota spalin	$\rho_{SP}^{Stř}$	0,303	kg/m ³
Součinitele pro výpočet [10]			
Součinitel x	x	2,8	-
Součinitel Δp_1	Δp_1	1,1	Pa

Tlaková ztráta při obtekání svazku přehřívaků P3

Pro uspořádání trubek za sebou platí vztah [10].

$$\Delta p_z^{P3} = \Delta p_1 \cdot x \cdot n$$

(16.15)

$$\Delta p_z^{P3} = 1,1 \cdot 2,8 \cdot 48 = 147,84 \text{ [Pa]}$$

kde $\Delta p_1 \cdot x$ – průměrná ztráta jedné řady trubek [Pa]

n – počet řad [-]

16.3.3 Tlaková ztráta při obtekání svazku přehřívaků P2

Tabulka 59 Parametry přehřívaků P3 pro výpočet tlakové ztráty (aerodynamický výpočet)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr trubek	D	35	mm
Střední teplota spalin	t_p	527,94	°C
Rychlost proudění spalin	w_{SP}	5,73	m/s
Příčná rozteč	s_1	115	mm
Podélná rozteč	s_2	75	mm
Poměr $\frac{s_2}{s_1-d}$	$\frac{s_2}{s_1-d}$	0,94	-
Počet řad	z_2	16	-
Hustota spalin	$\rho_{SP}^{Stř}$	0,35	kg/m ³
Součinitele pro výpočet [10]			
Součinitel x	x	0,55	-
Součinitel Δp_1	Δp_1	1,48	Pa

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Tlaková ztráta při obtekání svazku přehřívaků P2**

Pro uspořádání trubek za sebou platí vztah [10].

$$\Delta p_z^{P2} = \Delta p_1 \cdot x \cdot n$$

(16.16)

$$\Delta p_z^{P2} = 1,48 \cdot 0,55 \cdot 16 = 13,024 \text{ [Pa]}$$

kde $\Delta p_1 \cdot x$ – průměrná ztráta jedné řady trubek [Pa]

n – počet řad [-]

16.3.4 Tlaková ztráta při obtekání svazku přehřívaků P1

Tabulka 60 Parametry přehřívaků P3 pro výpočet tlakové ztráty (aerodynamický výpočet)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr trubek	D	35	mm
Střední teplota spalin	t_p	412,04	°C
Rychlost proudění spalin	w_{SP}	4,9	m/s
Příčná rozteč	s_1	115	mm
Podélná rozteč	s_2	75	mm
Poměr $\frac{s_2}{s_1 - d}$	$\frac{s_2}{s_1 - d}$	0,94	-
Počet řad	z_2	56	-
Hustota spalin	$\rho_{SP}^{stř}$	0,41	kg/m ³
Součinitele pro výpočet [10]			
Součinitel x	x	0,55	-
Součinitel Δp_1	Δp_1	1,2	Pa

Tlaková ztráta při obtekání svazku přehřívaků P2

Pro uspořádání trubek za sebou platí vztah [10].

$$\Delta p_z^{P1} = \Delta p_1 \cdot x \cdot n$$

(16.17)

$$\Delta p_z^{P1} = 1,2 \cdot 0,55 \cdot 56 = 36,96 \text{ [Pa]}$$

kde $\Delta p_1 \cdot x$ – průměrná ztráta jedné řady trubek [Pa]

n – počet řad [-]

Tlaková ztráta při změně směru proudu na výstupu z III. Tahu

Volíme dle vztahu (16.14).

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$\Delta p_{m4} = 2,7 \text{ [Pa]}$$

16.3.5 Vztlak III. Tahu

Tabulka 61 Hodnoty pro výpočet vztlaku ve III. Tahu

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vzdálenost od středu počátečního a konečného průřezu	z	16,685	m
Hustota spalin ve III. Tahu	$\rho_{SP}^{stř}$	0,346	kg/m ³
Střední teplota spalin	t_p	534	°C

$$\Delta p_V = z \cdot \left(\rho_{VZ} - \rho_{sp} \cdot \frac{273,15}{273,15 + t_s} \right) \cdot g \quad (16.18)$$

$$\Delta p_V = 16,685 \cdot \left(1,19 - 0,346 \cdot \frac{273,15}{273,15 + 534} \right) \cdot 9,81 = 175,62 \text{ [Pa]}$$

kde z - je vzdálenost od středu počátečního a konečného průřezu [m]

ρ_{VZ} - je hustota vzduchu $\rho_{VZ} = 1,19 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ při 20 °C

g - je gravitační zrychlení [m/s²]

t_s - je střední teplota spalin [°C]

16.3.6 Celková tlaková ztráta III. Tahu

$$\Delta p_{z3} = \Delta p_{m3} + \Delta p_z^{P3} + \Delta p_z^{P2} + \Delta p_z^{P1} + \Delta p_{m4} - \Delta p_V \quad (16.19)$$

$$\Delta p_{z3} = 1,5 + 13,024 + 147,84 + 36,96 + 2,7 - 175,62 = 26,4 \text{ [Pa]}$$

16.4 IV. TAH

Výpočet je rozdělen tří částí: místní odpor při změně směru proudu na vstupu a výstupu z III. Tahu, tlaková ztráta při obtekání svazku ohříváků vody EKO (uspořádání trubek za sebou) a výpočet vztlaku.

16.4.1 Místní odpor při změně směru proudu na vstupu a výstupu z IV. Tahu

Volíme dle vztahu (16.14).

$$\Delta p_{m6} = \Delta p_{m7} = 2,7 \text{ [Pa]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

16.4.2 Tlaková ztráta při obtekání svazku ohříváků vody EKO

Tabulka 62 Parametry ohříváků vody EKO pro výpočet tlakové ztráty ve IV. Tahu (aerodynamický výpočet)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr trubek	D	32	mm
Střední teplota spalin	t_p	260,04	°C
Rychlost proudění spalin	w_{SP}	5,07	m/s
Příčná rozteč	s_1	100	mm
Podelná rozteč	s_2	80	mm
Poměr $\frac{s_2}{s_1-d}$	$\frac{s_2}{s_1-d}$	1,2	-
Počet řad	z_2	140	-
Hustota spalin	$\rho_{SP}^{Stř}$	0,524	kg/m ³
Součinitele pro výpočet [10]			
Součinitel x	x	0,75	-
Součinitel Δp_1	Δp_1	1,5	Pa

Tlaková ztráta při obtekání svazku ohříváků vody EKO

Pro uspořádání trubek za sebou platí vztah [10].

$$\Delta p_z^{EKO1} = \Delta p_1 \cdot x \cdot n \quad (16.20)$$

$$\Delta p_z^{EKO1} = 1,5 \cdot 0,75 \cdot 140 = 157,5 \text{ [Pa]}$$

kde $\Delta p_1 \cdot x$ – průměrná ztráta jedné řady trubek [Pa]

n – počet řad [-]

16.4.3 Vztlak IV. Tahu

Tabulka 63 Hodnoty pro výpočet vztlaku ve IV. Tahu

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vzdálenost od středu počátečního a konečného průřezu	z	17,205	m
Hustota spalin ve IV. Tahu	$\rho_{SP}^{Stř}$	0,5	kg/m ³
Střední teplota spalin	t_p	288,54	°C

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$\Delta p_V = z \cdot \left(\rho_{VZ} - \rho_{sp} \cdot \frac{273,15}{273,15 + t_S} \right) \cdot g \quad (16.21)$$

$$\Delta p_V = 17,205 \cdot \left(1,19 - 0,5 \cdot \frac{273,15}{273,15 + 288,54} \right) \cdot 9,81 = 160 \text{ [Pa]}$$

kde z - je vzdálenost od středu počátečního a konečného průřezu [m]

ρ_{VZ} - je hustota vzduchu $\rho_{VZ} = 1,19 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ při $20 \text{ }^\circ\text{C}$

g - je gravitační zrychlení [m/s^2]

t_S - je střední teplota spalin [$^\circ\text{C}$]

16.4.4 Celková tlaková ztráta IV. Tahu

$$\Delta p_{z4} = \Delta p_{m6} + \Delta p_{m7} + \Delta p_z^{EKO1} + \Delta p_V \quad (16.22)$$

$$\Delta p_{z4} = 2,7 + 2,7 + 157,5 + 160 = 323 \text{ [Pa]}$$

16.5 V. TAH

Výpočet je rozdělen tří částí: místní odpor při změně směru proudu na vstupu do III. Tahu , tlaková ztráta při obtekání svazku ohříváků vody EKO (uspořádání trubek za sebou) a výpočet vztlaku.

16.5.1 Místní odpor při změně směru proudu na vstupu a výstupu z III. Tahu

Volíme dle vztahu (16.14).

$$\Delta p_{m8} = 2,7 \text{ [Pa]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

16.5.2 Tlaková ztráta při obtekání svazku ohříváků vody EKO

Tabulka 64 Parametry ohříváků vody EKO pro výpočet tlakové ztráty ve V. Tahu (aerodynamický výpočet)

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr trubek	D	32	mm
Střední teplota spalin	t_p	188,5	°C
Rychlost proudění spalin	w_{SP}	5,07	m/s
Příčná rozteč	s_1	100	mm
Podélná rozteč	s_2	80	mm
Poměr $\frac{s_2}{s_1-d}$	$\frac{s_2}{s_1-d}$	1,2	-
Počet řad	z_2	56	-
Hustota spalin	$\rho_{SP}^{Stř}$	0,524	kg/m ³
Součinitele pro výpočet [10]			
Součinitel x	x	0,75	-
Součinitel Δp_1	Δp_1	1,9	Pa

Tlaková ztráta při obtekání svazku ohříváků vody EKO

Pro uspořádání trubek za sebou platí vztah [10].

$$\Delta p_z^{EKO2} = \Delta p_1 \cdot x \cdot n \quad (16.23)$$

$$\Delta p_z^{EKO2} = 1,5 \cdot 0,55 \cdot 56 = 79,8 \text{ [Pa]}$$

kde $\Delta p_1 \cdot x$ – průměrná ztráta jedné řady trubek [Pa]

n – počet řad [-]

16.5.3 Vztlak V. Tahu

Tabulka 65 Hodnoty pro výpočet vztlaku ve V. Tahu

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vzdálenost od středu počátečního a konečného průřezu	z	7,895	m
Hustota spalin ve V. Tahu	$\rho_{SP}^{Stř}$	0,605	kg/m ³
Střední teplota spalin	t_p	188,5	°C

$$\Delta p_v = z \cdot \left(\rho_{VZ} - \rho_{sp} \cdot \frac{273,15}{273,15 + t_s} \right) \cdot g \quad (16.21)$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

$$\Delta p_V = 7,895 \cdot \left(1,19 - 0,605 \cdot \frac{273,15}{273,15 + 188,5} \right) \cdot 9,81 = 64,45 \text{ [Pa]}$$

kde z - je vzdálenost od středu počátečního a konečného průřezu [m]

ρ_{VZ} - je hustota vzduchu $\rho_{VZ} = 1,19 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ při $20 \text{ }^\circ\text{C}$

g - je gravitační zrychlení [m/s^2]

t_s - je střední teplota spalin [$^\circ\text{C}$]

16.5.4 Celková tlaková ztráta V. Tahu

$$\Delta p_{z5} = \Delta p_{m8} + \Delta p_z^{EKO2} + \Delta p_V \tag{16.22}$$

$$\Delta p_{z5} = 2,7 + 79,8 - 64,45 = 18,04 \text{ [Pa]}$$

16.6 Tahová ztráta kotle

$$\Delta p_{zK} = \Delta p_{z1} + \Delta p_{z2} + \Delta p_{z3} + \Delta p_{z4} + \Delta p_{z5} \tag{16.23}$$

$$\Delta p_{zK} = 0,72 + 150,35 + 26,4 + 323 + 18,04 = 518,5 \text{ [Pa]}$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**16.7 NÁVRH KOMÍNA, PŘÍROZENY TAH**

Návrh komína záleží na výběru vhodné výšky tak, aby vztlak komína překonal tlakové ztráty kotle které se rovnají 518,5 Pa.

Tabulka 66 Parametry komína

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Vstupní rychlost spalin	w_1	5,1	m/s
Výstupní rychlost spalin	w_2	8,5	m/s
Teplota spalin na vstupu	t_{s1}	160,14	°C
Objem spalin	O_{SP}	7,132	m ³ /kg
Palivo skutečně spálené	M_{pv}	2,375	kg/s
Výkon kotle	M_p	55,5	t/h
Teplota okolního vzduchu	t_v	20	°C
Vstupní hustota spalin	ρ_{s1}	0,64	kg/m ³
Součinitel kinematické viskozity spalin pro střední teplotu proudu	$\nu_{SP}^{stř}$	$2,76 \cdot 10^{-5}$	m ² /s
Výška komína	H	100	m
Tloušťka stěny	tl_k	15	mm
Materiál	Plech P235GH		
Konstanta „ χ “ [10]	χ	2,0	-

16.6.1 Teplota v ústí komína

$$t_{s2} = t_{s1} - H \frac{\chi}{\sqrt{M_p}} \quad (16.24)$$

$$t_{s2} = 160,14 - 100 \frac{2}{\sqrt{55,5}} = 133,3 \text{ [°C]}$$

Výstupní hustota spalin

$$\rho_{s2} = 0,69 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Střední teplota spalin

$$t_s = \frac{t_{s1} + t_{s2}}{2} = \frac{160,14 + 133,3}{2} = 146,72 \text{ [°C]} \quad (16.26)$$

16.7.2 Geometrický návrh komína

Určení vstupního a výstupního průměru komínu.

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**Množství spalin na vstupu do komína**

$$M_{SP1} = O_{SP} \cdot M_{pv} \cdot \frac{t_{s1} + 273,15}{273,15} \quad (16.27)$$

$$M_{SP1} = 7,132 \cdot 2,375 \cdot \frac{160,14 + 273,15}{273,15} = 26,87 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Vstupní průřez komína

$$S_1 = \frac{M_{SP1}}{w_1} = \frac{26,87}{5,1} = 5,3 \text{ [m}^2] \quad (16.28)$$

Vstupní průměr komína

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,3}{\pi}} = 2,6 \text{ [m]} \quad (16.29)$$

Množství spalin na výstupu do komína

$$M_{SP2} = O_{SP} \cdot M_{pv} \cdot \frac{t_{s1} + 273,15}{273,15} \quad (16.30)$$

$$M_{SP2} = 7,132 \cdot 2,375 \cdot \frac{133,3 + 273,15}{273,15} = 26,2 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Výstupní průřez komína

$$S_2 = \frac{M_{SP2}}{w_2} = \frac{26,2}{8,5} = 2,96 \text{ [m}^2] \quad (16.31)$$

Výstupní průměr komína

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,96}{\pi}} = 1,94 \text{ [m]} \quad (16.32)$$

16.7.3 Celkový statický tlak

Celkový statický tlak by nastal v místě zaústění spalin do komína při zastavení průtoku spalin ($w=0$) [10].

$$\Delta p_{stc} = g \cdot H \cdot (\rho_v - \rho_s) \quad (16.33)$$

$$\Delta p_{stc} = 9,81 \cdot 100 \cdot (1,27 - 0,66) = 592 \text{ [Pa]}$$

kde g - gravitační zrychlení [m/s^2]

H - výška komína [m]

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

T_v – teplota okolního vzduchu [°C]

T_s – střední teplota spalin [°C]

$\rho_v = 1,27 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ – hustota okolního vzduchu při 0 °C a 0,1 MPa

ρ_s - střední hustota spalin [kg/m³]

16.7.4 Tlakové ztráty při pruchodu spalin komínem.

Tabulka 67 Součinitele tlakové ztráty v komíně

Součinitele tlakové ztráty [10]			
Pro vstup spalin	ξ_{vstup}	0,5	-
Pro výstup spalin	$\xi_{výstup}$	1,0	-

Střední rychlost spalin

$$w_s = \frac{w_1 + w_2}{2} = \frac{5,1 + 8,5}{2} = 6,8 \text{ [m/s]} \quad (16.34)$$

Střední hustota spalin

$$\rho_s = \frac{\rho_{s1} + \rho_{s2}}{2} = \frac{0,64 + 0,69}{2} = 0,66 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (16.35)$$

Střední průměr komína

$$d_s = \frac{d_{s1} + d_{s2}}{2} = \frac{2,6 + 1,98}{2} = 2,29 \text{ [m]} \quad (16.36)$$

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w_s \cdot d_s}{\nu_{SP}^{stř}} \quad (16.37)$$

$$Re = \frac{6,8 \cdot 2,29}{2,76 \cdot 10^{-5}} = 6,4 \cdot 10^5 \text{ [-]}$$

Jakimovův vztah [10]

$$\lambda = 0,857(\lg Re)^{-2,4} \quad (16.38)$$

$$\lambda = 0,857(\lg 6,4 \cdot 10^5)^{-2,4} = 0,0126 \text{ [-]}$$

Tlaková ztráta třením v komíně

$$\Delta p_\lambda = \lambda \cdot \frac{H}{d_s} \cdot \frac{(w_s)^2}{2} \cdot \rho_s$$

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

(16.39)

$$\Delta p_{\lambda} = 0,0126 \cdot \frac{100}{2,29} \cdot \frac{6,8^2}{2} \cdot 0,66 = 8,4 \text{ [Pa]}$$

Místní ztráta při vstupu do komína

$$\Delta p_{vstup} = \xi_{vstup} \cdot \frac{(w_1)^2}{2} \cdot \rho_1 = 0,5 \cdot \frac{5,1^2}{2} \cdot 0,64 = 4,14 \text{ [Pa]} \quad (16.40)$$

Místní ztráta při výstupu z komína

$$\Delta p_{výstup} = \xi_{výstup} \cdot \frac{(w_2)^2}{2} \cdot \rho_2 = 1,0 \cdot \frac{8,5^2}{2} \cdot 0,66 = 24,82 \text{ [Pa]} \quad (16.41)$$

Součet tlakových ztrát

$$\Delta p_z = \Delta p_{\lambda} + \Delta p_{vstup} + \Delta p_{výstup}$$

(16.42)

$$\Delta p_z = 8,4 + 4,14 + 24,82 = 37,33 \text{ [Pa]}$$

16.6.3 Úžitečný tah komína

$$\Delta p_{st} = \Delta p_{stc} - \Delta p_d - \Delta p_z = \Delta p_{stc} - \left(\frac{w_1^2}{2} \cdot \rho_{s1} - \frac{w_2^2}{2} \cdot \rho_{s2} \right) - \Delta p_z$$

(16.43)

$$\Delta p_{st} = 592 - \left(\frac{5,1^2}{2} \cdot 0,64 - \frac{8,5^2}{2} \cdot 0,69 \right) - 37,33 = 572 \text{ [Pa]}$$

kde Δp_{stc} - celkový statický tlak [Pa] Δp_d - dynamický tlak [Pa] Δp_z - tlakové ztráty při průchodu spalin komínem [Pa]**16.8 Celková tahová ztráta kotle**

$$\Delta p_z = \Delta p_{zK} - \Delta p_{st}$$

(16.45)

$$\Delta p_z = 518,5 - 572 = -53 \text{ [Pa]}$$

Návřený komín výhovuje.

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

17. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout bubnový parní kotel s přirozenou cirkulací na spalování tříděného odpadu při zadaných parametrech výstupní přehřáté páry o tlaku 4 MPa, teplotě 400 °C a při parním výkonu kotle 55,5 t/h. Palivo do kotle přiváděno mechanickým pohazovačem na rošt.

Stěny spalovací komory, druhého a třetího tahu kotle jsou tvořeny membranovou stěnou.

Hlavní podmínkou při návrhu spalovací komory bylo, aby teplota spalin setrvala na minimální teplotě 850 °C po dobu alespoň 2 sekundy. Proto výška ohniště byla zvolena 17 m a doba setrvání spalin na této teplotě je 5 s. Vzhledem k obsahu chloru ve spalinách a hrozící korozi je na membránovou stěnu spalovací komory navařen Inconel.

Kvůli vysoké teplotě spalin za mříží, by mohlo docházet k zalepování výhřevných ploch přehříváků popílčkem. Z tohoto důvodu je za mříží II. tah prázdný. Vzhledem k nižší teplotě spalin již nehrozí riziko vzniku chlórové koroze, a proto není nutné stěny druhého tahu opatřovat návarem Inconelu.

Pro zvětšení účinnosti kotle jsou tuhé zbytky padající do výsupky ve druhém tahu zavedené zapaky do ohniště šnekovým dopravníkem.

Teplota spalin před prvním svázkem přehříváků P3 neměla by překročit teplotu 650-700 °C. Na výstupu z obrátové komory je teplota 707,3 °C. Podmínka je tady splněna a není nutno přidávat další teplosměnnou plochu pro ochlazení spalin na požadovanou teplotu.

Do třetího tahu jsou umístěny trubkové svazky přehříváků P3, P2 a P1, které jsou zavěšeny na chlazených závěsných trubkách. Z důvodu větší zanášení trubek byla zvolena příčná rozteč trubek u přehříváku P3 230 mm. U zbylých dvou přehříváků byla příčná rozteč zvolena 115 mm. Trubky všech výhřevných ploch jsou uspořádány za sebou. Ve srovnání s vystřídáním uspořádáním vzhledem k přestupu tepla nevýhodné, avšak z hlediska zanášení je to výhodnější. Z důvodu hrozící chlorové koroze přehřívák P3 je řešený jako souprůdný a přehříváky P2 a P1 mají proudění spalin a pracovního média jako protiproudé. Mezi jednotlivými výhřevnými plochami jsou umístěny ofukovače a tzv. průlezy, které slouží ke kontrole výhřevných ploch.

Mezi svazky přehříváků zavedeny vstříky napájecí vody, kvůli regulaci teploty přehřáté páry. Vzhledem k tomu, že palivo je příliš suché a není ekonomické dosáhnout vstříky na úroveň cca 7%, protože by pak přehříváky byly příliš velké, proto byly zvolené vstříky 5,77 %.

Čtvrtý a pátý tah kotle jsou tvořeny plechovým kanálem do kterého jsou umístěny jednotlivé trubkové svazky ekonomizéru. Příčná rozteč mezi trubkami byla zvolena 100 mm. Ohřívák vody byl dimenzován s ohledem na žádanou výstupní teplotu spalin 160 °C.

Po ukončení tepelného výpočtu byla provedena kontrola tepelné bilance kotle, podle které daný návrh kotle vyhovuje.

V hydraulickém výpočtu byly spočtené hodnoty tlakových ztrát jednotlivých výhřevných ploch. A pak bylo provedeno porovnání skutečných hodnot tlakových ztrát a hodnot zvolených při tepelném výpočtu, toto porovnání vyhovuje.

Aerodynamický výpočet byl proveden pro celou cestu spalinového kanálu kotle. Byl navržena komín s přirozeným tahem, výška komína je 100 m. Tak velký komín je schopen překonat celkovou tahovou ztrátu kotle a zajistit odvod spalin z kotle.

18. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Český statistický úřad. Produkce, využití a odstranění odpadu v roce 2015 [online]. 2017, [citováno 2017-05-25] Dostupné z: <<https://www.czso.cz/documents/10180/49151919/28002016.pdf/79028645-b5d7-4ada-904b-5c73fa3653f4?version=1.1>>.
- [2] Odpad je nevyčerpatelný zdroj energie Praha, Září 2010.
- [3] Energetické využití odpadu, SAKO ,Brno [online]. 2017, [citováno 2017-05-25] Dostupné z: <<http://www.sako.cz/stranka/cz/79/energeticke-vyuzivani-odpadu/>>
- [4] Nithikul, Jidapa. Potential of refuse derived fuel production from Bangkok municipal solid waste (diplomová práce). Thajsko: Asian institute of technology, 2007. 75 s. Visvanathan, C.
- [5] Integrovaná prevence a omezování znečištění: Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadu. Sevilla: Evropská komise, 2005.
- [6] KOHOUT, Přemysl. Výzkum a vývoj kotle pro spalování komunálního odpadu, První brněnská strojírna, a.s.
- [7] KARAFIÁT, P. Energetické využití komunálního odpadu. *FEL CVUT* [online]. 2017, [citováno 2017-05-25]. Dostupné z: < <http://k315.feld.cvut.cz/elen/sites/default/files/3-Karafiat.pdf?> >
- [8] BUDAJ, Florian. Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet. 4. přaprac. vyd. Brno: Vysokého učení technické, 1992, 200 s. ISBN 80-214-0426-4.
- [9] DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007c1999, 212 s. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [10] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. Parní kotle: technický průvodce svazek 32. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce (SNTL-Nakladatelství technické literatury).

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

19. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název	Jednotka
a	Stupeň černosti proudu spalin	-
A^d	Obsah popele v bezvodném stavu	%
a_{oh}	Délka ohniště	m
a_0	Stupeň černosti ohniště	-
a_{pl}	Stupeň černosti plamene	-
A^r	Obsah popele v původním stavu	%
a_{st}	Stupeň černosti povrchu stěn	-
b_{oh}	Šířka ohniště	m
Bo	Boltzmannovo číslo	-
C^{daf}	Obsah uhlíku v hořlavině	%
χ_1	Součinitel závislý na druhu paliva	-
χ_2	Součinitel závislý na způsobu spalován	-
C_i	Procentuální vyjádření hořlaviny v dané části kotle	%
C_t, C_l, C_m	Opravné součinitele	-
c_i	Měrné teplo popele při dané teplotě	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
Cl^{daf}	Obsah chlóru v hořlavině	%
Cl^r	Obsah chlóru v původním stavu	%
C^r	Obsah uhlíku v původním stavu	%
c_s	Opravný koeficient	-
c_z	Opravný koeficient	-
d_e	Ekvivalentní průměr	m
d	Vnitřní průměr trubky	mm
D	Vnější průměr trubky	mm
F_{st}	Celkový povrch stěn	m^2
H	Výška	m
h_{oh}	Výška kotle	m
H^{daf}	Obsah vodíku v hořlavině	%
H^r	Obsah vodíku v původním stavu	%
i_p	Fyzické teplo paliva	kJ/kg
I_{sp}	Entalpie spalin	kJ/kg
$I_S^{t,\alpha}$	Entalpie spalin při spalování s přebytkem vzduchu	kJ/kg
$I_S^{t, min}$	Entalpie stechiometrických spalin	kJ/kg
$I_V^{t, min}$	Entalpie min. množství vzduchu	kJ/kg
I_u	Užitečné teplo uvolněné v ohništi	kJ/kg
I_{vz}	Entalpie vzduchu	kJ/kg
k	Součinitel prostupu tepla	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$
k_k	Součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi	$1/\text{m}\cdot\text{MPa}$
$k\cdot p\cdot s$	Optická hustota	-
$k_{sp}\cdot r_{sp}$	Součinitel zeslabení sálání tříatomových prvků	$1/\text{m}\cdot\text{MPa}$
M	Součinitel M	-
M_{Cl}	Molární hmotnost chlóru	kg/mol
M_{pal}	Množství spáleného paliva	kg/s

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

M_{pp}	Množství přehřáté páry	kg/s
M_{pv}	Množství skutečně spáleného paliva	kg/s
M_S	Molární hmotnost síry	kg/mol
μ	Koncentrace popílku ve spalinách	g/m ³
N^{daf}	Obsah dusíku v hořlavíně	%
N^r	Obsah dusíku v původním stavu	%
n_{sm}	Počet smyček teplosměnných ploch	-
n_{tr}	Počet trubek	-
n_h	Počet hadů teplosměnných ploch	-
O_{Ar}	Objem argonu ve spalinách	Nm ³ /kg
O_{CO2}	Objem CO ₂ ve spalinách	Nm ³ /kg
O^{daf}	Obsah oxidu v hořlavíně	%
O_{N2}	Objem N ₂ ve spalinách	Nm ³ /kg
O_{O2min}	Min objem kyslíku potřebný ke spalování	Nm ³ /kg
O^r	Obsah oxidu v původním stavu	%
O^S_{H2O}	Objem vodní páry v min objemu vlhkých spalin	Nm ³ /kg
O_{SO2}	Objem SO ₂ ve spalinách	Nm ³ /kg
$O_{sp} \cdot C$	Střední celkové měrné teplo spalin	kJ/kg·K
O_{SSmin}	Minimální objem suchých spalin	Nm ³ /kg
O_{SV}	Objem vlhkých spalin při spalování	Nm ³ /kg
O_{SP}	Objem spalin protékající danou částí kotle	Nm ³ /kg
O_{SVmin}	Minimální objem vlhkých spalin	Nm ³ /kg
O^V_{H2O}	Objem vodní páry v objemu vl. vzduchu	Nm ³ /kg
O_{VSmin}	Min. objem suchého vzduchu	Nm ³ /kg
O_{VV}	Skutečný objem vlhkého vzduchu	Nm ³ /kg
O_{VVmin}	Min. objem vlhkého vzduchu	Nm ³ /kg
Pr	Prandtlovo číslo	-
Q_{celk}	Celkové potřebné teplo	kW
Q_{EKO}	Tepelný výkon ohříváku vody	kW
Q_i^r	Výhřevnost paliva	kJ/kg
Q_{P1}	Tepelný výkon přehříváku P1	kW
Q_{P2}	Tepelný výkon přehříváku P2	kW
Q_{P3}	Tepelný výkon přehříváku P3	kW
Q_p^p	Teplo přivedené do kotle	kJ/kg
Q_{RC}	Ztrátové teplo	kW
q_s	Plošné tepelné zatížení roštu	kW/m ²
Q_{vyp}	Tepelný výkon výparníku	kW
Q_{vz}	Teplo přivedené do kotle se vzduchem	kJ/kg
Q_{zt}	Tepelný výkon závěsných trubek	kW
R	Plocha hořící vrstvy paliva na roštu	m ²
s	Účinná tloušťka sálové vrstvy	m
S	Teplosměnná plocha dané části kotle	m ²
S^{daf}	Obsah síry v hořlavíně	%
S^r	Obsah síry v původním stavu	%
t_a	Adiabatická teplota v ohništi	°C

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

t_i	Teplota v dané části kotle	°C
t_{in}	Teplota na vstupu	°C
t_{out}	Teplota na výstupu	°C
t_{ok}	Zvolená teplota na konci ohniště	°C
t_{sp}	Doba setrvání spalin v ohništi	s
$t_{stř}$	Střední teplota spalin	°C
T_z	Teplota zaneseného povrchu	K
V_o	Aktivní ohejm dané části kotle	m ³
W^r	Vlhkost paliva v původním stavu	%
w_{sp}	Rychlost spalin v dané části	m/s
x	Úhlový součinitel	-
X_i	Procentuální vyjádření popele v dané části kotle	%
Z_{CO}	Ztráta chemickým nedopalem	%
Z_f	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	%
Z_K	Komínová ztráta	%
Z_C	Ztráta mechanickým nedopalem	%
Z_{SO}	Ztráta sdílením tepla do okolí	%
α	Součinitel přebytku vzduchu	-
α_1	Celkový součinitel přestupu tepla	W/m ² ·K
α_k	Součinitel přestupu tepla konvekcí	W/m ² ·K
α_s	Součinitel přestupu tepla sáláním	W/m ² ·K
Δ	Odchylka tepelné bilance	-
Δt	Střední teplotní logaritmický spád	°C
Δp	Tlaková ztráta	MPa
ε	Součinitel zanesení dané plochy	m ² ·K/W
ξ	Součinitel tlakové ztráty	-
η_k	Tepelná účinnost kotle	%
λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/m·K
ν	Součinitel kinematické viskozity	m ² /s
σ_1	Poměrná příčná rozeč	-
σ_2	Poměrná podélná rozeč	-
ϕ	Součinitel uchování tepla	-
ψ	Součinitele tepelné efektivity stěn	-

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H**20. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK**

Obrázek 1 Technologický proces spalovny SAKO Brno [3].	12
Obrázek 2 Úprava RDF [7]	14
Obrázek 3 I-t diagram vzduchu a spalin pro různé hodnoty přebytku vzduchu α .	22
Obrázek 4 Korozní diagram	28
Obrázek 5 Flingerův diagram.	28
Obrázek 6 Spalovací komora	29
Obrázek 7 Konstrukční provedení mříže.	30
Obrázek 8 Schéma k bilanční rovnici regulačního vstříku 1 napájecí vody	39
Obrázek 9 Schéma k bilanční rovnici regulačního vstříku 2 napájecí vody	40
Obrázek 10 Pilový diagram.	45
Obrázek 11 Teplotní průběh spalin a pracovního média v oblasti mříže	46
Obrázek 12 Rozměry II. Tahu.	52
Obrázek 13 Teplotní průběh spalin a pracovního média ve II. Tahu	53
Obrázek 14 Rozměry III. tahu.	58
Obrázek 15 Rozměry obratové komory	58
Obrázek 16 Teplotní průběh spalin a pracovního média v obratové komoře.	59
Obrázek 17 Tepelné spády v úseku 1	64
Obrázek 18 Konstrukční řešení přehříváku P3	69
Obrázek 19 Rozměry přehříváku P3	69
Obrázek 20 Tepelné spády v úseku 2	79
Obrázek 21 Konstrukční řešení přehříváku P2	84
Obrázek 22 Rozměry přehříváku P2	84
Obrázek 23 Tepelné spády v úseku 3	94
Obrázek 24 Konstrukční řešení přehříváku P1	99
Obrázek 25 Rozměry přehříváku P1	99
Obrázek 26 Rozměry IV. A V. tahu	109
Obrázek 27 Teplotní průběh spalin a pracovního média ve IV. A V. tahu	110
Obrázek 28 Konstrukční řešení ohříváku vody	111
Obrázek 29 Rozměry ohříváku vody	111
Obrázek 30 Korozní diagram (2)	118
Obrázek 31 Flingernův diagram v oblasti přehříváků	119
Obrázek 32 Schema aerodynamického výpočtu kotle	134
Tabulka 1 Porovnání vybraných vlastností SKO a RDF (hodnoty jsou pouze orientační)[4,5]	13
Tabulka 2 Měrné entalpie jednotlivých složek spalin a suchého vzduchu v závislosti na teplotě	20
Tabulka 3 Hodnoty měrných entalpií spalin a vzduchu v závislosti na teplotě	21
Tabulka 4 Souhrn vypočtených hodnot pro tepelnou bilanci kotle	26
Tabulka 5 Rozměry spalovací komory	29
Tabulka 6 Souhrn vypočtených hodnot pro návrh ohniště a mříže	37
Tabulka 7 Tlakové ztráty jednotlivých výhřevných ploch	37
Tabulka 8 Vstupní a výstupní parametry přehříváku P3	38
Tabulka 9 Vstupní a výstupní parametry přehříváku P2	40
Tabulka 10 Vstupní a výstupní parametry přehříváku P1	41

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Tabulka 11 Vstupní a výstupní parametry závěsných trubek.....	42
Tabulka 12 Vstupní a výstupní parametry výparníku	43
Tabulka 13 Vstupní a výstupní parametry ekonomizéru.....	44
Tabulka 14 Geometrické parametry mříže.....	46
Tabulka 15 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu (mříž)	47
Tabulka 16 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu ve II. Tahu.....	54
Tabulka 17 Rozměry II. Tahu	55
Tabulka 18 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu v obratové komoře	59
Tabulka 19 Rozměry obratové komory.....	61
Tabulka 20 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu v úseku 1	64
Tabulka 21 Geometrické parametry přehříváku P3	70
Tabulka 22 Parametry páry přehříváku P3.....	70
Tabulka 23 Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v P3	71
Tabulka 24 Geometrické parametry závěsných trubek (úsek 1)	75
Tabulka 25 Parametry páry v závěsných trubkách (úsek 1).....	75
Tabulka 26 Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v závěsných trubkách (úsek 1).....	75
Tabulka 27 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu v úseku 2	80
Tabulka 28 Geometrické parametry přehříváku P2	85
Tabulka 29 Parametry páry přehříváku P2.....	85
Tabulka 30 Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v P2	85
Tabulka 31 Geometrické parametry závěsných trubek (úsek 2)	90
Tabulka 32 Parametry páry v závěsných trubkách (úsek 2).....	90
Tabulka 33 Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v závěsných trubkách (úsek 2).....	90
Tabulka 34 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu (úsek 3)	95
Tabulka 35 Geometrické parametry přehříváku P1	100
Tabulka 36 Parametry páry přehříváku P1	100
Tabulka 37 Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v P1	100
Tabulka 38 Geometrické parametry závěsných trubek (úsek 3)	105
Tabulka 39 Parametry páry v závěsných trubkách (úsek 3).....	105
Tabulka 40 Vlastnosti páry pro střední teplotu a tlak páry v závěsných trubkách (úsek 3).....	105
Tabulka 41 Vlastnosti spalin pro střední teplotu proudu ve IV. A V. tahu.....	111
Tabulka 42 Geometrické parametry ohříváku vody.....	112
Tabulka 43 Parametry vody ohříváku vody	112
Tabulka 44 Parametry bubnu	119
Tabulka 45 Parametry zavodňovacích a převáděcích potrubí.....	120
Tabulka 46 Parametry přehříváku P3 pro výpočet tlakové ztráty (hydraulický výpočet).....	122
Tabulka 47 Parametry přehříváku P2 pro výpočet tlakové ztráty (hydraulický výpočet).....	124
Tabulka 48 Parametry přehříváku P1 pro výpočet tlakové ztráty (hydraulický výpočet).....	127
Tabulka 49 Parametry ohříváku vody pro výpočet tlakové ztráty (hydraulický výpočet)	129
Tabulka 50 Parametry přehříváku P1 pro výpočet tlakové ztráty (hydraulický výpočet).....	131
Tabulka 51 Porovnání skutečných a zvolených hodnot tlakových ztrát (hydraulický výpočet).....	133
Tabulka 52 Parametry mříže pro výpočet tlakové ztráty (aerodynamický výpočet).....	135
Tabulka 53 Parametry II.tahu pro výpočet tlakové ztráty (aerodynamický výpočet)	136
Tabulka 54 Opravné součinitele pro výpočet místního odporu při změně směru proudu na výstupu z mříže [10].....	136

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ TŘÍDĚNÉHO ODPADU 55,5 T/H

Tabulka 55 Opravné součinitele pro výpočet místního odporu při změně směru proudu na výstupu z II. Tahu [10].....	138
Tabulka 56 Parametry vratné komory pro výpočet tlakové ztráty (aerodynamický výpočet) ..	139
Tabulka 57 Opravné součinitele pro výpočet místního odporu při změně směru proudu ve vratné komoře [10].....	139
Tabulka 58 Parametry přehříváků P3 pro výpočet tlakové ztráty (aerodynamický výpočet) ...	140
Tabulka 59 Parametry přehříváků P3 pro výpočet tlakové ztráty (aerodynamický výpočet) ...	140
Tabulka 60 Parametry přehříváků P3 pro výpočet tlakové ztráty (aerodynamický výpočet) ...	141
Tabulka 61 Hodnoty pro výpočet vztlaku ve III. Tahu	142
Tabulka 62 Parametry ohříváků vody EKO pro výpočet tlakové ztráty ve IV. Tahu (aerodynamický výpočet).....	143
Tabulka 63 Hodnoty pro výpočet vztlaku ve IV. Tahu	143
Tabulka 64 Parametry ohříváků vody EKO pro výpočet tlakové ztráty ve V. Tahu (aerodynamický výpočet).....	145
Tabulka 65 Hodnoty pro výpočet vztlaku ve V. Tahu	145
Tabulka 66 Parametry komína	147
Tabulka 67 Součinitele tlakové ztráty v komíně	149

21.SEZNAM PŘÍLOH

Výkres: PŘÍLOHA A