



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

PLYNOFIKACE OLEJOVÉHO KOTLE V CUKROVARU 65 T/H, 3,8 MPA, 450 °C

OIL BOILERS GASIFICATION IN SUGAR REFINERY 65 T/H, 3,8 MPA, 450 °C

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. KAREL ŠTUKAVEC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MAREK BALÁŠ, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Karel Štukavec

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

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

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

Plynofikace olejového kotle v cukrovaru 65 t/h, 3,8 MPa, 450 °C

v anglickém jazyce:

Oil boilers gasification in sugar refinery 65 t/h, 3,8 MPa, 450 °C

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stávající parní kotel 65 t / h, 3.8 MPa, 450 ° C spalující olej s přirozenou cirkulací navrhnete na čistě plynový provoz při zachování tepelného výkonu a parametrů páry.

Proved'te tepelný přepočet pro provoz na zemní plyn. Pro budoucí provoz navrhnete úpravy kotle a výhřevných ploch s ohledem na dodržení parametrů páry, materiál přehříváku a ekonomickou stránku rekonstrukce.

Pro provedení výpočtu obdržíte potřebné výkresy, konstrukční údaje a zadání palivové základny.

Cíle diplomové práce:

Proved'te tepelný přepočet pro provoz na zemní plyn.

Pro budoucí provoz navrhnete úpravy kotle a výhřevných ploch.

Navrhnete opatření pro dodržení emisního limitu $\text{NO}_x=100 \text{ mg/Nm}^3$.

Seznam odborné literatury:

Černý, V.: Parní kotle, SNTL 1983

Budaj: Tepelný výpočet kotle, VUT Brno 1983

Baláš, M.: Kotle a výměníky tepla, Brno 2009, ISBN 978-80-214-3955-9

Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, ČVUT v Praze, 2007, ISBN 978-80-01-03757-7

Vedoucí diplomové práce: Ing. Marek Baláš, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně dne 22. 11. 2013



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

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá plynofikací stávajícího olejového kotle. V první části práce popisuje stávajícího kotel. V další části práce následuje plynofikace s ohledem na dodržení limitu NO_x a přepočet kotle pro provoz na zemní plyn.

Abstract

This masters thesis deals with the gasification of current oil boiler. The first part of the thesis describes the existing boiler. The next part follows gasification with respect for comply with the limits of NO_x and recalculation of boiler for operation with the natural gas.

Klíčová slova

Plynofikace, olejový kotel, tepelný výpočet

Key words

Gasification, oil boiler, thermal calculation

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně za pomoci vedoucího práce Ing. Marka Baláše, Ph.D. a konzultanta Ing. Ondřeje Nechvátala, literatury a uvedených zdrojů v závěru práce.

V Brně dne2015

.....
Karel Štukavec

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Marku Balášovi, Ph.D a konzultantovi panu Ing. Ondřeji Nechvátalovi za rady a konzultace.

Obsah

1	Úvod	14 -
2	Stávající stav.....	15 -
2.1	Tepelná účinnost stávajícího kotle (mazut) a množství paliva.....	16 -
2.2	Pilový diagram stávajícího stavu (mazut)	19 -
3	Plynofikace	20 -
4	Objemy a entalpie vzduchu a spalin	21 -
4.1	Stechiometrie.....	21 -
4.2	Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalin	22 -
4.3	Entalpie vzduchu a produktů spalování.....	23 -
5	Tepelná bilance kotle.....	27 -
5.1	Teplo přivedené do kotle	27 -
5.2	Ztráty kotle a tepelná účinnost	27 -
5.3	Výrobní teplo páry a množství paliva	28 -
6	Výpočet spalovací komory	29 -
6.1	Rozměry spalovací komory.....	29 -
6.2	Tepelný výpočet ohniště.....	31 -
6.2.1	Teplota spalin na výstupu z ohniště	31 -
6.2.2	Součinitel M.....	31 -
6.2.3	Boltzmannovo číslo.....	32 -
6.2.4	Stupeň černosti ohniště	33 -
7	Bilanční výpočet teplosměnných ploch ze strany média	35 -
7.1	Tlak napájecí vody	35 -
7.2	Dílčí výkony jednotlivých ploch	35 -
7.2.1	Eko1	35 -
7.2.2	Eko2	36 -
7.2.3	Výparník.....	36 -
7.2.4	Přehřívák PP1+ZTR.....	36 -
7.2.5	Přehřívák PP2 +MŘÍŽ PP2	37 -
7.2.6	Součet výkonů.....	37 -
7.3	Pilový diagram	38 -
8	Mříž.....	38 -
8.1	Bilanční teplo spalin.....	39 -
8.2	Součinitel prostupu tepla.....	39 -
8.3	Střední logaritmický teplotní spád	42 -

8.4	Rovnice sdílení tepla.....	- 42 -
8.5	Celková bilance.....	- 42 -
9	VRATNÁ KOMORA.....	- 43 -
9.1	Přehříváková Mříž PP2.....	- 43 -
9.1.1	Bilanční teplo spalin.....	- 44 -
9.1.2	Rovnice tepelné bilance.....	- 44 -
9.1.3	Součinitel prostupu tepla.....	- 45 -
9.1.4	Střední logaritmický teplotní spád.....	- 48 -
9.1.5	Rovnice sdílení tepla.....	- 48 -
9.2	Část Závěsných trubek.....	- 48 -
9.2.1	Rovnice tepelné bilance.....	- 49 -
9.2.2	Součinitel přestupu tepla sáláním.....	- 49 -
9.2.3	Střední logaritmický teplotní spád.....	- 49 -
9.2.4	Rovnice sdílení tepla.....	- 50 -
9.2.5	Celková bilance.....	- 50 -
10	Přehříváku PP2+ZTR.....	- 50 -
10.1	Přehříváku PP2.....	- 51 -
10.1.1	Bilanční teplo spalin.....	- 51 -
10.1.2	Rovnice tepelné bilance.....	- 52 -
10.1.3	Součinitel prostupu tepla.....	- 53 -
10.1.4	Střední logaritmický teplotní spád.....	- 56 -
10.1.5	Rovnice sdílení tepla.....	- 56 -
10.2	Část Závěsných trubek.....	- 56 -
10.2.1	Rovnice tepelné bilance.....	- 57 -
10.2.2	Součinitel prostupu tepla.....	- 57 -
10.2.3	Střední logaritmický teplotní spád.....	- 59 -
10.2.4	Rovnice sdílení tepla.....	- 60 -
10.2.5	Celková bilance.....	- 60 -
11	Přehříváku PP1+ZTR.....	- 60 -
11.1	Přehříváku PP1.....	- 60 -
11.1.1	Bilanční teplo spalin.....	- 61 -
11.1.2	Rovnice tepelné bilance.....	- 61 -
11.1.3	Součinitel prostupu tepla.....	- 62 -
11.1.4	Střední logaritmický teplotní spád.....	- 65 -
11.1.5	Rovnice sdílení tepla.....	- 66 -
11.2	Část Závěsných trubek.....	- 66 -

11.2.1	Rovnice tepelné bilance	- 66 -
11.2.2	Součinitel prostupu tepla.....	- 67 -
11.2.3	Střední logaritmický teplotní spád	- 69 -
11.2.4	Rovnice sdílení tepla	- 69 -
11.2.5	Celková bilance	- 69 -
12	Dodatkový výparník	- 69 -
12.1	Bilanční teplo spalin	- 71 -
12.2	Součinitel prostupu tepla	- 72 -
12.3	Střední logaritmický teplotní spád	- 75 -
12.4	Rovnice sdílení tepla	- 75 -
12.5	Celková bilance	- 75 -
13	Eko2	- 75 -
13.1	Bilanční teplo spalin	- 76 -
13.2	Rovnice tepelné bilance.....	- 76 -
13.3	Součinitel prostupu tepla	- 78 -
13.4	Střední logaritmický teplotní spád	- 80 -
13.5	Rovnice sdílení tepla	- 80 -
13.6	Celková bilance	- 80 -
14	Eko1	- 81 -
14.1	Bilanční teplo spalin	- 81 -
14.2	Rovnice tepelné bilance.....	- 81 -
14.3	Součinitel prostupu tepla	- 83 -
14.4	Střední logaritmický teplotní spád	- 85 -
14.5	Rovnice sdílení tepla	- 85 -
14.6	Celková bilance	- 86 -
15	OVZ 2.....	- 86 -
15.1	Rovnice tepelné bilance.....	- 87 -
15.2	Součinitel prostupu tepla	- 88 -
15.3	Teplotní spád	- 91 -
15.4	Rovnice sdílení tepla	- 91 -
15.5	Celková bilance	- 91 -
16	OVZ 1.....	- 92 -
16.1	Rovnice tepelné bilance.....	- 92 -
16.2	Součinitel prostupu tepla	- 94 -
16.3	Teplotní spád	- 96 -
16.4	Rovnice sdílení tepla	- 96 -

16.5	Celková bilance.....	- 96 -
17	Celková Bilance kotle na straně spalin.....	- 96 -
18	Závěr.....	- 97 -
19	Seznam použité literatury.....	- 98 -
20	Seznam obrázků	- 98 -
21	Seznam tabulek.....	- 98 -
22	Seznam použitých symbolů	- 99 -
23	Seznam použitých zkratk.....	- 102 -
24	Seznam příloh	- 102 -

1 Úvod

V dnešní energeticky náročné době, kdy nároky člověka na spotřebu energií narůstají a tím narůstá i znečištění životního prostředí, lidstvo postupně začíná klást důraz na snížení znečištění životního prostředí. S tím souvisí i zavedení limitů průmyslových emisí 100 mg/Nm^3

Úkolem diplomové práce je plynofikace olejového kotle v cukrovaru s ohledem na ekonomickou stránku rekonstrukce a provést tepelný přepočet pro provoz na zemní plyn při zachování tepelného výkonu a parametrů páry a navrhnout opatření pro dodržení limitu $NO_x = 100 \text{ mg/Nm}^3$.

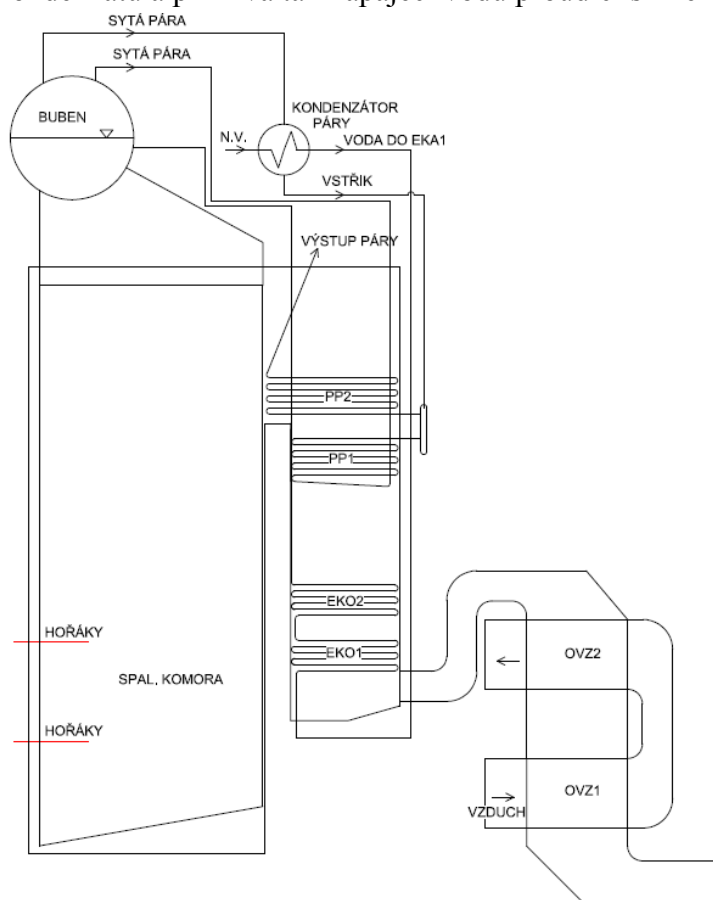
První část práce seznamuje se stávajícím kotlem a s výsledky kontrolního tepelného výpočtu stávajícího kotle. Druhá část práce obsahuje kontrolní propočet kotle po plynofikaci a popisuje problémy, které nastaly a byly řešeny důsledkem změny paliva na plyn.

2 Stávající stav

Stávající olejový kotel, kde palivem je těžký olej mazut je starší konstrukce. Navrhnut byl v době, kdy mazut obsahoval vysoký obsah síry. Z toho důvodu byl kotel navrhnut tak, aby se teplota spalin za kotlem pohybovala kolem 160 stupňů celsia. Vysoký obsah síry v palivu způsobuje vyšší rosný bod spalin, což způsobuje nízkoteplotní korozi ze strany spalin. Nízkoteplotní koroze vzniká při teplotě spalin na stěnách spalinovodu nižší, než je rosný bod spalin, kdy na stěnách kondenzuje vodní pára a kyselina sírová. [3]

Stávající kotel je tvořen spalovací komorou a druhým tahem. Ve spalovací komoře jsou umístěny čtyři mazutové hořáky a výparník. Spaliny ze spalovací komory vystupují skrze rozvolněnou výparníkovou mříž a vstupují do druhého tahu. Za mříží spaliny proudí vratnou komorou. Ta je tvořena na vstupu do vratné komory mříží trubek druhého přehříváku, pro výstup páry z kotle a částí závěsných trubek. Dále postupují skrze dva stupně přehříváku, dva stupně ekonomizéru a dva stupně trubkového ohříváku vzduchu.

Voda pro kotel se využívá voda z úpravy řepy v cukrovaru, která po úpravě stále obsahuje příměsi ve vodě. Dle normy ČSN EN 12 952, tato voda nemůže být použita pro vstřík k chlazení páry v mezistupni přehříváku. Z toho důvodu se pára zastříkuje kondenzátem, vyrobeným v kondenzátoru páry, kdy se z bubnu odvádí část páry potřebné k výrobě kondenzátu a přehřívá tak napájecí vodu proudící skrze kondenzátor.



Obr.:2-1 Schéma stávajícího olejového kotle (mazut)

2.1 Tepelná účinnost stávajícího kotle (mazut) a množství paliva

Parametry Paliva (mazut)

$$Q_i^r = 40452,86 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$t_p = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tab.:2-1 Složení paliva (mazut)

W_t^r [%]	H_2^r [%]	C^r [%]	N_2^r [%]	O_2^r [%]	A^r [%]	S^r [%]	S_{prch}^r [%]
0,5	11,22	84,59	0,35	1,133	0,067	2,14	1,07

Teplo přivedené do kotle

$$Q_P^P = Q_i^r + i_p + Q_{VZV} + Q_{pr} \quad (\text{Rov.: 2.1-1})$$

$$Q_P^P = 40452,86 + 292,6 + 0 + 98,478 = 40843,948 \text{ kJ/kg}$$

Fyzické teplo paliva

$$i_p = c_p \cdot t_p = 2,09 \cdot 140 = 292,60 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Rov.: 2.1-2})$$

Měrné teplo paliva

$$c_p = 1,74 + 0,0025 \cdot t_p \quad (\text{Rov.: 2.1-3})$$

$$c_p = 1,74 + 0,0025 \cdot 140 = 2,09 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

Teplo přivedené do kotle při parním rozprašování mazutu

$$Q_{pr} = G_{pr} \cdot (i_{pr} - 2500) \quad (\text{Rov.: 2.1-4})$$

$$Q_{pr} = 0,3 \cdot (2828,26 - 2500) = 98,478 \text{ kJ/kg}$$

G_{pr} – množství páry na rozprašování [1]

i_{pr} – entalpie páry na rozprašování při 1 Mpa ; 200°C [3]

Ztráty kotle

Ztráta hořlavinou ve spalinách

-pro topné oleje $Z_{CO} = 0,5 \%$ [1]

Ztráta sdílením tepla do okolí

-hliníkový nátěr oplechování při $M_{PP} = 18,056 \text{ kg/s}$ je $Z_{SO} = 0,8 \%$ [1]

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích $Z_C = 0$

Ztráta citelným teplem spalin

$$Z_K = (100 - Z_C) \cdot \frac{I_{SP} - I_{VZ}}{Q_P^P} \quad (\text{Rov.: 2.1-5})$$

$$Z_K = (100 - 0) \cdot \frac{3287.295 - 468.702}{40843,948} = 6.903\%$$

I_{VZ} – entalpie vzduchu při $t = 30^\circ\text{C}$ a přebytku vzduchu $\alpha_k = 1.13$

I_{SP} – entalpie spalin za kotlem $t = 185.5^\circ\text{C}$ a přebytku vzduchu $\alpha_k = 1.13$

Tepelná účinnost

$$\eta_K = 100 - \sum z = 100 - Z_{CO} - Z_{SO} - Z_K \quad (\text{Rov.: 2.1-6})$$

$$\eta_K = 100 - \sum z = 100 - 0,5 - 0,8 - 6.903 = 91.797\%$$

Množství paliva

$$M_P = \frac{Q_V}{Q_P^P \cdot \frac{\eta_K}{100}} \quad (\text{Rov.: 2.1-7})$$

$$M_P = \frac{51044.68}{42208,485 \cdot \frac{93,515}{100}} = 1.362 \text{ kg/s} \quad (\text{Rov.: 2.1-8})$$

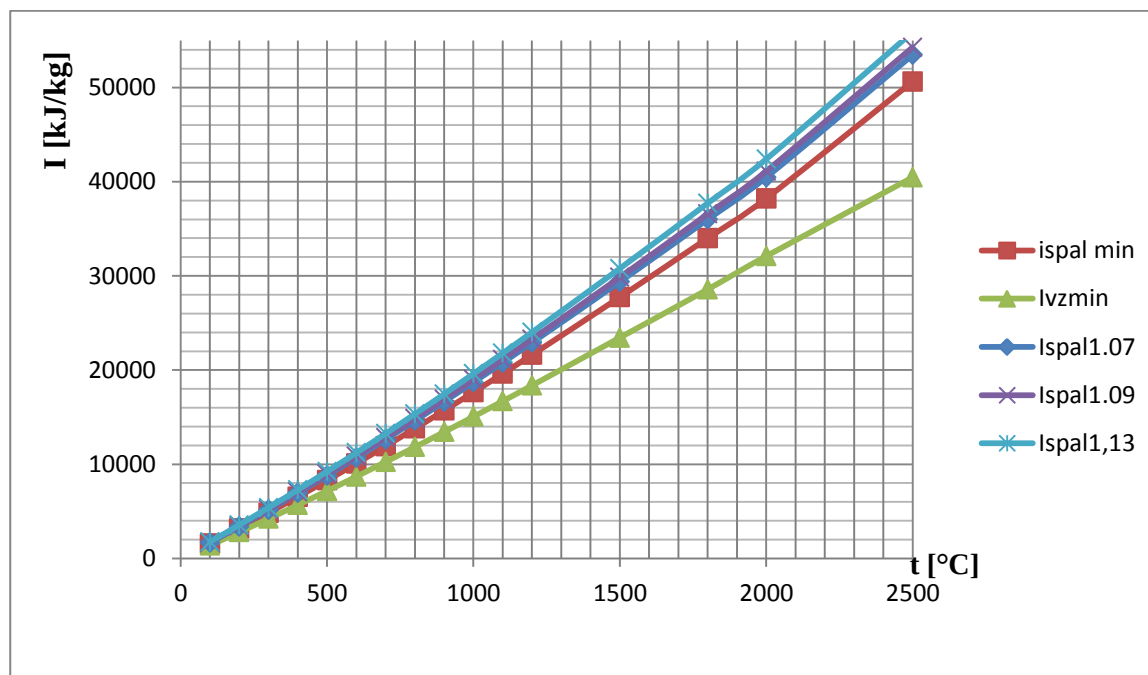
Výrobní teplo páry

$$Q_V = M_{PP} \cdot (i_{PP} - i_{NV}) + M_{MP} \cdot (\Delta i) + M_{OP} \cdot (\Delta i) + M_O \cdot (\Delta i) \quad (\text{Rov.: 2.1-9})$$

$$Q_V = 18,056 \cdot (3333,93 - 506.84) + 0 + 0 + 0 = 51044.68 \text{ kW}$$

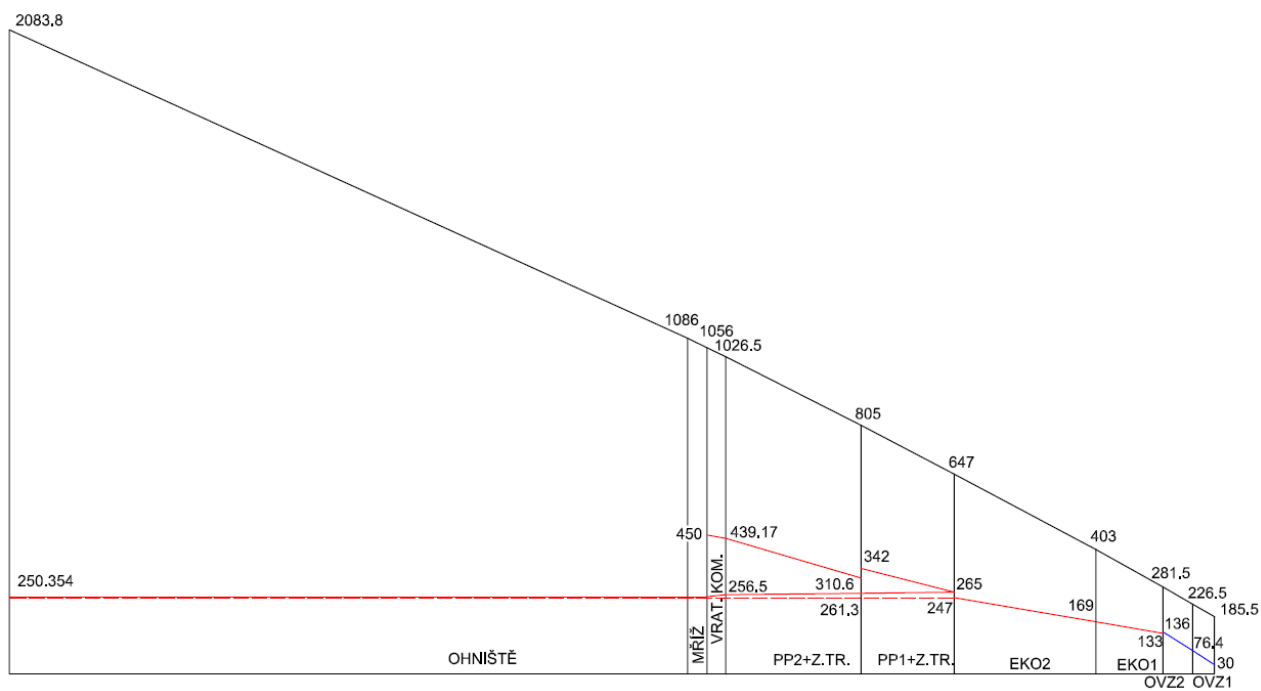
t [°C]	I _{SPmin} [kJ/kg]	I _{VZmin} [kJ/kg]	I _{SP}		
			$\alpha_0=1,07$ [kJ/kg]	$\alpha_0=1,09$ [kJ/kg]	$\alpha_0=1,13$ [kJ/kg]
100	1572,484	1386,792	1669,559	1697,2958	1752,767
200	3185,064	2788,247	3380,242	3436,0071	3547,53
300	4841,025	4216,936	5136,211	5220,5499	5389,227
400	6542,754	5672,859	6939,854	7053,3118	7280,226
500	8290,013	7164,393	8791,521	8934,8092	9221,385
600	10083,473	8691,54	10691,813	10865,712	11213,373
700	11918,371	10250,11	12635,88	12840,882	13250,886
800	13793,887	11823,344	14621,522	14857,989	15330,922
900	15702,333	13423,811	16641,999	16910,476	17447,428
1000	17650,996	15051,511	18704,602	19005,632	19607,692
1100	19621,772	16694,922	20790,417	21124,316	21792,112
1200	21621,862	18363,472	22907,305	23274,575	24009,113
1500	27732,042	23441,393	29372,939	29841,768	30779,423
1800	33996,222	28563,306	35995,654	36566,921	37709,452
2000	38223,056	32093,131	40469,575	41111,438	42395,163
2500	50627,027	40456,827	53459,004	54268,142	55886,414

Tab.:2.1-1 I-t tabulka vzduchu a produktu spalování (mazut)



Obr.:2.1-1 I-t diagram spalin (mazut)

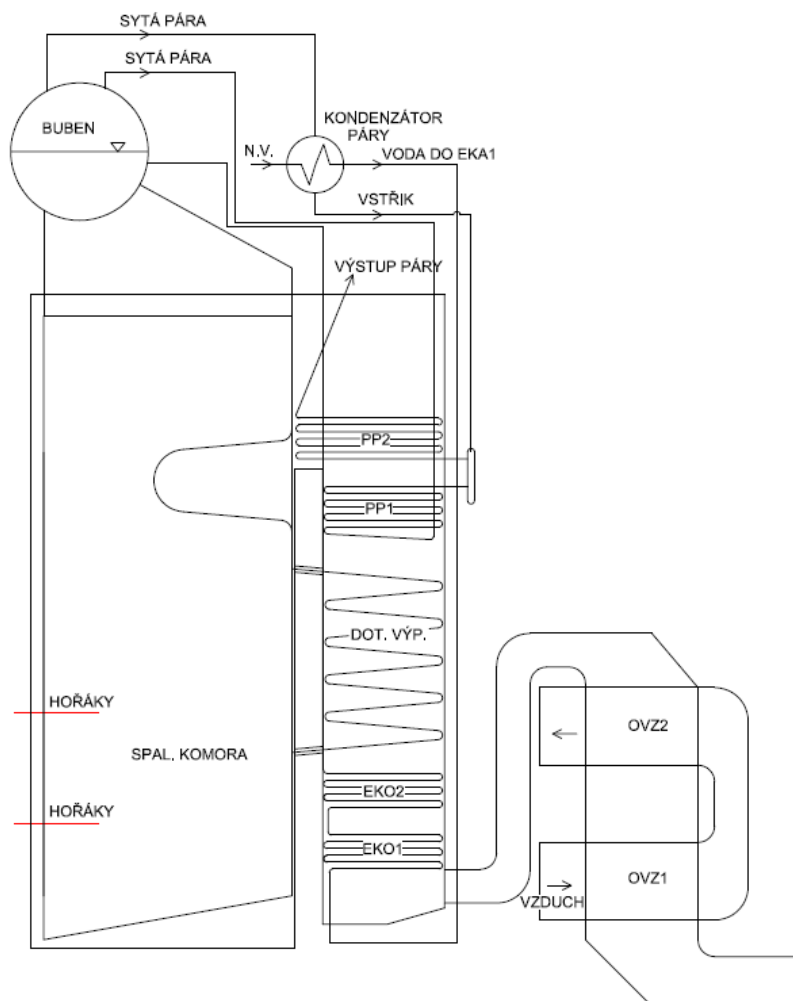
2.2 Pilový diagram stávajícího stavu (mazut)



Obr.:2.2-1 Pilový diagram stávajícího kotle (mazut)

3 Plynofikace

Plynofikací kotle se rozumí změna paliva z mazutu na plyn. Tuto změnu provázelo několik úprav. První z úprav, je výměna mazutových hořáků za nízkoemisní plynové hořáky a zavedení recirkulace spalin zpět do kotle k potlačení NO_x . Z důvodu vyšší teploty spalin na konci ohniště při spalování plynu oproti mazutu, došlo k úpravám spal. komory, druhého přehříváku a byla přidána teplosměnná plocha do druhého tahu. Ostatní plochy byly zachovány vzhledem k požadavkům, na ekonomickou stránku plynofikace.



Obr. 3-1: Schéma kotle po plynofikaci

4 Objemy a entalpie vzduchu a spalin

Palivem je zemní plyn. Složení je uvedeno v Tab. 2-1 Objemy a entalpie jsou vztaženy na 1kg paliva.

Parametry paliva (zemní plyn):

$$Q_i^r = 34300 \text{ kJ/kg}$$

Tab.:2-1 Složení zemního plynu

CH4 [%]	C2H6 [%]	C4H10 [%]	CO2 [%]	N2 [%]	C3H8 [%]
94.31	0.51	0.1	3.38	1.59	0.11

4.1 Stechiometrie

Minimální množství kyslíku ke spálení 1 m³ paliva

$$O_{O_2min} = 0.5 \cdot \frac{CO + H_2}{100} + 1.5 \frac{H_2S}{100} + \sum \left(x + \frac{y}{4} \right) \cdot \frac{C_x H_y}{100} - \frac{O_2}{100} \quad (\text{Rov.: 4.1-1})$$

$$O_{O_2min} = \left(1 + \frac{4}{4} \right) \cdot \frac{94.31}{100} + \left(2 + \frac{6}{4} \right) \cdot \frac{0.51}{100} + \left(3 + \frac{8}{4} \right) \cdot \frac{0.11}{100} + \left(4 + \frac{10}{4} \right) \cdot \frac{0.1}{100} - \frac{0}{100}$$

$$= 1.916 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 m³ paliva

$$O_{VZmin}^S = \frac{100}{21} \cdot O_{O_2min} = \frac{100}{21} \cdot 1.916 = 9.124 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 4.1-2})$$

Minimální množství vlhkého vzduchu ke spálení 1 m³ paliva

$$O_{VZmin}^V = f \cdot O_{VZmin}^S = 1.030 \cdot 9.124 = 9.398 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 4.1-3})$$

- při relativní vlhkosti $\phi = 0.7$ a teplotě vzduchu 30°C je $f = 1.03$

Množství jednotlivých složek ve spalinách po spálení 1 m³ paliva:

$$O_{CO_2} = 0.01 \cdot \left(CO + CO_2 + \sum x \cdot C_x H_y + 0.03 \cdot O_{VZmin}^S \right) \quad (\text{Rov.: 4.1-4})$$

$$= 0.01 \cdot (3.8 + 94.31 + 2 \cdot 0.75 + 2 \cdot 0.51 + 3 \cdot 0.11 + 4 \cdot 0.1 + 0.03 \cdot 9.12403)$$

$$= 0.997 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$O_{N_2} = 0.01 \cdot (N_2 + 78.05 \cdot O_{VZmin}^S) \quad (\text{Rov.: 4.1-5})$$

$$O_{N_2} = 0.01 \cdot (1.590 + 78.05 \cdot 9.124) = 7.137 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$O_{Ar} = 0.0092 \cdot O_{VZmin}^S = 0.0092 \cdot 9.124 = 0.084 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 4.1-6})$$

Minimální množství suchých spalin po spálení 1 m³ paliva:

$$O_{SPmin}^S = O_{CO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} = 0.997 + 7.137 + 0.084 = 8.218 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 4.1-7})$$

Minimální objem vodní páry ve spalinách po spálení 1 m³ paliva

$$O_{H_2Omin} = 0.01 \cdot \left(\sum \frac{y}{2} \cdot C_x H_y + H_2 + H_2 S \right) + (f - 1) \cdot O_{VZmin}^S \quad (\text{Rov.: 4.1-8})$$

$$= 0,01 \cdot \left(\frac{4}{2} \cdot 94.31 + \frac{6}{2} \cdot 0.51 + \frac{8}{2} \cdot 0.11 + \frac{8}{2} \cdot 0.1 \right) + (1.03 - 1) \cdot 9.124 = 2.185 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Minimální množství vlhkých spalin po spálení 1 m³ paliva:

$$O_{SPmin}^V = O_{SPmin}^S + O_{H_2Omin} = 8.21 + 2.185 = 10.403 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 4.1-9})$$

4.2 Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalin

Pro dokonalé vyhoření paliva při spalování, se v praxi volí větší množství spalovacího vzduchu, než je jeho teoretické minimální množství. Spaluje se proto s přebytkem vzduchu α , který se volí dle zkušeností. Pro snížení NOx byl přebytek volen $\alpha_o = 1,05$

Skutečné množství vzduchu

Součinitel β popisuje přísávání falešného vzduchu na trase spalin, který se v průběhu trasy navyšuje.

$$O_{VZ} = \beta \cdot O_{VZmin}^V = 1.05 \cdot 9.398 = 9.868 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 4.2-1})$$

Skutečné množství spalin po spálení 1 kg paliva při

$$O_{SP} = O_{SPmin}^V + (\alpha_o - 1) \cdot O_{VZmin}^V \quad (\text{Rov.: 4.2-2})$$

$$O_{SP} = 10.403 + (1.05 - 1) \cdot 9.398 = 10.873 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Skutečný objem vodní páry ve spalinách po spálení 1 m³ paliva

$$O_{H_2O} = O_{H_2Omin} + (f - 1) \cdot (\alpha_o - 1) \cdot O_{VZmin}^S \quad (\text{Rov.: 4.2-3})$$

$$O_{H_2O} = 2.185 + (1.03 - 1) \cdot (1.05 - 1) \cdot 9.124 = 2.198 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Objemové části tříatomových plynů

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{SP}} = \frac{0 + 0.997}{10.873} = 0.092 \quad (\text{Rov.: 4.2-4})$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{2.198}{10.873} = 0.202 \quad (\text{Rov.: 4.2-5})$$

Součet objemových částí tříatomových plynů

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0.092 + 0.202 = 0.294 \quad (\text{Rov.: 4.2-6})$$

4.3 Entalpie vzduchu a produktů spalování

Poměrové složky

$$p_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SP}} = \frac{0.997}{10.873} = 0.092 \quad (\text{Rov.: 4.3-1})$$

$$p_{N_2} = \frac{O_{N_2}}{O_{SP}} = \frac{7.137}{10.873} = 0.656 \quad (\text{Rov.: 4.3-2})$$

$$p_{Ar} = \frac{A_r}{O_{SP}} = \frac{0.084}{10.873} = 0.0077 \quad (\text{Rov.: 4.3-3})$$

$$p_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{2.185}{10.873} = 0.201 \quad (\text{Rov.: 4.3-4})$$

$$p_{VZ} = \frac{O_{VZmin} \cdot (\alpha_o - 1)}{O_{SP}} = \frac{9.398 \cdot (1.05 - 1)}{10.873} = 0.043 \quad (\text{Rov.: 4.3-5})$$

Entalpie minimálního množství vzduchu

$$I_{VZmin} = O_{VZmin}^S \cdot (c \cdot t)_{VZ} \quad (\text{Rov.: 4.3-6})$$

Entalpie minimálního množství spalin

$$I_{SPmin} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2Omin} \cdot i_{H_2O} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad (\text{Rov.: 4.3-7})$$

Teplota	Entalpie složek spalín					Měrné teplo
t [°C]	i _{CO2} [kJ/m ³]	i _{SO2} [kJ/m ³]	i _{N2} [kJ/m ³]	i _{Ar} [kJ/m ³]	i _{H2O} [kJ/m ³]	c [kJ/m ³ K]
100	170	191,2	129,5	93,07	150,6	1,345
200	357,5	394,1	259,9	186	304,5	1,352
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	1,363
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	1,376
500	994,4	1070	664	464,7	794,5	1,39
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	1,404
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	1,42
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1,434
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1,449
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1,461
1100	2458	2540	1544	1020	1925	1,474
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1,486
1500	3503	3587	2166	1393	2779	1,51
1800	4305	4363	2643	1742	3458	1,539
2000	4844	4890	2965	1857	3925	1,559
2500	6204	6205	3778	2321	5132	1,591

Tab.:4.3-1 Entalpie složek spalín

Entalpie spalín

$$I_{SP} = I_{SPmin} + (\alpha_o - 1) \cdot I_{VZmin} \quad (\text{Rov.: 4.3-8})$$

Recirkulace

Recirkulace spalín je přivedení části objemu spalín na konci kotle, zpět do spalovací komory. Recirkulace je zavedena z důvodu snížení NOX. Objem spalín za kotlem závisí na koeficientu recirkulace r, který v mém případě byl volen 0.1=10%

Objem Recirkulovaných spalín

$$O_{SPRec} = r \cdot O_{SPod} = 0.1 \cdot 11.531 = 1.153 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 4.3-9})$$

Objem spalín odchozích

$$O_{SPod} = O_{SPmin}^V + (\alpha_k - 1) \cdot O_{VZmin}^V \quad (\text{Rov.: 4.3-10})$$

$$O_{SPod} = 10.403 + (1.12 - 1) \cdot 9.398 = 11.531 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Objem spalín s recirkulací

$$O_{SPsRec} = O_{SP} + O_{SPRec} = 10.873 + 1.153 = 12.026 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 4.3-11})$$

Poměrové objemy dílčích složek s recirkulací

$$O_{CO_2Rec} = O_{SP} \cdot p_{CO_2} + O_{SPod} \cdot p_{CO_2} \cdot r \quad (\text{Rov.: 4.3-12})$$

$$O_{CO_2Rec} = 10.873 \cdot 0.092 + 11.531 \cdot 0.092 \cdot 0.1 = 1.103 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 4.3-13})$$

$$p_{CO_2Rec} = \frac{O_{CO_2r}}{O_{SPsRec}} = \frac{1.103}{12.026} = 0.092 \quad (\text{Rov.: 4.3-14})$$

$$O_{N_2Rec} = O_{SP} \cdot p_{N_2} + O_{SPod} \cdot p_{N_2} \cdot r \quad (\text{Rov.: 4.3-15})$$

$$O_{N_2Rec} = 10.873 \cdot 0.656 + 11.531 \cdot 0.656 \cdot 0.1 = 7.894 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$p_{N_2Rec} = \frac{O_{N_2Rec}}{O_{SPsRec}} = \frac{7.894}{12.026} = 0.656 \quad (\text{Rov.: 4.3-16})$$

$$O_{ArRec} = O_{SP} \cdot p_{Ar} + O_{SPod} \cdot p_{Ar} \cdot r \quad (\text{Rov.: 4.3-17})$$

$$O_{ArRec} = 10.873 \cdot 0.0077 + 11.531 \cdot 0.0077 \cdot 0.1 = 0.093 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$p_{ArRec} = \frac{O_{ArRec}}{O_{SPsRec}} = \frac{0.093}{12.026} = 0.0077 \quad (\text{Rov.: 4.3-18})$$

$$O_{H_2ORec} = O_{SP} \cdot p_{H_2O} + O_{SPod} \cdot p_{H_2O} \cdot r \quad (\text{Rov.: 4.3-19})$$

$$O_{H_2ORec} = 10.873 \cdot 0.201 + 11.531 \cdot 0.201 \cdot 0.1 = 2.416 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$p_{H_2ORec} = \frac{O_{H_2ORec}}{O_{SPsRec}} = \frac{2.416}{12.026} = 0.201 \quad (\text{Rov.: 4.3-20})$$

$$O_{VZRec} = O_{VZmin} \cdot (\alpha_o - 1) + O_{VZmin} \cdot (\alpha_k - 1) \cdot r \quad (\text{Rov.: 4.3-21})$$

$$O_{VZRec} = 9.398 \cdot (1.05 - 1) + 9.398 \cdot (1.12 - 1) \cdot 0.1 = 0.583 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$p_{VZRec} = \frac{O_{VZRec}}{O_{SPsRec}} = \frac{0.583}{12.026} = 0.048 \quad (\text{Rov.: 4.3-22})$$

Entalpie recirkulovaných spalin

$$I_{SPRec} = p_{CO_2Rec} \cdot i_{CO_2} + p_{N_2Rec} \cdot i_{N_2} + p_{H_2ORec} \cdot i_{H_2O} + p_{ArRec} \cdot i_{Ar} + p_{VZRec} \cdot c \cdot t \quad (\text{Rov.: 4.3-23})$$

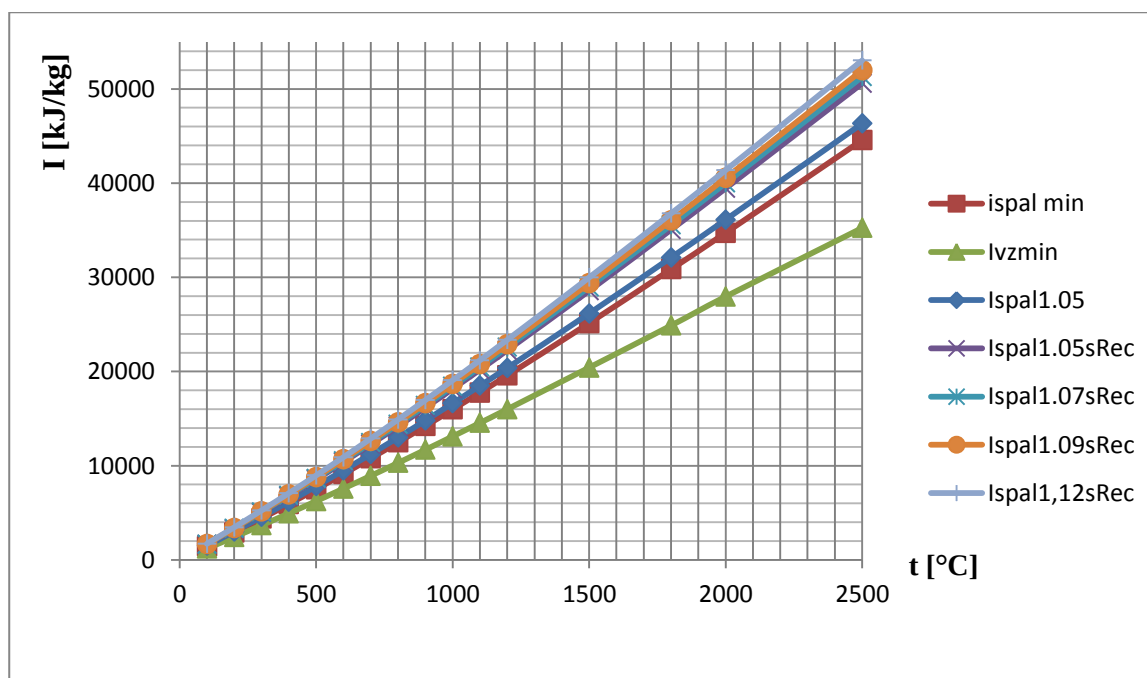
Entalpie spalín s recirkulací

$$I_{SPsRec} = I_{SP} + I_{SPRec}$$

(Rov.: 4.3-24)

t [°C]	I_{SPmin} [kJ/kg]	I_{VZmin} [kJ/kg]	I_{SP}				
			$\alpha_0=1,05$ [kJ/kg]	$\alpha_0=1,05$ [kJ/kg]	$\alpha_0=1,07$ [kJ/kg]	$\alpha_0=1,09$ [kJ/kg]	$\alpha_0=1,12$ [kJ/kg]
100	1430,5996	1208,0239	1491,0008	1628,281	1652,1562	1676,0472	1711,9106
200	2892,2701	2428,8215	3013,7112	3291,19	3339,1684	3387,1789	3459,2503
300	4390,1495	3673,3416	4573,8166	4994,951	5067,4888	5140,0754	5249,041
400	5927,4191	4941,5842	6174,4983	6743,037	6840,5843	6938,199	7084,7382
500	7505,356	6240,8486	7817,3984	8537,2456	8660,4093	8783,6594	8968,6842
600	9125,2002	7571,1347	9503,7569	10378,935	10528,319	10677,81	10902,23
700	10783,611	8928,793	11230,051	12264,249	12440,386	12616,649	12881,263
800	12479,946	10299,225	12994,907	14191,682	14394,788	14598,042	14903,178
900	14207,583	11693,379	14792,252	16154,61	16385,149	16615,857	16962,214
1000	15973,719	13111,256	16629,282	18160,891	18419,315	18677,932	19066,19
1100	17761,846	14542,82	18488,987	20191,948	20478,518	20765,304	21195,857
1200	19578,346	15996,28	20378,16	22255,182	22570,327	22885,712	23359,205
1500	25140,182	20419,619	26161,162	28571,055	28973,11	29375,479	29979,577
1800	30856,993	24881,278	32101,056	35057,737	35547,297	36037,25	36772,865
2000	34722,506	27956,082	36120,31	39447,952	39997,916	40548,326	41374,714
2500	44563,014	35241,634	46325,096	50592,908	51284,957	51977,609	53017,636

Tab.:4.3-2 I-t tabulka vzduchu a produktu spalování



Obr.:4.3-1 I-t diagram spalín

5 Tepelná bilance kotle

Tepelná bilance kotle se provádí za účelem určení účinnosti kotle, kdy při transformaci chemicky vázané energie v palivu, uvolněné při spalovacím procesu do pracovního média dochází k energetickým ztrátám a převedením na jejich tepelný ekvivalent umožňují určit celkovou tepelnou účinnost kotle.

5.1 Teplo přivedené do kotle

Teplota přiváděného spalovací vzduch na vstupu do OVZ je 30°C a palivo není ohříváno cizím zdrojem. Teplo přivedené do kotle na 1kg paliva je tedy:

$$Q_P^P = Q_i^r + i_P + Q_{VZ} = 34300 + 0 + 0 = 34300 \text{ kJ}/m^3 \quad (\text{Rov.: 5.1-1})$$

5.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

Tepelné ztráty kotle snižují tepelnou účinnost kotle. Palivem kotle po plynofikace je plyn, tudíž odpadá ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal) a ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků.

Ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal)

Při nedokonalém spalování paliva zůstávají ve spalínách podíly spalitelných plynů převážně CO.

-pro topné oleje $Z_{CO} = 0,5 \%$ [1]

Ztráta sdílením tepla do okolí

Závisí na parním výkonu kotle, druhu nátěru a oplechování.

-hliníkový nátěr oplechování při $M_{PP} = 18,056 \text{ kg/s}$ je $Z_{SO} = 0,8 \%$ [1]

Ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta)

Komínová ztráta má největší podíl na ztrátách kotle. Spaliny odcházející do komína a odnášejí nevyužitou část uvolněné energie při spálení. Velikost ztráty závisí na teplotě spalin a přebytku vzduchu ve spalínách za kotlem.

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích $Z_C = 0$.

$$Z_K = (100 - Z_C) \cdot \frac{I_{SP} - I_{VZ}}{Q_P^P} \quad (\text{Rov.: 5.2-1})$$

$$Z_K = (100 - 0) \cdot \frac{284.768 - 404.670}{34300} = 7.122 \%$$

Entalpie vzduchu při $t = 30^\circ\text{C}$ a přebytku vzduchu za kotlem $\alpha_k = 1,12$

$$I_{VZ} = \alpha_k \cdot I_{VZmin30} = 1,12 \cdot 361.312 = 404.670 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 5.2-2})$$

Tepelná účinnost kotle

$$\eta_K = 100 - \sum z = 100 - Z_{CO} - Z_{SO} - Z_K \quad (\text{Rov.: 5.2-3})$$

$$\eta_K = 100 - \sum z = 100 - 0,5 - 0,8 - 7.122 = 91.578\%$$

5.3 Výrobní teplo páry a množství paliva**Výrobní teplo páry**

Kotel nemá mezipřehřívák $M_{MP} = 0$, není množství odebírané syté páry $M_{OP} = 0$, neuvažujeme s odluhem $M_O = 0$

$$Q_V = M_{PP} \cdot (i_{PP} - i_{NV}) + M_{MP} \cdot (\Delta i) + M_{OP} \cdot (\Delta i) + M_O \cdot (\Delta i) \quad (\text{Rov.: 5.3-1})$$

$$Q_V = 18,055 \cdot (3333,93 - 506,84) + 0 + 0 + 0 = 51044,681 \text{ kW}$$

i_{PP} – entalpie přehřáté páry při 3,8 MPa; 450 °C [3]

i_{NV} – entalpie napájecí vody při 4,8 MPa, 120 °C [3]

Množství paliva

$$M_{PV} = \frac{Q_V}{Q_P^P \cdot \frac{\eta_K}{100}} = \frac{51044,681}{34300 \cdot \frac{91,578}{100}} = 1,625 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Rov.: 5.3-2})$$

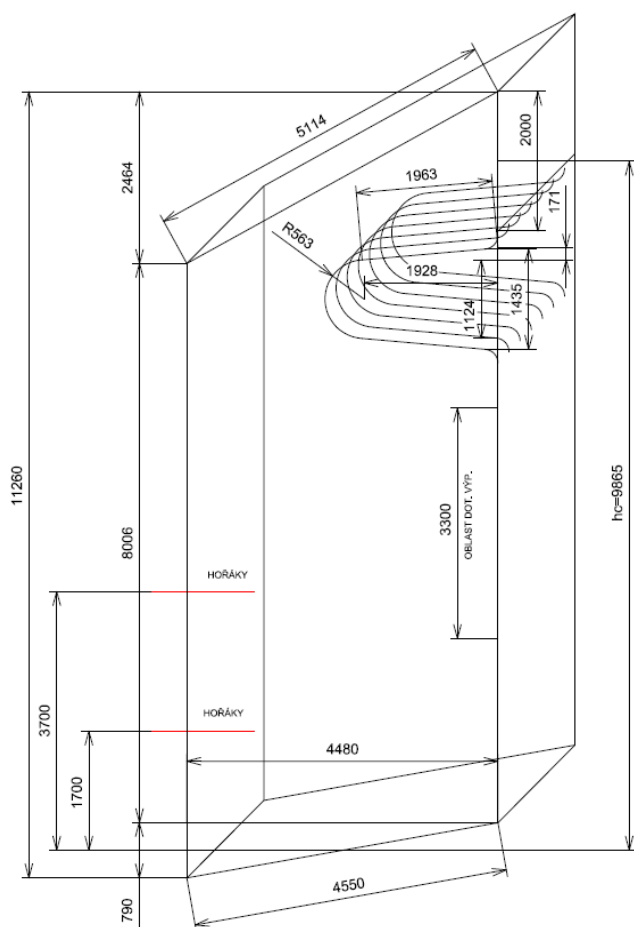
Při spalování plynu nevzniká ztráta mechanickým nedopalem Z_C , tudíž množství paliva přivedeného do kotle M_{PP} se rovná množství paliva skutečně spáleného M_{PV} .

6 Výpočet spalovací komory

Z důvod vyšší teploty spalin na konci ohniště při spalování plynu, byla spalovací komora upravena. Úprava spočívala ve zvětšení plochy výparníku. Byl vytvořen tzv. „nos“ z trubek a napojen na každou druhou trubku výparníku. Velikost „nosu“ byla omezena prostorem pod nosem, kde se napojil dodatekový výparník umístěn v druhém tahu na trubky, které nebyly využity k napojení „nosu“. Při návrhu byl dodržen sklon trubek 5° pro přirozenou cirkulaci v trubkách výparníku.

6.1 Rozměry spalovací komory

Rozměry spalovací komory jsou odečteny z výkresu stávajícího kotle.



Obr.:6.1-1 Zjednodušený obr. spalovací komory po plynofikaci

Aktivní objem ohniště

$$V_{\text{NOS}} = \frac{\pi \cdot 0.563^2}{2} \cdot 4.160 + 2 \cdot \left(\frac{0.171 \cdot 1.928}{2} \cdot 4.160 \right) + 1.124 \cdot 1.928 \cdot 4.160 = 12.458 \text{ m}^3 \quad (\text{Rov.: 6.1-1})$$

$$V_{\text{SP.K.}} = 8.006 \cdot 4.160 \cdot 4.480 + \frac{2.464 \cdot 1.928 \cdot 4.480}{2} + \frac{0.790 \cdot 1.928 \cdot 4.480}{2} = 179.528 \text{ m}^3 \quad (\text{Rov.: 6.1-2})$$

$$V_O = V_{\text{SP.K.}} - V_{\text{NOS}} = 179.528 - 12.458 = 167.071 \text{ m}^3 \quad (\text{Rov.: 6.1-3})$$

Povrch stěn ohniště

$$F_{\text{horní}} = 5.114 \cdot 4.160 + \frac{2.464 \cdot 4.480}{2} \cdot 2 + 2.464 \cdot 4.160 = 42.563 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 6.1-4})$$

$$F_{\text{střed}} = 2 \cdot 8.006 \cdot 4.480 + 2 \cdot 8.006 \cdot 4.160 = 138.344 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 6.1-5})$$

$$F_{\text{dolní}} = 4.550 \cdot 4.160 + \frac{0.790 \cdot 4.480}{2} \cdot 2 + 0.790 \cdot 4.160 = 25.754 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 6.1-6})$$

$$F_{\text{SP.K}} = F_{\text{horní}} + F_{\text{střed}} + F_{\text{dolní}} = 42.563 + 138.344 + 25.754 = 206.660 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 6.1-7})$$

$$F_{\text{nos}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0.563}{2} \cdot 4.160 + 2 \cdot 1.963 \cdot 4.160 = 23.690 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 6.1-8})$$

$$F_{\text{zaNosem}} = 1.467 \cdot 4.160 = 6.103 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 6.1-9})$$

$$F_{\text{ST}} = F_{\text{SP.K}} + 2 \cdot F_{\text{nos}} - F_{\text{zaNosem}} = 206.660 + 2 \cdot 23.690 - 6.103 = 247.938 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 6.1-10})$$

Účinná sálavá plocha stěn ohniště

Pro membránové stěny a výstupní průřez ohniště je úhlový součinitel $x_1 = 1$. Z celkové plochy stěn jsou odečteny plochy 3 revizních otvorů a 4 hořáků. Plochy nosu a oblast pro dodatkový výparník, je násobena koeficientem $x_2 = 0.55$, který je odečten z grafu dle poměru $\frac{S}{D}$.

$$F_{\text{zeb.tr.}} = 3.3 \cdot 4.160 = 13.728 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 6.1-11})$$

$$F_{\text{4hoř.}} = 4 \cdot \frac{\pi \cdot 1.125^2}{4} = 3.976 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 6.1-12})$$

$$F_{\text{3otv.}} = 3 \cdot 1.2 \cdot 0.6 = 6.103 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 6.1-13})$$

$$F_{\dot{U}_{S_{X1}}} = (F_{\text{SP.K}} - F_{\text{zaNosem}} - F_{\text{zeb.tr.}} - F_{\text{3otv.}} - F_{\text{4hoř.}}) \cdot x_1 \quad (\text{Rov.: 6.1-14})$$

$$F_{\dot{U}_{S_{X1}}} = (206.660 - 6.103 - 13.728 - 6.103 - 3.976) \cdot 1 = 180.694 \text{ m}^2$$

$$F_{\dot{U}_{S_{X2}}} = (2 \cdot F_{\text{nos}} + F_{\text{zaNosem}} + F_{\text{zeb.tr.}}) \cdot x_2 \quad (\text{Rov.: 6.1-15})$$

$$F_{\dot{U}_{S_{X2}}} = (2 \cdot 23.690 + 6.103 + 13.728) \cdot 0.55 = 36.966 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 6.1-16})$$

$$F_{\dot{U}_S} = F_{\dot{U}_{S_{X1}}} + F_{\dot{U}_{S_{X2}}} = 180.694 + 36.966 = 217.660 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 6.1-17})$$

6.2 Tepelný výpočet ohniště

Cílem tohoto výpočtu je určení teploty spalin na konci ohniště ϑ_o metodou postupného přiblížení. Pro určení středního celkového měrného tepla spalin, se odhadne hodnota teploty na konci ohniště a dle ní i entalpie. Podmínkou je, aby se odhadovaná hodnota teploty ϑ_o nelišila $\pm 20^\circ\text{C}$ od hodnoty teploty vypočtené ϑ_o . Hodnoty entalpií a teplot jsou interpolovány z tab.:2-3. Za konečnou hodnotu teploty ϑ_o se bere hodnota vypočtené teploty ϑ_o . Následující výpočet je proveden s vypočtenou hodnotou teploty ϑ_o , získanou po několika provedených iteracích.

6.2.1 Teplota spalin na výstupu z ohniště

Vychází z poměrné teploty spalin na výstupu z ohniště dle vztahu:

$$\theta_o = \frac{T_o}{T_a} = \frac{1}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{B_o}\right)^{0,6}} \Rightarrow \vartheta_o = \frac{\vartheta_a + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{B_o}\right)^{0,6}} - 273,15 \quad (\text{Rov.: 6.2.1-1})$$

6.2.2 Součinitel M

Charakterizuje průběh teploty po poměrné výšce ohniště. Je závislý na druhu spalovacího paliva a na poměrné výšce maximální hodnoty teploty plamene x_o , určené podle poměrné výšky hořáků x_h a opravy Δx , kdy se maximální hodnota teploty plamene x_o nachází nad nebo pod úrovní hořáků.

$$M = 0,54 - 0,2 \cdot x_o = 0,54 - 0,2 \cdot 0,274 = 0,485 \quad (\text{Rov.: 6.2.2-1})$$

Poměrná výška maximální hodnoty teploty plamene:

$$x_o = x_h + \Delta x = 0,247 + 0 = 0,274 \quad (\text{Rov.: 6.2.2-1})$$

Poměrná výška hořáků

$$x_h = \frac{h_h}{h_c} = \frac{2,7}{9,865} = 0,274 \quad (\text{Rov.: 6.2.2-2})$$

Výšky hořáků odečtena ze stávajícího výkresu kotle.

$$h_h = \frac{n_1 \cdot h_h^I + n_2 \cdot h_h^{II}}{n_1 + n_2} \quad (\text{Rov.: 6.2.2-3})$$

$$h_h = \frac{2 \cdot 1,7 + 2 \cdot 3,7}{2 + 2} = 2,7 \text{ m}$$

Oprava při spalování plynu v nízkoemisních hořácích, byla dle doporučení konzultanta, zvolena $\alpha_h = 1$.

$$\Delta x = 2 \cdot (1 - \alpha_h) = 2 \cdot (1 - 1) = 0 \quad (\text{Rov.: 6.2.2-4})$$

6.2.3 Boltzmannovo číslo

$$B_o = \frac{\varphi \cdot M_{PV} \cdot \overline{O_{SP} \cdot c}}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \bar{\psi} \cdot F_{ST} \cdot \vartheta_a^3} \quad (\text{Rov.: 6.2.3-1})$$

$$B_o = \frac{0,991 \cdot 1,625 \cdot 21,314}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,571 \cdot 247,938 \cdot (1844 + 273,15)^3} = 0,448$$

Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{z_{SO}}{\eta_K + z_{SO}} = 1 - \frac{0,8}{91,578 + 0,8} = 0,991 \quad (\text{Rov.: 6.2.3-2})$$

Střední celkové měrné teplo spalín

$$\overline{O_{SP} \cdot c} = \frac{I_u - I_o}{\vartheta_a - \vartheta_o} = \frac{36034,20 - 20709,52}{1844 - 1125,5} = 22,38 \text{ kJ/m}^3 \cdot K \quad (\text{Rov.: 6.2.3-3})$$

-odhadovaná $\vartheta_o = 1125,5$ a jí odpovídající entalpie = 20709,52 kJ/m³

Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_u = Q_P^p \cdot \frac{100 - z_{CO}}{100 - z_C} + Q_{VZ} - Q_{VZV} + r \cdot I_{SPOD} \quad (\text{Rov.: 6.2.3-4})$$

$$I_u = 34300 \cdot \frac{100 - 0,5}{100 - 0,8} + 1620,93 - 0 + 0,1 \cdot 2847,681 = 36034,199 \text{ kJ/m}^3$$

- adiabatická teplota $\vartheta_a = 1844$ odpovídající I_u , při $\alpha_0 = 1,05$

Teplo přivedené do kotle se spalovacím vzduchem

Teplota ohřátého vzduchu je 127,5 °C

$$Q_{VZ} = \alpha_0 \cdot I_{VZmin} = 1,05 \cdot 1543,743 = 1620,93 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 6.2.3-5})$$

součinitel tepelné efektivity stěn

$$\bar{\psi} = \frac{F_{\dot{U}S_{X1}} \cdot \xi + F_{\dot{U}S_{X2}} \cdot \xi}{F_{ST}} = \frac{180,694 \cdot 0,65 + 36,966 \cdot 0,65}{247,938} = 0,571 \quad (\text{Rov.: 6.2.3-6})$$

-součinitel zanešení stěn ohniště pro plyn $\xi = 0,65$ [1]

6.2.4 Stupeň černosti ohniště

Vyjadřuje sálavé vlastnosti plamene a stěn ohniště. Ve výpočtu se plamen dělí na sálavou a nesálavou část. Uvažuje se zeslabení sálavého toku vlivem přítomnosti tříatomových plynů a částic sazí.

$$a_o = \frac{a_{PL}}{a_{PL} + (1 - a_{PL}) \cdot \bar{\psi}} \quad (\text{Rov.: 6.2.4-1})$$

$$a_o = \frac{0.358}{0.358 + (1 - 0.358) \cdot 0.571} = 0.494$$

Efektivní stupeň černosti plamene

Součinitel m charakterizuje podíl objemu ohniště zaplněného svítivou částí plamene. Pro spalování plynných paliv při objemovém zatížení $q_V < 400 \text{ kW/m}^3$ v jednoprostorovém ohništi je $m = 0,1$ [1].

$$a_{PL} = m \cdot a_{SV} + (1 - m) \cdot a_{NS} \quad (\text{Rov.: 6.2.4-2})$$

$$a_{PL} = 0,1 \cdot 0.531 + (1 - 0,1) \cdot 0.339 = 0.358$$

Stupeň černosti nesvítivé části plamene

$$a_{NS} = 1 - e^{-k_{NS} \cdot 0,1 \cdot s} = 1 - e^{-1.706 \cdot 0,1 \cdot 2.426} = 0.339 \quad (\text{Rov.: 6.2.4-3})$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{NS} = k_{SP} \cdot r_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{\vartheta_o}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (\text{Rov.: 6.2.4-4})$$

$$k_{NS} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0.201}{3,16 \cdot \sqrt{0.029 \cdot 2.426}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1125.5 + 273.15}{1000} \right) \cdot 0.293 = 1.706$$

Celkový parciální tlak

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0.293 = 0.029 \text{ MPa} \quad (\text{Rov.: 6.2.4-5})$$

-kotel bez přetlaku v ohništi $p = 0,1 \text{ MPa}$ [1]

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_O}{F_{ST}} = 3,6 \cdot \frac{167.071}{247.938} = 2.426 \text{ m} \quad (\text{Rov.: 6.2.4-6})$$

Stupeň černosti svítivé části plamene

$$a_{SV} = 1 - e^{-k_{SV} \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-3.122 \cdot 0,1 \cdot 2.426} = 0.531 \quad (\text{Rov.: 6.2.4-7})$$

Součinitel zeslabení sálání svítivými tříatomovými plyny

$$k_{SV} = k_{SP} \cdot r_{SP} + k_C = k_{NS} + k_C = 1.706 + 1.416$$

$$= 3.122 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (\text{Rov.: 6.2.4-8})$$

Součinitel zeslabení sáláním částicemi sazí

$$k_C = 0,3 \cdot (2 - \alpha_o) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{\vartheta_o}{1000} - 0,5 \right) \cdot \frac{C^r}{H^r} \quad (\text{Rov.: 6.2.4-9})$$

$$k_C = 0,3 \cdot (2 - 1.05) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{1125.5 + 273,15}{1000} - 0,5 \right) \cdot 2.859 = 1.416$$

Podíl obsahu uhlíku a vodíku v původním vzorku

$$\frac{C^r}{H^r} = 0,12 \cdot \sum \frac{x}{y} \cdot C_x H_y \quad (\text{Rov.: 6.2.4-10})$$

$$\frac{C^r}{H^r} = 0,12 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot 94.31 + \frac{2}{6} \cdot 0.51 + \frac{3}{8} \cdot 0.11 + \frac{4}{10} \cdot 0.1 \right) = 2.859$$

Teplota spalín na výstupu z ohniště

$$\vartheta_o = \frac{\vartheta_o + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{B_o} \right)^{0,6}} - 273,15 \quad (\text{Rov.: 6.2.4-11})$$

$$\vartheta_o = \frac{(1844 + 273,15)}{1 + 0.485 \cdot \left(\frac{0.494}{0.448} \right)^{0,6}} - 273,15 = 1125.047 \text{ °C}$$

Rozdíl mezi odhadovanou a vypočtenou teplotou ϑ_o

$$\Delta t_o = \vartheta_o - \vartheta_o = 1125.5 - 1125.047 = 0.45 \text{ °C} \quad (\text{Rov.: 6.2.4-12})$$

Podmínka $\Delta \vartheta_o = \pm 20 \text{ °C}$ je splněna.

Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn

$$Q_s = \varphi \cdot (I_u - I_o) = 0.991 \cdot (36034.20 - 20709.52)$$

$$= 15191.967 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 6.2.4-13})$$

Střední tepelné zatížení stěn ohniště

$$\bar{q} = \frac{\varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_u - I_o)}{F_{\dot{U}S}} \quad (\text{Rov.: 6.2.4-14})$$

$$\bar{q} = \frac{0.991 \cdot 1.625 \cdot (36034.20 - 20709.52)}{217.660} = 113.424 \text{ kW/m}^2$$

7 Bilanční výpočet teplosměnných ploch ze strany média

7.1 Tlak napájecí vody

V trubkách konvekčních ploch při proudění média vznikají tlakové ztráty. Proto tlak napájecí vody musí být navýšen od požadovaného tlaku přehřáté páry na výstupu o tlakové ztráty v jednotlivých konvekčních plochách. Jednotlivé ztráty v konvenčních plochách byly zvoleny dle odborného doporučení konzultanta.

$$p_{NV} = p_{pp} + \Delta p_{VYP} + \Delta p_{PP} + \Delta p_{dot.Vyp.} + \Delta p_{EKO} \quad (\text{Rov.: 7.1-1})$$

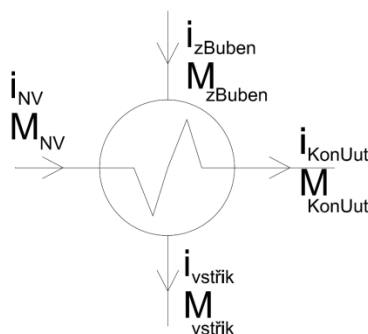
$$p_{NV} = 3.8 + 0 + 0.2 + 0 + 0.5 = 4,5 \text{ MPa}$$

7.2 Dílčí výkony jednotlivých ploch

7.2.1 Eko1

Napájecí voda před vstupem do ekonomizéru (Eko1), je ohřátá v kondenzátoru v závislosti na množství vyrobeného kondenzátu, který je využíván pro zástřik páry v mezistupni přehříváků PP1 a PP2.

Bilance kondenzátoru páry



Obr.7.2.1-1 Bilance přehřátí vody na vstupu do Eka1

$$i_{KonOUT} = \frac{M_{zBuben} \cdot i_{zBuben} + M_{NV} \cdot i_{NV} - M_{vstřik} \cdot i_{vstřik}}{M_{NV}} \quad (\text{Rov.: 7.2.1-1})$$

$$i_{KonOUT} = \frac{1.485 \cdot 2800.82 + 18.056 \cdot 506.840 - 1.485 \cdot 1080.21}{18.056} = 648.354 \text{ kJ/kg}$$

$$i_{KonOUT} = i_{Eko1IN} = 648.353 \text{ kJ/kg}$$

$$M_{zBuben} = M_{vstřik}$$

$$M_{NV} = M_{pp}$$

$i_{vstřik}$ – entalpie syté kapaliny při tlaku v bubnu 4Mpa snížený o 0.1Mpa [1]

i_{NV} – entalpie při tlaku 4.5Mpa a teplotě 120°C

i_{zBuben} – entalpie syté páry při tlaku v bubnu 4Mpa

	$t [^{\circ}\text{C}]$	$p [\text{Mpa}]$	$I [\text{kJ/kg}]$
vstup	151.3	4.5	648.354
výstup	177.3	4.25	764.066

$$Q_V^{EKO1} = M_{NV} \cdot (i_{Eko1_{OUT}} - i_{Eko1_{IN}}) \quad (\text{Rov.: 7.2.1-2})$$

$$Q_V^{EKO1} = 18.056 \cdot (764.066 - 648.354) = 2089.248 \text{ kW}$$

7.2.2 Eko2

	$t [^{\circ}\text{C}]$	$p [\text{Mpa}]$	$I [\text{kJ/kg}]$
vstup	177.3	4.25	764.066
výstup	238	4	1032.676

$$Q_V^{EKO2} = M_{NV} \cdot (i_{Eko2_{OUT}} - i_{Eko2_{IN}}) \quad (\text{Rov.: 7.2.2-1})$$

$$Q_V^{EKO2} = 18.056 \cdot (1032.676 - 764.066) = 4849.91 \text{ kW}$$

7.2.3 Výparník

	$t [^{\circ}\text{C}]$	$p [\text{Mpa}]$	$I [\text{kJ/kg}]$
vstup	238	4	1032.676
výstup	250.354	4	2800.820

$$Q_V^{VÝP} = M_{PP} \cdot (i_{buben} - i_{Eko2_{OUT}}) \quad (\text{Rov.: 7.2.3-1})$$

$$Q_V^{VÝP} = 18.056 \cdot (2800.820 - 1032.676) = 31924.8193 \text{ kW}$$

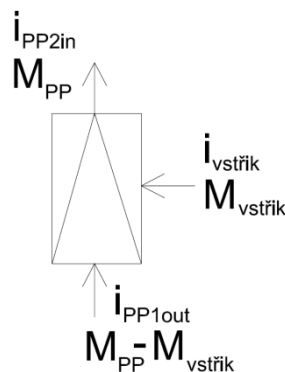
7.2.4 Přehřívák PP1+ZTR

	$t [^{\circ}\text{C}]$	$p [\text{Mpa}]$	$I [\text{kJ/kg}]$
vstup	250.354	4	2800.820
výstup	400.5	3.9	3217.485

$$Q_V^{PP1+ZTR} = (M_{PP} - M_{vstřík}) \cdot (i_{PP1_{OUT}} - i_{buben}) \quad (\text{Rov.: 7.2.4-1})$$

$$Q_V^{PP1+ZTR} = (18.056 - 1.485) \cdot (3217.485 - 2800.820) = 6904.372 \text{ kW}$$

Bilance vstříku



Obr.7.2.4-1 Bilance vstříku

$$i_{PP1out} = \frac{M_{PP} \cdot i_{PP2in} - M_{vstřík} \cdot i_{vstřík}}{M_{PP} - M_{vstřík}} \quad (\text{Rov.: 7.2.4-2})$$

$$i_{PP1out} = \frac{18.056 \cdot 3041.702 - 1.485 \cdot 1080.21}{18.056 - 1.485} = 3217.485 \text{ kJ/kg}$$

7.2.5 Přeřívák PP2 + MŘÍŽ PP2

	$t [^{\circ}\text{C}]$	$p [\text{Mpa}]$	$I [\text{kJ/kg}]$
vstup	329.3	3.9	3041.702
výstup	450	3.8	3333.93

$$Q_V^{PP2+MřížPP2} = M_{PP} \cdot (i_{PP2mřížOUT} - i_{PP2IN}) \quad (\text{Rov.: 7.2.5-1})$$

$$Q_V^{PP2+MřížPP2} = 18.056 \cdot (3333.93 - 3041.702) = 5276.331 \text{ kW}$$

7.2.6 Součet výkonů

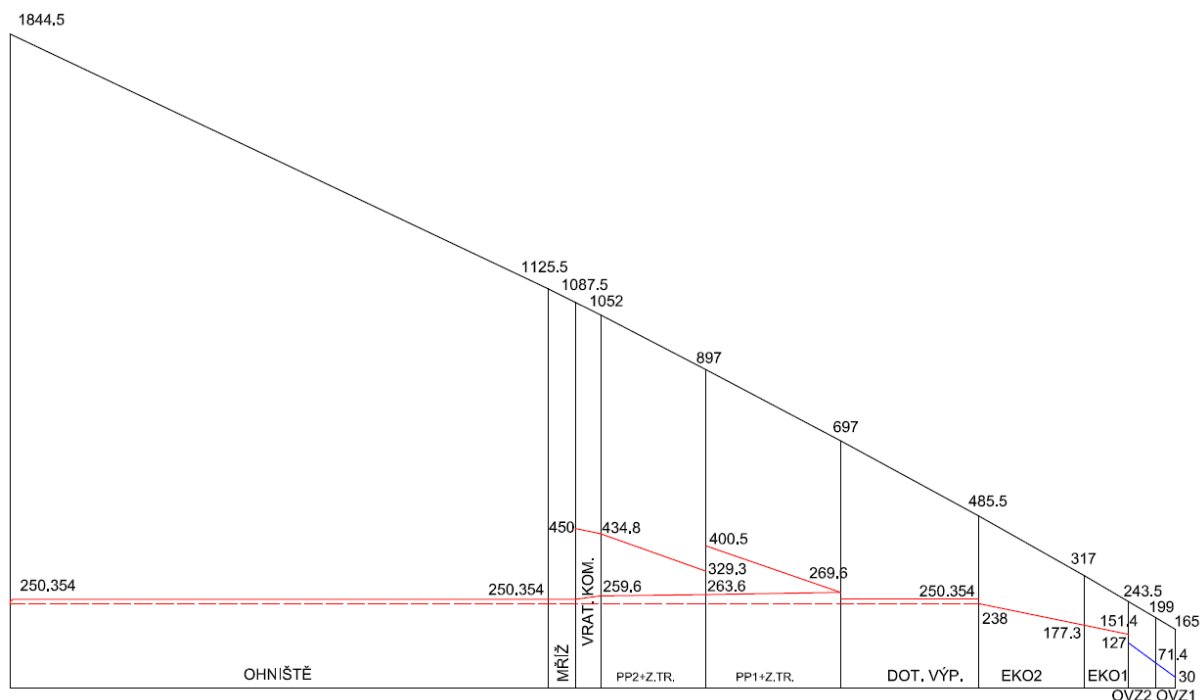
$$Q_V^{CEL} = Q_V^{EKO1} + Q_V^{EKO2} + Q_V^{VÝP} + Q_V^{PP1+ZTR} + Q_V^{PP2+MřížPP2} \quad (\text{Rov.: 7.2.6-1})$$

$$Q_V^{CEL} = 2089.248 + 4849.91 + 31924.8193 + 6904.372 + 5276.331$$

$$Q_V^{CEL} = 51044.681 \text{ kW}$$

$$\Delta Q_V = \left(\frac{Q_V^{CEL} - Q_V}{Q_V} \right) \cdot 100 = \left(\frac{51044.681 - 51044.681}{51044.681} \right) = 0 \% \quad (\text{Rov.: 7.2.6-2})$$

7.3 Pilový diagram



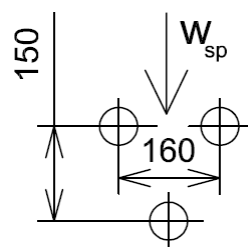
Obr.7.3-1: Pilový diagram (plyn)

8 Mříž

Spaliny vystupují ze spalovací komory skrz rozvolněnou část výparníku tzv. mříž. Rozměry jsou převzaty z výkresové dokumentace. Rozměry převzaty z technické dokumentace kotle.

Rozměry

Hloubka	$a = 3.680 \text{ m}$
Výška	$b = 2.02 \text{ m}$
Vnější průměr trubek	$D = 0.0603 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubek	$d = 0.052 \text{ m}$
Počet řad	$z = 2$
Počet trubek v první řadě	$n_{TR1} = 22$
Počet trubek v druhé řadě	$n_{TR1} = 23$
Počet trubek celkově	$n_{TRC} = 45$
Délka trubky	$l_{TR} = 2.02 \text{ m}$
Příčná rozteč trubek	$s_1 = 0.16 \text{ m}$
Podélná rozteč trubek	$s_2 = 0.15 \text{ m}$



Obr.8-1: Rozteče trubek mříže

Spaliny			medium	
	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$t [^{\circ}\text{C}]$	$p [\text{Mpa}]$
Vstup	1125	20709.52	250.354	4
výstup	1087.5	19938.066	250.354	4

8.1 Bilanční teplo spalín

$$Q_b^{Mříž} = \varphi \cdot (I_{SP}^{in} - I_{SP}^{out}) \quad (\text{Rov.: 8.1-1})$$

$$Q_b^{Mříž} = 0.991 \cdot (20709.52 - 19938.066) = 764.771 \text{ kJ/m}^3$$

Střední teplota proudu spalín

$$t_{STR}^{SP} = \frac{t_{SP}^{in} + t_{SP}^{out}}{2} = \frac{1125 + 1087.5}{2} = 1106.3^{\circ}\text{C} \quad (\text{Rov.: 8.1-2})$$

Látkové vlastnosti spalín

$\lambda [\text{W/mK}]$	0.1261
Pr	0.5994
$\nu [\text{m}^2/\text{s}]$	$205 \cdot 10^{-6}$

Rychlost spalín

$$w_{SP} = \frac{M_{PV} \cdot O_{SPsRec}}{F_{SP}} \cdot \left(1 + \frac{t_{STR}^{SP}}{273,15}\right) \quad (\text{Rov.: 8.1-3})$$

$$w_{SP} = \frac{1.625 \cdot 12.026}{4.754} \cdot \left(1 + \frac{1106.3}{273,15}\right) = 20.760 \text{ m/s}$$

Objem spalín při $\alpha_o = 1.05$ a recirkulaci

$$O_{SPsRec} = O_{SP} + O_{SPRec} = 10.873 + 1.153 = 12.026 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 8.1-4})$$

Světlý průřez spalín

$$F_{SP} = a \cdot b - D \cdot l_{TR} \cdot n_{TR1} = 2.02 \cdot 3.680 - 0.0603 \cdot 2.02 \cdot 22 = 4.754 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 8.1-5})$$

8.2 Součinitel prostupu tepla

Při spalování plynu po spalování mazutu se pro součinitel tepelné efektivnosti ψ bere střední hodnota z hodnot pro mazut a plyn.

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0.725 \cdot 116.482 = 84.449 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 8.2-1})$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_K + \alpha_S = 81.119 + 35.363 = 116.482 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 8.2-2})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_K = c_Z \cdot c_S \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{Rov.: 8.2-3})$$

$$\begin{aligned} \alpha_K &= 0.730 \cdot 0.337 \cdot \frac{0.126}{0.0603} \cdot \left(\frac{20.760 \cdot 0.0603}{205 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0.5994^{0,33} \\ &= 81.119 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned}$$

Oprava pro vystřídání uspořádání trubek

Oprava c_S na uspořádání svazku podle σ_1 a φ_σ

$$c_S = 0.34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 0.909^{0,1} = 0.337 \quad (\text{Rov.: 8.2-4})$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0.160}{0.0603} = 2.653 \quad (\text{Rov.: 8.2-5})$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0.150}{0.0603} = 2.488 \quad (\text{Rov.: 8.2-6})$$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 2.653^2 + 2.488^2} = 2.819 \quad (\text{Rov.: 8.2-7})$$

Hodnota φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{2.653 - 1}{2.819 - 1} = 0.909 \quad (\text{Rov.: 8.2-8})$$

Oprava c_Z na počet podélných řad

$$c_Z = 3,12 \cdot z^{0,05} - 2,5 = 3,12 \cdot 2^{0,05} - 2,5 = 0.730 \quad (\text{Rov.: 8.2-9})$$

-pro $z < 10$ a $\sigma_1 < 3$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{STR}^{SP} + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)}} \quad (\text{Rov.: 8.2-10})$$

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.8 + 1}{2} \cdot 0.164 \cdot (1106.3 + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(275.354 + 273.15)}{(1106.3 + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(275.354 + 273.15)}{(1106.3 + 273.15)}}$$

$$\alpha_S = 35.363 \text{ W/m}^2\text{K}$$

-stupeň černosti stěny $a_{st} = 0.8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0.179} = 0.164 \quad (\text{Rov.: 8.2-11})$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{SP} \cdot r_{SP} + k_P \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (\text{Rov.: 8.2-12})$$

$$k \cdot p \cdot s = (15.249 \cdot 0.293 + 0 \cdot 0) \cdot 0.1 \cdot 0.402 = 0.179$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{STR}^{SP} + 273.15}{1000} \right) \quad (\text{Rov.: 8.2-13})$$

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0.201}{3,16 \cdot \sqrt{0.029 \cdot 0.402}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1106.3 + 273.15}{1000} \right) = 15.249 / \text{m} \cdot \text{Mpa}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0.0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0.160 \cdot 0.150}{0.0603^2} - 1 \right) = 0.402 \text{ m} \quad (\text{Rov.: 8.2-14})$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_Z = t_{ST}^{MED} + \Delta t = 250.354 + 25 = 275.354 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 8.2-15})$$

—pro plyn $\Delta t = 25^\circ\text{C}$

8.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}} = \frac{874.693 - 837.146}{\ln \frac{874.693}{837.146}} = 855.782^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 8.3-1})$$

$$\Delta t_V = 1125 - 250.354 = 874.693^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_M = 1087.5 - 250.354 = 837.146^\circ\text{C}$$

Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{TR} \cdot n_{TRC} = \pi \cdot 0.0603 \cdot 2.02 \cdot 45 = 17.22 \text{ } m^2 \quad (\text{Rov.: 8.3-2})$$

8.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_V = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{PV}} \cdot 10^{-3} = \frac{84.449 \cdot 855.782 \cdot 17.22}{1.625} \cdot 10^{-3} = 765.814 \text{ kJ} / m^3 \quad (\text{Rov.: 8.4-1})$$

8.5 Celková bilance

$$\Delta Q = \frac{Q_b^{Mříž} - Q_V}{Q_b^{Mříž}} \cdot 100 = \frac{764.771 - 765.814}{764.771} \cdot 100 = -0.136 \% \quad (\text{Rov.: 8.5-1})$$

9 VRATNÁ KOMORA

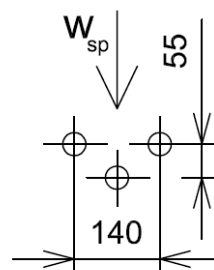
V oblasti vratné komory se nachází přehřívací mříž, (část přehříváku PP2), a část závěsných trubek.

9.1 Přehřívací Mříž PP2

Přehřívací mříž je tvořena výstupem trubek druhého stupně přehříváku. Mříž vystupuje pod menším úhlem jak 80° vzhledem k ose proudu spalin, tudíž nemusí být zavedena oprava pro šikmé proudění. Rozměry převzaty z technické dokumentace kotle.

Rozměry

Výška tahu	$a = 1.98 \text{ m}$
Hloubka tahu	$b = 4.39 \text{ m}$
Vnější průměr trubek	$D = 0.038 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubek	$d = 0.0308 \text{ m}$
Počet řad	$z = 2$
Počet trubek v první řadě	$n_{TR1} = 31$
Počet hadů	$n_H = 2$
Délka trubky	$l_{TRH} = 2.2 \text{ m}$
Rozteč trubek	$s_1 = 0.140 \text{ m}$
Rozteč trubek	$s_2 = 0.055 \text{ m}$



Obr.9.1-1: Rozteče trubek mříže PP2

Výhřevná plocha

$$S^{MřížPP2} = \pi \cdot D \cdot l_{TRH} \cdot n_H \cdot n_{TR1} = \pi \cdot 0.038 \cdot 2.2 \cdot 2 \cdot 31 = 16.284 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 9.1-1})$$

$$S^{Celk.} = S^{MřížPP2} + S^{Z.TR.} = 16.284 + 13.007 = 29.291 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 9.1-2})$$

$$S^{Z.TR.} = \text{viz. (Rov.: 9.2-1)}$$

$$S_{\text{poměr}}^{MřížPP2} = \frac{S^{MřížPP2}}{S^{Celk.}} = \frac{16.284}{29.291} = 0.55592 \quad (\text{Rov.: 9.1-3})$$

Spaliny			medium (pára)		
	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$p [\text{Mpa}]$
Vstup	1087.5	19938.066	434.8	3298.166	3.81
výstup	1052	19217.041	450	3333.93	3.8

9.1.1 Bilanční teplo spalín

$$Q_b^{VRAT.KOM} = \varphi \cdot (I_{SP}^{in} - I_{SP}^{out}) \quad (\text{Rov.: 9.1.1-1})$$

$$Q_b^{VRAT.KOM} = 0.991 \cdot (19938.066 - 19217.041) = 714.781 \text{ kJ/m}^3$$

9.1.2 Rovnice tepelné bilance

$$i_{MED}^{in} = -Q_b^{VRAT.KOM} \cdot S_{poměr}^{MřížPP2} \cdot \frac{M_{PV}}{M_{PP}} + i_{MED}^{out} \quad (\text{Rov.: 9.1.2-1})$$

$$i_{MED}^{in} = -714.781 \cdot 0.55592 \cdot \frac{1.625}{18.056} + 3333.93 = 3298.166 \text{ kJ/m}^3$$

-této entalpií odpovídá teplota 434.8°C při tlaku 3.81Mpa

Střední teplota proudu spalín

$$t_{STR}^{SP} = \frac{t_{SP}^{in} + t_{SP}^{out}}{2} = \frac{1087.5 + 1052}{2} = 1069.75^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 9.1.2-2})$$

Látkové vlastnosti spalín

$\lambda [W/mK]$	0.1183
Pr	0.603
$\nu [m^2/s]$	$196 \cdot 10^{-6}$

Rychlost spalín

$$w_{SP} = \frac{M_{PV} \cdot O_{SPsRec}}{F_{SP}} \cdot \left(1 + \frac{t_{STR}^{SP}}{273,15}\right) \quad (\text{Rov.: 9.1.2-3})$$

$$w_{SP} = \frac{1.625 \cdot 12.026}{6.101} \cdot \left(1 + \frac{1069.75}{273,15}\right) = 15.749 \text{ m/s}$$

Objem spalín při $\alpha_o = 1.05$ a recirkulaci

$$O_{SPsRec} - \text{viz. (Rov.: 4.3-11)}$$

Světlý průřez spalin

$$F_{SP} = a \cdot b - D \cdot l_{TR} \cdot n_{TR1} = 1.980 \cdot 4.39 - 0.038 \cdot 2.2 \cdot 31 = 6.101 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 9.1.2-4})$$

9.1.3 Součinitel prostupu tepla

Při spalování plynu po spalování mazutu se pro součinitel tepelné efektivity ψ bere střední hodnota z hodnot pro mazut a plyn.

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0.725 \cdot 131.160}{1 + \frac{131.160}{1565.010}} = 87.738 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 9.1.3-1})$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_K + \alpha_S = 101.236 + 29.925 = 131.160 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 9.1.3-2})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_K = c_Z \cdot c_S \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{Rov.: 9.1.3-3})$$

$$\alpha_K = 0.856 \cdot 0.364 \cdot \frac{0.1183}{0.038} \cdot \left(\frac{15.749 \cdot 0.038}{196 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0.603^{0,33} = 101.236 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Oprava pro vystřídání uspořádání trubek

Oprava c_S na uspořádání svazku podle σ_1 a φ_σ

$$c_S = 0.34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,34 \cdot 1.999^{0,1} = 0.364 \quad (\text{Rov.: 9.1.3-4})$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0.140}{0.038} = 3.684 \quad (\text{Rov.: 9.1.3-5})$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0.055}{0.038} = 1.447 \quad (\text{Rov.: 9.1.3-6})$$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 3.684^2 + 1.447^2} = 2.343 \quad (\text{Rov.: 9.1.3-7})$$

Hodnota φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{3.684 - 1}{2.343 - 1} = 1.999 \quad (\text{Rov.: 9.1.3-8})$$

Oprava c_Z na počet podélných řad

$$c_Z = 4 \cdot z^{0,02} - 3,2 = 4 \cdot 2^{0,02} - 3,2 = 0.856 \quad (\text{Rov.: 9.1.3-9})$$

-pro $z < 10$ a $\sigma_1 \geq 3$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{STR}^{SP} + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)}} \quad (\text{Rov.: 9.1.3-10})$$

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.8 + 1}{2} \cdot 0.122 \cdot (1069.75 + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(467.429 + 273.15)}{(1069.75 + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(467.429 + 273.15)}{(1069.75 + 273.15)}}$$

$$\alpha_S = 29.925 \text{ W/m}^2\text{K}$$

-stupeň černosti stěny $a_{st} = 0,8$ [1]

Stupeň černosti proudy spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0.131} = 0.122 \quad (\text{Rov.: 9.1.3-11})$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{SP} \cdot r_{SP} + k_P \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (\text{Rov.: 9.1.3-12})$$

$$k \cdot p \cdot s = (22.536 \cdot 0.293 + 0 \cdot 0) \cdot 0.1 \cdot 0.198 = 0.131$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{STR}^{SP} + 273,15}{1000} \right) \quad (\text{Rov.: 9.1.3-13})$$

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,201}{3,16 \cdot \sqrt{0,029 \cdot 0,198}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1069,75 + 273,15}{1000} \right) = 22,536 \text{ /m} \cdot \text{Mpa}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,140 \cdot 0,055}{0,038^2} - 1 \right) = 0,198 \text{ m} \quad (\text{Rov.: 9.1.3-14})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně media

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (\text{Rov.: 9.1.3-15})$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,063}{0,0308} \cdot \left(\frac{32,559 \cdot 0,0308}{26,21 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0833} \right)^{0,8} \cdot 0,9567^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$= 1565,01 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Střední teplota proudu media

$$t_{MED}^{STR} = \frac{t_{MED}^{out} + t_{MED}^{in}}{2} = \frac{450 + 434,8}{2} = 442,429 \text{ °C} \quad (\text{Rov.: 9.1.3-16})$$

Střední tlak proudu media

$$p_{MED}^{STR} = \frac{p_{MED}^{out} + p_{MED}^{in}}{2} = \frac{3,8 + 3,81}{2} = 3,805 \text{ Mpa} \quad (\text{Rov.: 9.1.3-17})$$

$$T_Z = t_{MED}^{STR} + \Delta t = 442,429 + 25 = 467,429 \text{ °C} \quad (\text{Rov.: 9.1.3-18})$$

Látkové vlastnosti média

$\lambda \text{ [W/mK]}$	0.063
Pr	0.9567
$\eta \text{ [Pas]}$	$26,21 \cdot 10^{-6}$
$\nu \text{ [m}^3\text{/Kg]}$	0.0833

Rychlost media

$$w_{PP} = \frac{M_{PP}}{f} \cdot v = \frac{18.056}{0.046} \cdot 0.0833 = 32.559 \text{ m/s} \quad (\text{Rov.: 9.1.3-19})$$

Průřez pro medium

$$f = n_{TR1} \cdot n_H \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 31 \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot 0.0308^2}{4} = 0.046 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 9.1.3-20})$$

9.1.4 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}} = \frac{637.5 - 617.142}{\ln \frac{637.5}{617.142}} = 627.266^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 9.1.4-1})$$

$$\Delta t_V = t_{SP}^{in} - t_{MED}^{out} = 1087.5 - 450 = 637.5^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_M = t_{SP}^{out} - t_{MED}^{in} = 1052 - 434.8 = 617.142^\circ\text{C}$$

9.1.5 Rovnice sdílení tepla

$$Q_V^{MřížPP2} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{PV}} \cdot 10^{-3} = \frac{87.738 \cdot 627.266 \cdot 16.284}{1.625} \cdot 10^{-3} = 551.468 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 9.1.5-1})$$

9.2 Část Závěsných trubek**Rozměry**

Vnější průměr trubek $D = 0.0318 \text{ m}$

Vnitřní průměr trubek $d = 0.025 \text{ m}$

Počet trubek $n_{TR} = 62$

Délka trubky $l_{TR} = 2.1 \text{ m}$

$$S^{Z.TR.} = \pi \cdot D \cdot l_{TR} \cdot n_{TR} = \pi \cdot 0.0318 \cdot 2.1 \cdot 62 = 13.007 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 9.2-1})$$

$$S_{poměr}^{Z.TR.} = \frac{S^{Z.TR.}}{S_{celk.}} = \frac{13.007}{29.291} = 0.444$$

9.2.1 Rovnice tepelné bilance

$$i_{MED}^{out} = Q_b^{VRAT.KOM} \cdot S_{poměr}^{Z.TR} \cdot \frac{M_{PV}}{M_{PP} - M_{vstřik}} + i_{MED}^{in} \quad (\text{Rov.: 9.2.2-1})$$

$$i_{MED}^{out} = -714.781 \cdot 0.444 \cdot \frac{1.625}{18.056 - 1.485} + 2800.8 = 2831.949 \text{ kJ/m}^3$$

-této entalpií odpovídá teplota 259.6°C při tlaku 3.98Mpa

9.2.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{STR}^{SP} + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)}} \quad (\text{Rov.: 9.2.2-2})$$

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.8 + 1}{2} \cdot 0.122 \cdot (1069.75 + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(279.977 + 273.15)}{(1069.75 + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(279.977 + 273.15)}{(1069.75 + 273.15)}}$$

$$\alpha_S = 24.795 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

stupeň černosti stěny $a_{st} = 0,8$ [1]

hodnoty stejné, jako u jako u přehřívákové mříže PP2 (rovnice)

-stupeň černosti proudu spalin (Rov.: 9.1.3-11)

-optická hustota spalin (Rov.: 9.1.3-12)

-součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny (Rov.: 9.1.3-13)

-efektivní tloušťka sálavé vrstvy (Rov.: 9.1.3-14)

$$T_Z = t_{MED}^{STR} + \Delta t = 254.977 + 25 = 279.977^\circ \text{C} \quad (\text{Rov.: 9.2.2-3})$$

Střední teplota proudu media

$$t_{MED}^{STR} = \frac{t_{MED}^{out} + t_{MED}^{in}}{2} = \frac{259.6 + 250.354}{2} = 254.977^\circ \text{C} \quad (\text{Rov.: 9.2.2-4})$$

9.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}} = \frac{637.5 - 617.142}{\ln \frac{637.5}{617.142}} = 814.568^\circ \text{C} \quad (\text{Rov.: 9.2.3-1})$$

$$\Delta t_V = t_{SP}^{in} - t_{MED}^{in} = 1087.5 - 250.354 = 837.146^\circ \text{C}$$

$$\Delta t_M = t_{SP}^{out} - t_{MED}^{out} = 1052 - 259.6 = 792.401^\circ \text{C}$$

9.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_V^{Z.TR.} = \frac{\alpha_S \cdot \Delta t \cdot S}{M_{PV}} \cdot 10^{-3} = \frac{24.795 \cdot 814.568 \cdot 13.007}{1.625} \cdot 10^{-3} = 161.665 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 9.2.4-1})$$

9.2.5 Celková bilance

$$\Delta Q = \frac{Q_b^{VRAT.KOM} - (Q_V^{MřížPP2} + Q_V^{Z.TR.})}{Q_b^{VRAT.KOM}} \cdot 100 \quad (\text{Rov.: 9.2.5-1})$$

$$\Delta Q = \frac{714.781 - (551.468 + 161.665)}{714.781} \cdot 100 = 0.231\%$$

10 Přehříváku PP2+ZTR

Výší teplota spalin na konci ohniště při spalování plynu způsobila přehřívání páry v přehříváku, konstruovaném na teploty spalin při spalování mazutu. Teplota sice byla snížena úpravou spalovací komory, ale ne dostatečně na to, aby bez úprav druhého stupně přehříváku, i při max. množství vstřiku, které je omezeno velikostí kondenzátoru, nedocházelo k přehřívání páry více, než je požadovaná teplota 450°C. Byla zvažována varianta přidání druhého kondenzátoru, čímž bychom dostali větší množství vstřiku a pára mohla být regulována druhým vstřikem na výstupu z druhého stupně přehříváku. Přidáním druhého kondenzátoru má ovšem za následek přehřátí vody na vstupu do prvního stupně ekonomizéru na vyšší teplotu. Tím by docházelo k vysoké teplotě vody na výstupu z druhého stupně ekonomizéru. Kondenzátory by byly zapojeny v sérii, čím větší množství vstřiku, tím vyšší teplota vody na vstupu do prvního stupně ekonomizéru. Proto se přistoupilo ke zkrácení délky hada trubek a díky tomu množství vstřiku bylo dostatečné k regulaci páry pro požadovanou teplotu na výstupu. Zkrácení délky trubky hada muselo být voleno s možností se znovu napojit na trasu trubek viz. příloha (24-1) Rozměry převzaty z technické dokumentace kotle.

10.1 Přejířvákú PP2

Rozměry

Šířka tahu

$$a = 2.68 \text{ m}$$

Hloubka tahu

$$b = 4.39 \text{ m}$$

Vnější průměr trubek

$$D = 0.038 \text{ m}$$

Vnitřní průměr trubek

$$d = 0.0308 \text{ m}$$

Počet řad

$$z = 10$$

Počet trubek v první řadě

$$n_{TR1} = 31$$

Počet hadů

$$n_H = 2$$

Délka trubky

$$l_{TR} = 2.6 \text{ m}$$

Délka hada trubky

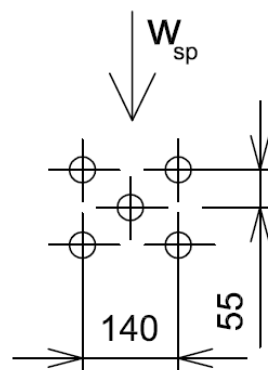
$$l_{TRH} = 13.476 \text{ m}$$

Rozteč trubek

$$s_1 = 0.140 \text{ m}$$

Rozteč trubek

$$s_2 = 0.055 \text{ m}$$



Obr.10.1-1: Rozteče trubek PP2

Výhřevná plocha

$$S^{PP2} = \pi \cdot D \cdot l_{TRH} \cdot n_H \cdot n_{TR1} = \pi \cdot 0.038 \cdot 13.476 \cdot 2 \cdot 31 = 99.744 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 10.1-1})$$

$$S^{Celk.} = S^{PP2} + S^{Z.TR.} = 99.744 + 4.584 = 104.327 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 10.1-2})$$

$$S^{Z.TR.} \text{ viz. (Rov.: 10.2-1)}$$

$$S_{poměr}^{PP2} = \frac{S^{PP2}}{S^{Celk.}} = \frac{99.744}{104.327} = 0.95607 \quad (\text{Rov.: 10.1-3})$$

Spaliny			medium (pára)		
	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$p [\text{Mpa}]$
Vstup	1052	19217.041	329.3	3041.703	3.9
výstup	897	16210.558	434.8	3298.166	3.8

10.1.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b^{PP2+ZTR} = \varphi \cdot (I_{SP}^{in} - I_{SP}^{out}) \quad (\text{Rov.: 10.1.1-1})$$

$$Q_b^{PP2+ZTR} = 0.991 \cdot (19217.041 - 16210.558) = 2980.446 \text{ kJ/m}^3$$

10.1.2 Rovnice tepelné bilance

$$i_{MED}^{in} = -Q_b^{PP2+ZTR} \cdot S_{poměr}^{PP2} \cdot \frac{M_{PV}}{M_{PP}} + i_{MED}^{out} \quad (\text{Rov.: 10.1.2-1})$$

$$i_{MED}^{in} = -2980.446 \cdot 0.95607 \cdot \frac{1.625}{18.056} + 3298.166 = 3041.703 \text{ kJ/m}^3$$

-této entalpií odpovídá teplota 329.3°C při tlaku 3.9Mpa

Střední teplota proudu spalín

$$t_{STR}^{SP} = \frac{t_{SP}^{in} + t_{SP}^{out}}{2} = \frac{1052 + 897}{2} = 974.5^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 10.1.2-2})$$

Látkové vlastnosti spalín

$\lambda [W/mK]$	0.1137
Pr	0.613
$\nu [m^2/s]$	$176 \cdot 10^{-6}$

Rychlost spalín

$$w_{SP} = \frac{M_{PV} \cdot O_{SPsRec}}{F_{SP}} \cdot \left(1 + \frac{t_{STR}^{SP}}{273,15}\right) \quad (\text{Rov.: 10.1.2-3})$$

$$w_{SP} = \frac{1.625 \cdot 12.073}{9.174} \cdot \left(1 + \frac{974.5}{273,15}\right) = 9.769 \text{ m/s}$$

Objem spalín při střední hodnotě α_o a recirkulaci

$$\alpha_{STR} = \frac{\alpha_{1.05} + \alpha_{1.06}}{2} = \frac{1.05 + 1.06}{2} = 1.055 \quad (\text{Rov.: 10.1.2-4})$$

$$O_{SP} = O_{SPmin}^V + (\alpha_o - 1) \cdot O_{VZmin}^V \quad (\text{Rov.: 10.1.2-5})$$

$$O_{SP} = 10.403 + (1.055 - 1) \cdot 9.398 = 10.920 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$O_{SPsRec} = O_{SP} + O_{SPRec} = 10.920 + 1.153 = 12.073 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 10.1.2-6})$$

Objemové části tříatomových plynů

-s uvážením střední hodnoty α_o a recirkulace

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_{2SRec}}}{O_{SPSRec}} = \frac{1.102}{12.073} = 0.091 \quad (\text{Rov.: 10.1.2-7})$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O_{SRec}}}{O_{SPSRec}} = \frac{2.415}{12.073} = 0.2 \quad (\text{Rov.: 10.1.2-8})$$

Součet objemových částí tříatomových plynů

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0.091 + 0.2 = 0.291 \quad (\text{Rov.: 10.1.2-9})$$

Světlý průřez spalin

$$F_{SP} = a \cdot b - D \cdot l_{TR} \cdot n_{TR1} = 2.680 \cdot 4.39 - 0.038 \cdot 2.6 \cdot 31 = 9.174 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 10.1.2-10})$$

10.1.3 Součinitel prostupu tepla

Při spalování plynu po spalování mazutu se pro součinitel tepelné efektivnosti ψ bere střední hodnota z hodnot pro mazut a plyn

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0.74 \cdot 116.913}{1 + \frac{116.913}{1561.559}} = 80.489 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 10.1.3-1})$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_K + \alpha_S = 91.697 + 25.216 = 116.913 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 10.1.3-2})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_K = c_Z \cdot c_S \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{Rov.: 10.1.3-3})$$

$$\alpha_K = 1 \cdot 0.364 \cdot \frac{0.1137}{0.038} \cdot \left(\frac{15.749 \cdot 0.038}{176 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0.613^{0,33} = 91.697 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Oprava pro vystřídání uspořádání trubek

Oprava c_S na uspořádání svazku podle σ_1 a φ_σ

$$c_S = 0.34 \cdot \varphi_\sigma^{0.1} = 0.34 \cdot 1.999^{0.1} = 0.364 \quad (\text{Rov.: 10.1.3-4})$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0.140}{0.038} = 3.684 \quad (\text{Rov.: 10.1.3-5})$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0.055}{0.038} = 1.447 \quad (\text{Rov.: 10.1.3-6})$$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 3.684^2 + 1.447^2} = 2.343 \quad (\text{Rov.: 10.1.3-7})$$

Hodnota φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{3.684 - 1}{2.343 - 1} = 1.999 \quad (\text{Rov.: 10.1.3-8})$$

Oprava c_Z na počet podélných řad

$$c_Z = 1 \quad (\text{Rov.: 10.1.3-9})$$

-pro $z \geq 10$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{STR}^{SP} + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)}} \quad (\text{Rov.: 10.1.3-10})$$

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.8 + 1}{2} \cdot 0.130 \cdot (974.5 + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(407.098 + 273.15)}{(974.5 + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(407.098 + 273.15)}{(974.5 + 273.15)}}$$

$$\alpha_S = 25.216 \text{ W/m}^2\text{K}$$

-stupeň černosti stěny $a_{st} = 0,8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0.139} = 0.130 \quad (\text{Rov.: 10.1.3-11})$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{SP} \cdot r_{SP} + k_P \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (\text{Rov.: 10.1.3-12})$$

$$k \cdot p \cdot s = (24.084 \cdot 0.291 + 0 \cdot 0) \cdot 0.1 \cdot 0.198 = 0.139$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{STR}^{SP} + 273.15}{1000} \right) \quad (\text{Rov.: 10.1.3-13})$$

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0.2}{3,16 \cdot \sqrt{0.029 \cdot 0.198}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{974.5 + 273.15}{1000} \right)$$

$$k_{SP} = 24.084 / m \cdot Mpa$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0.038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0.140 \cdot 0.055}{0.038^2} - 1 \right) = 0.198m \quad (\text{Rov.: 10.1.3-14})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně media

$$\alpha_2 = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (\text{Rov.: 10.1.3-15})$$

$$\alpha_2 = 0.023 \cdot \frac{0.063}{0.0308} \cdot \left(\frac{32.559 \cdot 0.0308}{23.58 \cdot 10^{-6} \cdot 0.0738} \right)^{0,8} \cdot 0.989^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$= 1561.559 W/m^2 K$$

Střední teplota proudu media

$$t_{MED}^{STR} = \frac{t_{MED}^{out} + t_{MED}^{in}}{2} = \frac{434.8 + 329.3}{2} = 382.098 \text{ } ^\circ C \quad (\text{Rov.: 10.1.3-16})$$

Střední tlak proudu media

$$p_{MED}^{STR} = \frac{p_{MED}^{out} + p_{MED}^{in}}{2} = \frac{3.81 + 3.9}{2} = 3.855 \text{ } Mpa \quad (\text{Rov.: 10.1.3-17})$$

$$T_Z = t_{MED}^{STR} + \Delta t = 382.098 + 25 = 407.098 \text{ } ^\circ C \quad (\text{Rov.: 10.1.3-18})$$

Látkové vlastnosti média

$\lambda [W/mK]$	0.057
Pr	0.989
$\eta [Pas]$	$23.58 \cdot 10^{-6}$
$\nu [m^3/Kg]$	0.0738

Rychlost media

$$w_{PP} = \frac{M_{PP}}{f} \cdot \nu = \frac{18.056}{0.046} \cdot 0.0738 = 28.846 m/s \quad (\text{Rov.: 10.1.3-19})$$

Průřez pro medium

$$f = n_{TR1} \cdot n_H \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 31 \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot 0.0308^2}{4} = 0.046 m^2 \quad (\text{Rov.: 10.1.3-20})$$

10.1.4 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}} = \frac{617.142 - 567.662}{\ln \frac{637.5}{617.142}} = 592.057^\circ C \quad (\text{Rov.: 10.1.4-1})$$

$$\Delta t_V = t_{SP}^{in} - t_{MED}^{out} = 1052 - 434.8 = 617.142^\circ C$$

$$\Delta t_M = t_{SP}^{out} - t_{MED}^{in} = 897 - 329.3 = 567.662^\circ C$$

10.1.5 Rovnice sdílení tepla

$$Q_V^{PP2} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{PV}} \cdot 10^{-3} = \frac{80.489 \cdot 592.057 \cdot 99.744}{1.625} \cdot 10^{-3} = 2924.96 kJ/m^3 \quad (\text{Rov.: 10.1.5-1})$$

10.2 Část Závěsných trubek

Rozměry

Vnější průměr trubek	$D = 0.0318 m$
Vnitřní průměr trubek	$d = 0.025 m$
Počet trubek	$n_{TR} = 62$
Délka trubky	$l_{TR} = 0.74 m$

Výhřevná plocha

$$S^{Z.TR.} = \pi \cdot D \cdot l_{TR} \cdot n_{TR} = \pi \cdot 0.0318 \cdot 0.74 \cdot 62 = 4.584 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 10.2-1})$$

$$S_{poměr}^{Z.TR.} = \frac{S^{Z.TR.}}{S_{celk.}} = \frac{4.584}{104.327} = 0.04393 \quad (\text{Rov.: 10.2-2})$$

10.2.1 Rovnice tepelné bilance

$$i_{MED}^{out} = Q_b^{PP2+ZTR} \cdot S_{poměr}^{Z.TR.} \cdot \frac{M_{PV}}{M_{PP} - M_{vstřik}} + i_{MED}^{in} \quad (\text{Rov.: 10.2.1-1})$$

$$i_{MED}^{out} = 2980.446 \cdot 0.04393 \cdot \frac{1.625}{18.056 - 1.485} + 2831.949 = 2844.79 \text{ kJ/m}^3$$

-této entalpií odpovídá teplota 263.6°C při tlaku 3.98Mpa

10.2.2 Součinitel prostupu tepla

Při spalování plynu po spalování mazutu se pro součinitel tepelné efektivnosti ψ bere střední hodnota z hodnot pro mazut a plyn

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0.740 \cdot 40.666}{1 + \frac{40.666}{1618.69}} = 29.355 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 10.2.2-1})$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_K + \alpha_S = 18.536 + 22.130 = 40.666 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 10.2.2-2})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_K = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (\text{Rov.: 10.2.2-3})$$

$$\alpha_K = 0.023 \cdot \frac{0.1137}{0.201} \cdot \left(\frac{9.769 \cdot 0.201}{176 \cdot 10^{-6}} \right)^{0.8} \cdot 0.613^{0.4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 18.536 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{SP}}{O} = \frac{4 \cdot 9.174}{182.656} = 0.201 \text{ m} \quad (\text{Rov.: 10.2.2-4})$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b + n_{TR1} \cdot (D + a)) \quad (\text{Rov.: 10.2.2-5})$$

$$O = 2 \cdot (2.68 + 4.39 + 31 \cdot (0.038 + 2.68)) = 182.656$$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{STR}^{SP} + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)}} \quad (\text{Rov.: 10.2.2-6})$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.8 + 1}{2} \cdot 0.122 \cdot (1069.75 + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(286.588 + 273.15)}{(1069.75 + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(286.588 + 273.15)}{(1069.75 + 273.15)}}$$

$$\alpha_s = 22.130 \text{ W/m}^2\text{K}$$

stupeň černosti stěny $a_{st} = 0,8$ [1]**hodnoty stejné, jako u jako u PP2**

-stupeň černosti proudu spalín (Rov.: 10.1.3-11)

-optická hustota spalín (Rov.: 10.1.3-12)

-součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny (Rov.: 10.1.3-13)

-efektivní tloušťka sálavé vrstvy (Rov.: 10.1.3-14)

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně media

$$\alpha_2 = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (\text{Rov.: 10.2.2-7})$$

$$\alpha_2 = 0.023 \cdot \frac{0.0507}{0.0308} \cdot \left(\frac{29.409 \cdot 0.0308}{18.034 \cdot 10^{-6} \cdot 0.0523} \right)^{0,8} \cdot 1.2467^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1618.69 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota proudu média

$$t_{MED}^{STR} = \frac{t_{MED}^{out} + t_{MED}^{in}}{2} = \frac{263.6 + 259.6}{2} = 261.588^{\circ}C \quad (\text{Rov.: 10.2.2-8})$$

Střední tlak proudu média

$$p_{MED}^{STR} = \frac{p_{MED}^{out} + p_{MED}^{in}}{2} = \frac{3.98 + 3.98}{2} = 3.98 \text{ Mpa} \quad (\text{Rov.: 10.2.2-9})$$

$$T_Z = t_{MED}^{STR} + \Delta t = 261.588 + 25 = 286.588^{\circ}C \quad (\text{Rov.: 10.2.2-10})$$

Látkové vlastnosti média

$\lambda [W/mK]$	0.0507
Pr	1.2467
$\eta [Pas]$	$18.034 \cdot 10^{-6}$
$\nu [m^3/Kg]$	0.0523

Rychlost média

$$w_{PP} = \frac{M_{PP} - M_{vstřik}}{f} \cdot \nu = \frac{18.056 - 1.485}{0.029} \cdot 0.0523 = 29.409 \text{ m/s} \quad (\text{Rov.: 10.2.2-11})$$

$$f = n_{TR1} \cdot n_H \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 31 \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot 0.0308^2}{4} = 0.029 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 10.2.2-12})$$

10.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}} = \frac{792.4 - 633.4}{\ln \frac{792.4}{633.4}} = 709.948^{\circ}C \quad (\text{Rov.: 10.2.3-1})$$

$$\Delta t_V = t_{SP}^{in} - t_{MED}^{in} = 1052 - 259.6 = 792.4^{\circ}C$$

$$\Delta t_M = t_{SP}^{out} - t_{MED}^{out} = 897 - 263.6 = 633.4^{\circ}C$$

10.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_V^{Z.TR.} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{PV}} \cdot 10^{-3} = \frac{29.355 \cdot 709.948 \cdot 4.584}{1.625} \cdot 10^{-3} = 58.782 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 10.2.4-1})$$

10.2.5 Celková bilance

$$\Delta Q = \frac{Q_b^{PP2+ZTR} - (Q_V^{PP2} + Q_V^{Z.TR.})}{Q_b^{PP2+ZTR}} \cdot 100 \quad (\text{Rov.: 10.2.5-1})$$

$$\Delta Q = \frac{2980.446 - (2924.96 + 58.782)}{2980.446} \cdot 100 = -0.111\%$$

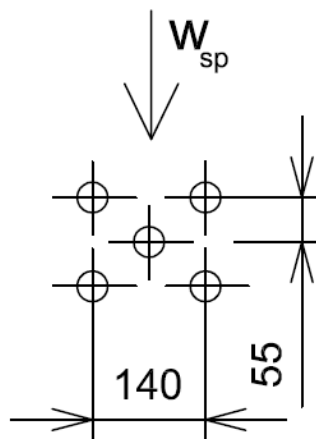
11 Přehříváku PP1+ZTR

První stupeň přehříváku stupně zůstal zachován jen byl posunut pro získání prostoru pro dodatkový výparník. Rozměry převzaty z technické dokumentace kotle.

11.1 Přehříváku PP1

Rozměry

Šířka tahu	$a = 2.2 \text{ m}$
Hloubka tahu	$b = 4.39 \text{ m}$
Vnější průměr trubek	$D = 0.038 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubek	$d = 0.0308 \text{ m}$
Počet řad	$z = 20$
Počet trubek v první řadě	$n_{TR1} = 31$
Počet hadů	$n_H = 2$
Délka trubky	$l_{TR} = 2.12 \text{ m}$
Délka hada trubky	$l_{TRH} = 22.066 \text{ m}$
Rozteč trubek	$s_1 = 0.140 \text{ m}$
Rozteč trubek	$s_2 = 0.055 \text{ m}$



Obr.11.1-1: Rozteče trubek PP1

Výhřevná plocha

$$S^{PP1} = \pi \cdot D \cdot l_{TRH} \cdot n_H \cdot n_{TR1} = \pi \cdot 0.038 \cdot 22.066 \cdot 2 \cdot 31 = 163.324 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 11.1-1})$$

$$S^{Celk.} = S^{PP1} + S^{Z.TR.} = 163.324 + 9.291 = 172.614 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 11.1-2})$$

$S^{Z,TR}$ viz. (Rov.: 11.2-2)

$$S_{poměr}^{PP1} = \frac{S^{PP1}}{S^{Celk.}} = \frac{163.324}{172.614} = 0.94618 \quad (\text{Rov.: 11.1-3})$$

Spaliny			medium (pára)		
	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$p [\text{Mpa}]$
Vstup	897	16210.558	269.6	2865.403	3.96
výstup	697	12383.024	400.5	3.217.485	3.9

11.1.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b^{PP1+ZTR} = \varphi \cdot (I_{SP}^{in} - I_{SP}^{out}) \quad (\text{Rov.: 11.1.1-1})$$

$$Q_b^{PP1+ZTR} = 0.991 \cdot (16210.558 - 12383.024) = 3794.3873 \text{ kJ/m}^3$$

11.1.2 Rovnice tepelné bilance

$$i_{MED}^{in} = -Q_b^{PP1+ZTR} \cdot S_{poměr}^{PP1} \cdot \frac{M_{PV}}{M_{PP} - M_{vstřík}} + i_{MED}^{out} \quad (\text{Rov.: 11.1.2-1})$$

$$i_{MED}^{in} = -3794.3873 \cdot 0.94618 \cdot \frac{1.625}{18.056 - 1.485} + 3.217.485 = 2865.403 \text{ kJ/m}^3$$

-této entalpií odpovídá teplota 269.6°C při tlaku 3.96Mpa

Střední teplota proudu spalin

$$t_{STR}^{SP} = \frac{t_{SP}^{in} + t_{SP}^{out}}{2} = \frac{897 + 697}{2} = 797^{\circ}\text{C} \quad (\text{Rov.: 11.1.2-2})$$

Látkové vlastnosti spalin

$\lambda [W/mK]$	0.0968
Pr	0.63
$\nu [m^2/s]$	$136 \cdot 10^{-6}$

Rychlost spalin

$$w_{SP} = \frac{M_{PV} \cdot O_{SPsRec}}{F_{SP}} \cdot \left(1 + \frac{t_{STR}^{SP}}{273,15}\right) \quad (\text{Rov.: 11.1.2-3})$$

$$w_{SP} = \frac{1.625 \cdot 12.167}{7.161} \cdot \left(1 + \frac{797}{273,15}\right) = 10.818 \text{ m/s}$$

Objem spalín při střední hodnotě α_o a recirkulaci

$$\alpha_{STR} = \frac{\alpha_{1.06} + \alpha_{1.07}}{2} = \frac{1.06 + 1.07}{2} = 1.065 \quad (\text{Rov.: 11.1.2-4})$$

$$O_{SP} = O_{SPmin}^V + (\alpha_o - 1) \cdot O_{VZmin}^V \quad (\text{Rov.: 11.1.2-5})$$

$$O_{SP} = 10.403 + (1.065 - 1) \cdot 9.398 = 11.014 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$O_{SPsRec} = O_{SP} + O_{SPRec} = 11.014 + 1.153 = 12.167 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 11.1.2-6})$$

Objemové části tříatomových plynů

-s uvážením střední hodnoty α_o a recirkulace

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2sRec}}{O_{SPsRec}} = \frac{1.102}{12.167} = 0.091 \quad (\text{Rov.: 11.1.2-7})$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O sRec}}{O_{SPsRec}} = \frac{2.413}{12.167} = 0.198 \quad (\text{Rov.: 11.1.2-8})$$

Součet objemových částí tříatomových plynů

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0.091 + 0.198 = 0.289 \quad (\text{Rov.: 11.1.2-9})$$

Světlý průřez spalín

$$F_{SP} = a \cdot b - D \cdot l_{TR} \cdot n_{TR1} = 2.2 \cdot 4.39 - 0.038 \cdot 2.12 \cdot 31 = 7.161 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 11.1.2-10})$$

11.1.3 Součinitel prostupu tepla

Při spalování plynu po spalování mazutu se pro součinitel tepelné efektivity ψ bere střední hodnota z hodnot pro mazut a plyn

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0.74 \cdot 116.282}{1 + \frac{116.282}{1487.453}} = 79.809 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 11.1.3-1})$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_K + \alpha_S = 97.610 + 18.672 = 116.282 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 11.1.3-2})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_K = c_Z \cdot c_S \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{Rov.: 11.1.3-3})$$

$$\alpha_K = 1 \cdot 0.364 \cdot \frac{0.0968}{0.038} \cdot \left(\frac{10.818 \cdot 0.038}{136 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0.63^{0,33} = 97.610 / m^2 K$$

Oprava pro vystřídané uspořádání trubek

Oprava c_S na uspořádání svazku podle σ_1 a φ_σ

$$c_S = 0.34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0.34 \cdot 1.999^{0,1} = 0.364 \quad (\text{Rov.: 11.1.3-4})$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0.140}{0.038} = 3.684 \quad (\text{Rov.: 11.1.3-5})$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0.055}{0.038} = 1.447 \quad (\text{Rov.: 11.1.3-6})$$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 3.684^2 + 1.447^2} = 2.343 \quad (\text{Rov.: 11.1.3-7})$$

Hodnota φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{3.684 - 1}{2.343 - 1} = 1.999 \quad (\text{Rov.: 11.1.3-8})$$

Oprava c_Z na počet podélných řad

$$c_Z = 1 \quad (\text{Rov.: 11.1.3-9})$$

-pro $z \geq 10$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{STR}^{SP} + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_Z + 273.15}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)}} \quad (\text{Rov.: 11.1.3-10})$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,130 \cdot (797 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(360,096 + 273,15)}{(797 + 273,15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(360,096 + 273,15)}{(797 + 273,15)}}$$

$$\alpha_s = 18,672 \text{ W/m}^2\text{K}$$

-stupeň černosti stěny $a_{st} = 0,8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,154} = 0,143 \quad (\text{Rov.: 11.1.3-11})$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{SP} \cdot r_{SP} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (\text{Rov.: 11.1.3-12})$$

$$k \cdot p \cdot s = (26,953 \cdot 0,289 + 0 \cdot 0) \cdot 0,1 \cdot 0,198 = 0,154$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{STR}^{SP} + 273,15}{1000} \right) \quad (\text{Rov.: 11.1.3-13})$$

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,198}{3,16 \cdot \sqrt{0,029 \cdot 0,198}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{797 + 273,15}{1000} \right)$$

$$\mathbf{k_{SP} = 26,953 / m \cdot Mpa}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,140 \cdot 0,055}{0,038^2} - 1 \right) = 0,198m \quad (\text{Rov.: 11.1.3-14})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně media

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (\text{Rov.: 11.1.3-15})$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,0531}{0,0308} \cdot \left(\frac{32,559 \cdot 0,0308}{21,51 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0656} \right)^{0,8} \cdot 1,033^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$= 1487,453 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota proudu média

$$t_{MED}^{STR} = \frac{t_{MED}^{out} + t_{MED}^{in}}{2} = \frac{400.5 + 269.6}{2} = 335.096 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 11.1.3-16})$$

Střední tlak proudu média

$$p_{MED}^{STR} = \frac{p_{MED}^{out} + p_{MED}^{in}}{2} = \frac{3.9 + 3.96}{2} = 3.93 \text{ Mpa} \quad (\text{Rov.: 11.1.3-17})$$

$$T_Z = t_{MED}^{STR} + \Delta t = 335.096 + 25 = 360.096^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 11.1.3-18})$$

Látkové vlastnosti média

$\lambda [W/mK]$	0.0531
Pr	1.033
$\eta [Pas]$	$21.51 \cdot 10^{-6}$
$\nu [m^3/Kg]$	0.0656

Rychlost média

$$w_{PP} = \frac{M_{PP} - M_{vstřik}}{f} \cdot \nu = \frac{18.056 - 1.485}{0.046} \cdot 0.0738 = 23.532 \text{ m/s} \quad (\text{Rov.: 11.1.3-19})$$

Průřez pro medium

$$f = n_{TR1} \cdot n_H \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 31 \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot 0.0308^2}{4} = 0.046 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 11.1.3-20})$$

11.1.4 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}} = \frac{496.5 - 427.4}{\ln \frac{496.5}{427.4}} = 461^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 11.1.4-1})$$

$$\Delta t_V = t_{SP}^{in} - t_{MED}^{out} = 897 - 400.5 = 496.5^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_M = t_{SP}^{out} - t_{MED}^{in} = 697 - 269.6 = 427.4^\circ\text{C}$$

11.1.5 Rovnice sdílení tepla

$$Q_V^{PP1} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{PV}} \cdot 10^{-3} = \frac{79.809 \cdot 461 \cdot 461.039}{1.625} \cdot 10^{-3} = 3698.0483 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 11.1.5-1})$$

11.2 Část Závěsných trubek

Při zkracování délky hada druhého stupně přehříváku byly zkráceny i závěsné trubky před vstupem do prvního stupně přehříváku, z důvodu posunutí přehříváků pro získání většího prostoru pro dodatkový výparník, umístěn za přehříváky. Rozměry převzaty z technické dokumentace kotle.

Rozměry

Vnější průměr trubek	$D = 0.0318 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubek	$d = 0.025 \text{ m}$
Počet trubek	$n_{TR} = 62$
Délka trubky	$l_{TR} = 1.5 \text{ m}$

Výhřevná plocha

$$S^{Z.TR.} = \pi \cdot D \cdot l_{TR} \cdot n_{TR} = \pi \cdot 0.0318 \cdot 1.5 \cdot 62 = 9.291 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 11.2-1})$$

$$S_{poměr}^{Z.TR.} = \frac{S^{Z.TR.}}{S_{celk.}} = \frac{9.291}{172.614} = 0.05382 \quad (\text{Rov.: 11.2-2})$$

11.2.1 Rovnice tepelné bilance

$$i_{MED}^{out} = Q_b^{PP1+ZTR} \cdot S_{poměr}^{Z.TR.} \cdot \frac{M_{PV}}{M_{PP} - M_{vstřík}} + i_{MED}^{in} \quad (\text{Rov.: 11.2.1-1})$$

$$i_{MED}^{out} = 2980.446 \cdot 0.05382 \cdot \frac{1.625}{18.056 - 1.485} + 2844.79 = 2865.403 \text{ kJ/m}^3$$

-této entalpií odpovídá teplota 269.6°C při tlaku 3.96Mpa

11.2.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{0.740 \cdot 38.615}{1 + \frac{38.615}{2594.55}} = 28.156 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 11.2.2-1})$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_K + \alpha_S = 21.504 + 17.111 = 38.615 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 11.2.2-2})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_K = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{W \cdot d_e}{\nu} \right)^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (\text{Rov.: 11.2.2-3})$$

$$\alpha_K = 0.023 \cdot \frac{0.0968}{0.201} \cdot \left(\frac{9.769 \cdot 0.201}{136 \cdot 10^{-6}} \right)^{0.8} \cdot 0.63^{0.4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 21.504 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{SP}}{O} = \frac{4 \cdot 7.161}{151.936} = 0.189 \text{ m} \quad (\text{Rov.: 11.2.2-4})$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (a + b + n_{TR1} \cdot (D + a)) \quad (\text{Rov.: 11.2.2-5})$$

$$O = 2 \cdot (2.2 + 4.39 + 31 \cdot (0.038 + 2.2)) = 151.936 \quad (\text{Rov.: 11.2.2-6})$$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{STR}^{SP} + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(T_Z + 273.15)}{(797 + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)}} \quad (\text{Rov.: 11.2.2-7})$$

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.8 + 1}{2} \cdot 0.122 \cdot (797 + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(291.6 + 273.15)}{(797 + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(291.6 + 273.15)}{(797 + 273.15)}}$$

$$\alpha_S = 17.111 \text{ W/m}^2\text{K}$$

stupeň černosti stěny $a_{st} = 0,8$ [1]

Hodnoty stejné, jako u jako u PP1

- stupeň černosti proudu spalín (Rov.: 11.1.3-11)
- optická hustota spalín (Rov.: 11.1.3-12)
- součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny (Rov.: 11.1.3-13)
- efektivní tloušťka sálavé vrstvy (Rov.: 11.1.3-14)

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (\text{Rov.: 11.2.2-8})$$

$$\alpha_2 = 0.023 \cdot \frac{0.051}{0.0308} \cdot \left(\frac{30.084 \cdot 0.0308}{18.31 \cdot 10^{-6} \cdot 0.0535} \right)^{0,8} \cdot 1.21^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2594.55 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota proudu média

$$t_{MED}^{STR} = \frac{t_{MED}^{out} + t_{MED}^{in}}{2} = \frac{269.6 + 263.6}{2} = 266.6^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 11.2.2-9})$$

Střední tlak proudu média

$$p_{MED}^{STR} = \frac{p_{MED}^{out} + p_{MED}^{in}}{2} = \frac{3.96 + 3.98}{2} = 3.97 \text{ Mpa} \quad (\text{Rov.: 11.2.2-10})$$

$$T_Z = t_{MED}^{STR} + \Delta t = 266.6 + 25 = 291.6^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 11.2.2-11})$$

Látkové vlastnosti média

λ [W/mK]	0.051
Pr	1.21
η [Pa·s]	$18.31 \cdot 10^{-6}$
ν [m ³ /Kg]	0.0535

Rychlost média

$$w_{PP} = \frac{M_{PP} - M_{vstřik}}{f} \cdot \nu = \frac{18.056 - 1.485}{0.029} \cdot 0.0535 = 30.084 \text{ m/s} \quad (\text{Rov.: 11.2.2-12})$$

$$f = n_{TR1} \cdot n_H \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 31 \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot 0.0308^2}{4} = 0.029 m^2 \quad (\text{Rov.: 11.2.2-13})$$

11.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}} = \frac{633.4 - 427.4}{\ln \frac{633.4}{427.4}} = 523.755^\circ C \quad (\text{Rov.: 11.2.3-1})$$

$$\Delta t_V = t_{SP}^{in} - t_{MED}^{in} = 897 - 263.6 = 633.4^\circ C$$

$$\Delta t_M = t_{SP}^{out} - t_{MED}^{out} = 697 - 269.6 = 427.4^\circ C$$

11.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_V^{Z.TR.} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{PV}} \cdot 10^{-3} = \frac{28.156 \cdot 523.755 \cdot 9.291}{1.625} \cdot 10^{-3} = 84.312 kJ / m^3 \quad (\text{Rov.: 11.2.3-1})$$

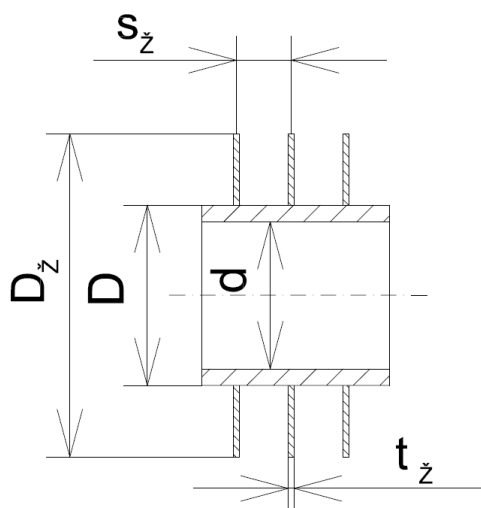
11.2.5 Celková bilance

$$\Delta Q = \frac{Q_b^{PP1+ZTR} - (Q_V^{PP1} + Q_V^{Z.TR.})}{Q_b^{PP2+ZTR}} \cdot 100 \quad (\text{Rov.: 11.2.5-1})$$

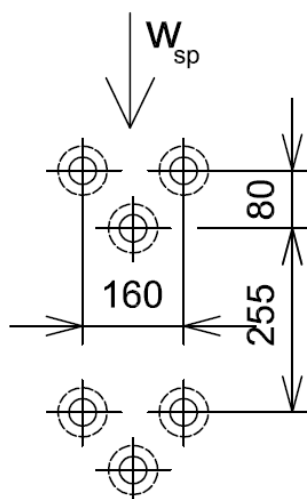
$$\Delta Q = \frac{3794.3873 - (3698.048 + 84.312)}{3794.3873} \cdot 100 = 0.317\%$$

12 Dodatkový výparník

Důsledkem zkrácení přehříváku bylo menší odebrané teplo spalínám. Docházelo k varu vody na výstupu z druhého stupně ekonomizéru. Proto mezi první stupeň přehříváku a druhý stupeň ekonomizéru byl přidán dodatkový výparník tvořen z žebrovaných trubek. Musel být dodržen sklon trubek 5° pro přirozenou cirkulaci v trubkách. Napojen byl na výparník ve spalovací komoře, na každou druhou trubku. Né na trubku, na kterou byl výše napojen „nos“ ve spalovací komoře. Trubky výparníku $D = 0.060 m$ byly protáhnuty do druhého tahu a tam rozdvojeny do dvou $D = 0.038 m$. Tímto byla dána příčná rozteč. Při sklonu trubek 5° nemusí být brán ohled na šikmé proudění. viz. příloha 24-2



Obr.12-1: Žebrování



Obr.12-2: Rozteče tr. dodatkového výparníku

Rozměry

Šířka tahu

$$a = 2.2 \text{ m}$$

Hloubka tahu

$$b = 4.39 \text{ m}$$

Vnější průměr trubky

$$D = 0.038 \text{ m}$$

Počet řad

$$z = 14$$

Počet trubek v první řadě

$$n_{TR1} = 31$$

Počet hadů

$$n_H = 2$$

Délka trubky

$$l_{TR} = 2.159 \text{ m}$$

Délka hada trubky

$$l_{TRH} = 21.771 \text{ m}$$

Rozteč trubek

$$s_1 = 0.160 \text{ m}$$

Rozteč trubek

$$s_2 = 0.168 \text{ m}$$

Tloušťka žebra

$$t_z = 0.001 \text{ m}$$

Průměr žeber

$$D_z = 0.068 \text{ m}$$

Rozteč žeber

$$s_z = 0.005 \text{ m}$$

Počet žeber/m

$$n_z = 200/\text{m}$$

Rozteč je proměnná zavádí se do výpočtu střední hodnota rozteče

$$s_1 = \frac{s_{11} + s_{12}}{2} = \frac{0.08 + 0.255}{2} = 0.168 \text{ m}$$

(Rov.: 12-1)

Výhřevná plocha

$$S^{Dot.výp} = l_{TRH} \cdot n_H \cdot n_{TR1} \cdot \pi \cdot \left(D + \frac{(D_z - D)^2}{4} \cdot 2 \cdot n_z + D_z \cdot t_z \cdot n_z - D \cdot t_z \cdot n_z \right)$$

(Rov.: 12-2)

$$= 21.771 \cdot 2 \cdot 31 \cdot \pi \cdot \left(0.038 + \frac{(0.068 - 0.038)^2}{4} \cdot 2 \cdot 200 + 0.068 \cdot 0.001 \cdot 200 - 0.068 \cdot 0.001 \cdot 200 \right)$$

$$S^{Dot.výp} = 494.911 \text{ m}^2$$

Spaliny			medium (pára)	
	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$t [^{\circ}\text{C}]$	$p [\text{Mpa}]$
Vstup	697	12383.024	250.354	4
výstup	485.5	8456.291	250.354	4

12.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b^{Dot.výp} = \varphi \cdot (I_{SP}^{in} - I_{SP}^{out})$$

(Rov.: 12.1-1)

$$Q_b^{Dot.výp} = 0.991 \cdot (12383.024 - 8456.291) = 3892.727 \text{ kJ/m}^3$$

Střední teplota proudu spalin

$$t_{STR}^{SP} = \frac{t_{SP}^{in} + t_{SP}^{out}}{2} = \frac{697 + 485.5}{2} = 591.250^{\circ}\text{C}$$

(Rov.: 12.1-2)

Látkové vlastnosti spalin

$\lambda [W/mK]$	0.0775
Pr	0.65
$\nu [m^2/s]$	$93 \cdot 10^{-6}$

Objem spalin při střední hodnotě α_o a recirkulaci

$$\alpha_{STR} = \frac{\alpha_{1.07} + \alpha_{1.08}}{2} = \frac{1.07 + 1.08}{2} = 1.075$$

(Rov.: 12.1-3)

$$O_{SP} = O_{SPmin}^V + (\alpha_o - 1) \cdot O_{VZmin}^V$$

(Rov.: 12.1-4)

$$O_{SP} = 10.403 + (1.075 - 1) \cdot 9.398 = 11.108 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$O_{SPsRec} = O_{SP} + O_{SPRec} = 11.108 + 1.153 = 12.261 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 12.1-5})$$

Objemové části tříatomových plynů

-s uvážením střední hodnoty α_o a recirkulace

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2sRec}}{O_{SPsRec}} = \frac{1.101}{12.261} = 0.09 \quad (\text{Rov.: 12.1-6})$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2OsRec}}{O_{SPsRec}} = \frac{2.411}{12.261} = 0.197 \quad (\text{Rov.: 12.1-7})$$

Součet objemových částí tříatomových plynů

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0.09 + 0.197 = 0.291 \quad (\text{Rov.: 12.1-8})$$

Světlý průřez spalín

$$F_{SP} = a \cdot b - (l_{TR} \cdot n_{TR1} \cdot D + l_{TR} \cdot n_{TR1} \cdot n_{\check{z}} \cdot h_{\check{z}} \cdot t_{\check{z}}) \quad (\text{Rov.: 12.1-9})$$

$$= 2.2 \cdot 4.39 - (2.159 \cdot 31 \cdot 0.038 + 2.159 \cdot 31 \cdot 200 \cdot 0.015 \cdot 0.001) = 7.268 \text{ m}^2$$

12.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_{1r}} + \frac{1}{\alpha_{2r}} \cdot \frac{S_{sp}}{S_{med}} \right)} \quad (\text{Rov.: 12.2-1})$$

$$\frac{1}{\alpha_{2r}} \cdot \frac{S_{sp}}{S_{med}} \approx 0 - \text{můžeme zanedbat}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}}} = \frac{1}{\frac{1}{38.881}} = 38.881 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 12.2-2})$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín pro žebrované trubky

$$\alpha_{1r} = \left(\frac{S_z}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S} \right) \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_K}{1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K} \quad (\text{Rov.: 12.2-3})$$

$$\alpha_{1r} = (0.913 \cdot 0.88 \cdot 1 + 0.087) \cdot \frac{0.85 \cdot 53.157}{1 + 0.002 \cdot 0.85 \cdot 53.157} = 38.881 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$\mu = 1$ - součinitel rozšíření žebra pro konstantní průřez

$\psi_z = 0.85$ pro žebra s kruhovým základem

$\varepsilon = 0.002 \text{ m}^2\text{K/W}$ – zvolená poměrná zářivost

Poměr výhřevných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalín

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z}{D} - \frac{t_z}{D}\right)} \quad (\text{Rov.: 12.2-4})$$

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{0.068}{0.038}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0.068}{0.038}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0.005}{0.038} - \frac{0.001}{0.038}\right)} = 0.913 \quad (\text{Rov.: 12.2-5})$$

Poměr plochy bez žeber a celkové plochy ze strany spalín

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S} = 1 - 0.913 = 0.087$$

Součinitel β pro určení poměru $\beta \cdot h_z$ a určení efektivnosti žeber

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_K}{t_z \cdot \lambda_z \cdot 1 + (\varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K)}} = \quad (\text{Rov.: 12.2-6})$$

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.85 \cdot 53.157}{0.001 \cdot 40 \cdot 1 + (0.002 \cdot 0.85 \cdot 53.157)}} = 46.724$$

– součinitel tepelné vodivosti žeber $\lambda_z = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$\beta \cdot h_z = 46.724 \cdot 0.015 = 0.701 \quad (\text{Rov.: 12.2-7})$$

$$\frac{D_{\dot{z}}}{D} = \frac{D_{\dot{z}}}{D} = 1.789 \quad (\text{Rov.: 12.2-8})$$

-z těchto hodnot se určí součinitel efektivnosti žeber $E = 0.88$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\begin{aligned} \alpha_K &= 0.23 \cdot c_Z \cdot \varphi_\sigma^{0.2} \cdot \frac{\lambda}{s_{\dot{z}}} \cdot \left(\frac{D}{s_{\dot{z}}}\right)^{-0.54} \cdot \left(\frac{h_{\dot{z}}}{s_{\dot{z}}}\right)^{-0.14} \cdot \left(\frac{w \cdot s_{\dot{z}}}{\nu}\right)^{0.65} \\ &= 0.23 \cdot 1 \cdot 0.824^{0.2} \cdot \frac{0.077}{0.005} \cdot \left(\frac{0.038}{0.005}\right)^{-0.54} \cdot \left(\frac{0.015}{0.005}\right)^{-0.14} \\ &\quad \cdot \left(\frac{8.675 \cdot 0.005}{93 \cdot 10^{-6}}\right)^{0.65} \end{aligned} \quad (\text{Rov.: 12.2-9})$$

$$\alpha_K = 53.157 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Oprava pro vystřídání uspořádání trubek

Oprava c_S na uspořádání svazku podle σ_1 a φ_σ

$$c_S = 0.34 \cdot \varphi_\sigma^{0.1} = 0.34 \cdot 0.824^{0.1} = 0.333 \quad (\text{Rov.: 12.2-9})$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0.160}{0.038} = 4.211 \quad (\text{Rov.: 12.2-11})$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0.168}{0.038} = 4.421 \quad (\text{Rov.: 12.2-12})$$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 4.211^2 + 4.421^2} = 4.897 \quad (\text{Rov.: 12.2-13})$$

Hodnota φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{4.211 - 1}{4.897 - 1} = 0.824 \quad (\text{Rov.: 12.2-14})$$

Oprava c_Z na počet podélných řad

$$c_Z = 1$$

-pro $z \geq 10$

12.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}} = \frac{446.646 - 235.146}{\ln \frac{446.646}{235.146}} = 329.665^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 12.3-1})$$

$$\Delta t_V = t_{SP}^{in} - t_{MED}^{out} = 697 - 250.354 = 446.646^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_M = t_{SP}^{out} - t_{MED}^{in} = 485.5 - 250.354 = 235.146^\circ\text{C}$$

12.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_V^{Dot.výp.} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{PV}} \cdot 10^{-3} = \frac{38.881 \cdot 329.665 \cdot 494.911}{1.625} \cdot 10^{-3} = 3903.64 \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 12.4-1})$$

12.5 Celková bilance

$$\Delta Q = \frac{Q_b^{Dot.výp.} - Q_V^{Dot.výp.}}{Q_b^{Dot.výp.}} \cdot 100 \quad (\text{Rov.: 12.5-1})$$

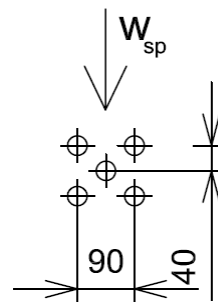
$$\Delta Q = \frac{3892.727 - 3903.64}{3892.727} \cdot 100 = -0.280\%$$

13 Eko2

Ekonomizéry zůstaly stávající. Byly posunuty níže v druhém tahu, pro získání většího prostoru pro dodatkový výparník. Rozměry převzaty z technické dokumentace kotle.

Rozměry

Šířka tahu	$a = 1.82 \text{ m}$
Hloubka tahu	$b = 4.36 \text{ m}$
Vnější průměr trubek	$D = 0.0318 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubek	$d = 0.0246 \text{ m}$
Počet řad	$z = 32$
Počet trubek v první řadě	$n_{TR1} = 22$
Počet hadů	$n_H = 2$
Délka trubky	$l_{TR} = 4.29 \text{ m}$
Délka hada trubky	$l_{TRH} = 70.69 \text{ m}$



Obr.13-1: Rozteče trubek EKO2

Rozteč trubek

$$s_1 = 0.09 \text{ m}$$

Rozteč trubek

$$s_2 = 0.04 \text{ m}$$

Výhřevná plocha

$$S^{EKO2} = \pi \cdot D \cdot l_{TRH} \cdot n_H \cdot n_{TR1} = \pi \cdot 0.0318 \cdot 70.69 \cdot 2 \cdot 22 = 310.733 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 13-1})$$

Spaliny			medium (voda)		
	$t [^\circ\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$t [^\circ\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$p [\text{Mpa}]$
Vstup	485.5	8456.291	177.3	764.066	4.25
výstup	317	5445.756	238	1032.676	4

13.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b^{EKO2} = \varphi \cdot (I_{SP}^{in} - I_{SP}^{out}) \quad (\text{Rov.: 13.1-1})$$

$$Q_b^{EKO2} = 0.991 \cdot (8456.291 - 5445.756) = 2984.463 \text{ kJ/m}^3$$

13.2 Rovnice tepelné bilance

$$i_{MED}^{in} = -Q_b^{EKO2} \cdot \frac{M_{PV}}{M_{NV}} + i_{MED}^{out} \quad (\text{Rov.: 13.2-1})$$

$$i_{MED}^{in} = -2984.463 \cdot \frac{1.625}{18.056} + 1032.676 = 764.066 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 13.2-2})$$

-této entalpií odpovídá teplota 177.3°C při tlaku 4.25Mpa

Střední teplota proudu spalin

$$t_{STR}^{SP} = \frac{t_{SP}^{in} + t_{SP}^{out}}{2} = \frac{485.5 + 317}{2} = 401.25^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 13.2-3})$$

Látkové vlastnosti spalin

$\lambda [W/mK]$	0.0597
Pr	0.6697
$\nu [m^2/s]$	$60.8 \cdot 10^{-6}$

Rychlost spalin

$$w_{SP} = \frac{M_{PV} \cdot O_{SPsRec}}{F_{SP}} \cdot \left(1 + \frac{t_{STR}^{SP}}{273,15}\right) \quad (\text{Rov.: 13.2-4})$$

$$w_{SP} = \frac{1.625 \cdot 12.355}{4.934} \cdot \left(1 + \frac{401.25}{273,15}\right) = 10.047 \text{ m/s}$$

Objem spalin při střední hodnotě α_o a recirkulaci

$$\alpha_{STR} = \frac{\alpha_{1.08} + \alpha_{1.09}}{2} = \frac{1.08 + 1.09}{2} = 1.085 \quad (\text{Rov.: 13.2-5})$$

$$O_{SP} = O_{SPmin}^V + (\alpha_o - 1) \cdot O_{VZmin}^V \quad (\text{Rov.: 13.2-6})$$

$$O_{SP} = 10.403 + (1.085 - 1) \cdot 9.398 = 11.202 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$O_{SPsRec} = O_{SP} + O_{SPRec} = 11.202 + 1.153 = 12.355 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 13.2-7})$$

Objemové části tříatomových plynů

-s uvažováním střední hodnoty α_o a recirkulace

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2sRec}}{O_{SPsRec}} = \frac{1.1}{12.355} = 0.089 \quad (\text{Rov.: 13.2-8})$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2OsRec}}{O_{SPsRec}} = \frac{2.409}{12.355} = 0.195 \quad (\text{Rov.: 13.2-9})$$

Součet objemových částí tříatomových plynů

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0.089 + 0.195 = 0.284 \quad (\text{Rov.: 13.2-10})$$

Světlý průřez spalin

$$F_{SP} = a \cdot b - D \cdot l_{TR} \cdot n_{TR1} = 1.820 \cdot 4.360 - 0.0318 \cdot 4.29 \cdot 22 = 4.934 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 13.2-11})$$

13.3 Součinitel prostupu tepla

Při spalování plynu po spalování mazutu se pro součinitel tepelné efektivity ψ bere střední hodnota z hodnot pro mazut a plyn

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0.72 \cdot 115.592 = 83.226 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 13.3-1})$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_K + \alpha_S = 110.474 + 5.117 = 115.592 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 13.3-2})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_K = c_Z \cdot c_S \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{Rov.: 13.3-3})$$

$$\begin{aligned} \alpha_K &= 1 \cdot 0.394 \cdot \frac{0.0597}{0.0318} \cdot \left(\frac{10.047 \cdot 0.0318}{60.8 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0.6697^{0,33} \\ &= 110.474 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned}$$

Oprava pro vystřídání uspořádání trubek

Oprava c_S na uspořádání svazku podle σ_1 a φ_σ

$$c_S = 0.275 \cdot \varphi_\sigma^{0,5} = 0.275 \cdot 2.049^{0,5} = 0.394 \quad (\text{Rov.: 13.3-4})$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0.09}{0.0318} = 2.830 \quad (\text{Rov.: 13.3-5})$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0.04}{0.0318} = 1.258 \quad (\text{Rov.: 13.3-6})$$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 2.830^2 + 1.258^2} = 1.893 \quad (\text{Rov.: 13.3-7})$$

Hodnota φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{2.830 - 1}{1.893 - 1} = 2.049 \quad (\text{Rov.: 13.3-8})$$

Oprava c_Z na počet podélných řad

$$c_Z = 1 \quad (\text{Rov.: 13.3-9})$$

-pro $z \geq 10$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{STR}^{SP} + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)}} \quad (\text{Rov.13.3-10})$$

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,126 \cdot (401.250 + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(232.635 + 273.15)}{(401.250 + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(232.635 + 273.15)}{(401.250 + 273.15)}}$$

$$\alpha_S = 25.216 \text{ W/m}^2\text{K}$$

-stupeň černosti stěny $a_{st} = 0,8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0.135} = 0.126 \quad (\text{Rov.: 13.3-11})$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{SP} \cdot r_{SP} + k_P \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (\text{Rov.: 13.3-12})$$

$$k \cdot p \cdot s = (46.929 \cdot 0.284 + 0 \cdot 0) \cdot 0.1 \cdot 0.198 = 0.135$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{STR}^{SP} + 273.15}{1000} \right) \quad (\text{Rov.: 13.3-13})$$

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0.2}{3,16 \cdot \sqrt{0.029 \cdot 0.101}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{401.250 + 273.15}{1000} \right) = 24.084 / \text{m} \cdot \text{Mpa}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0.0318 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0.09 \cdot 0.04}{0.0318^2} - 1 \right) = 0.101 \text{ m} \quad (\text{Rov.: 13.3-14})$$

Střední teplota proudu media

$$t_{MED}^{STR} = \frac{t_{MED}^{out} + t_{MED}^{in}}{2} = \frac{238 + 177.3}{2} = 207.635 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Rov.: 13.3-15})$$

Střední tlak proudu media

$$p_{MED}^{STR} = \frac{p_{MED}^{out} + p_{MED}^{in}}{2} = \frac{4 + 4.25}{2} = 4.125 \text{ Mpa} \quad (\text{Rov.: 13.3-16})$$

$$T_Z = t_{MED}^{STR} + \Delta t = 207.635 + 25 = 232.635^{\circ}\text{C} \quad (\text{Rov.: 13.3-17})$$

13.4 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}} = \frac{247.5 - 139.7}{\ln \frac{247.5}{139.7}} = 188.508^{\circ}\text{C} \quad (\text{Rov.: 13.4-1})$$

$$\Delta t_V = t_{SP}^{in} - t_{MED}^{out} = 485.5 - 238 = 247.5^{\circ}\text{C} \quad (\text{Rov.: 13.4-2})$$

$$\Delta t_M = t_{SP}^{out} - t_{MED}^{in} = 317 - 177.3 = 139.7^{\circ}\text{C} \quad (\text{Rov.: 13.4-3})$$

13.5 Rovnice sdílení tepla

$$Q_V^{EKO2} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{PV}} \cdot 10^{-3} = \frac{83.226 \cdot 188.508 \cdot 310.733}{1.625} \cdot 10^{-3} = 2999.916 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 13.5-1})$$

13.6 Celková bilance

$$\Delta Q = \frac{Q_b^{EKO2} - Q_V^{EKO2}}{Q_b^{EKO2}} \cdot 100 \quad (\text{Rov.: 13.6-1})$$

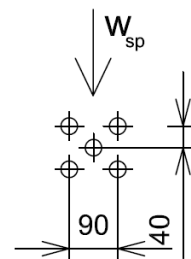
$$\Delta Q = \frac{2984.463 - 2999.916}{2984.463} \cdot 100 = -0.518\%$$

14 Eko1

Do prvního stupně ekonomizéru vstupuje přehřátá napájecí voda viz. Rozměry převzaty z technické dokumentace kotle.

Rozměry

Šířka tahu	$a = 1.82 \text{ m}$
Hloubka tahu	$b = 4.36 \text{ m}$
Vnější průměr trubek	$D = 0.0318 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubek	$d = 0.0246 \text{ m}$
Počet řad	$z = 24$
Počet trubek v první řadě	$n_{TR1} = 22$
Počet hadů	$n_H = 2$
Délka trubky	$l_{TR} = 4.29 \text{ m}$
Délka hada trubky	$l_{TRH} = 53.53 \text{ m}$
Rozteč trubek	$s_1 = 0.09 \text{ m}$
Rozteč trubek	$s_2 = 0.04 \text{ m}$



Obr.14-1: Rozteče trubek EKO1

Výhřevná plocha

$$S^{EKO1} = \pi \cdot D \cdot l_{TRH} \cdot n_H \cdot n_{TR1} = \pi \cdot 0.0318 \cdot 53.53 \cdot 2 \cdot 22 = 235.303 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 14-1})$$

Spaliny			medium (voda)		
	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$p [\text{Mpa}]$
Vstup	317	5445.756	151.3	648.354	4.5
výstup	243.5	4179.054	177.3	764.066	4.25

14.1 Bilanční teplo spalin

$$Q_b^{EKO1} = \varphi \cdot (I_{SP}^{in} - I_{SP}^{out}) \quad (\text{Rov.: 14.1-1})$$

$$Q_b^{EKO1} = 0.991 \cdot (5445.756 - 4179.054) = 1255.733 \text{ kJ/m}^3$$

14.2 Rovnice tepelné bilance

$$i_{MED}^{in} = -Q_b^{EKO1} \cdot \frac{M_{PV}}{M_{NV}} + i_{MED}^{out} \quad (\text{Rov.: 14.2-1})$$

$$i_{MED}^{in} = -1255.733 \cdot \frac{1.625}{18.056} + 764.066 = 648.354 \text{ kJ/m}^3$$

-této entalpií odpovídá teplota 151.3°C při tlaku 4.5Mpa

Střední teplota proudu spalín

$$t_{STR}^{SP} = \frac{t_{SP}^{in} + t_{SP}^{out}}{2} = \frac{317 + 243.5}{2} = 280.25^{\circ}\text{C} \quad (\text{Rov.: 14.2-2})$$

Látkové vlastnosti spalín

$\lambda [W/mK]$	0.0485
Pr	0.71
$\nu [m^2/s]$	$43.2 \cdot 10^{-6}$

Rychlost spalín

$$w_{SP} = \frac{M_{PV} \cdot O_{SPsRec}}{F_{SP}} \cdot \left(1 + \frac{t_{STR}^{SP}}{273,15}\right) \quad (\text{Rov.: 14.2-3})$$

$$w_{SP} = \frac{1.625 \cdot 12.449}{4.934} \cdot \left(1 + \frac{280.25}{273,15}\right) = 8.307 \text{ m/s}$$

Objem spalín při střední hodnotě α_o a recirkulaci

$$\alpha_{STR} = \frac{\alpha_{1.09} + \alpha_{1.1}}{2} = \frac{1.09 + 1.1}{2} = 1.095 \quad (\text{Rov.: 14.2-4})$$

$$O_{SP} = O_{SPmin}^V + (\alpha_o - 1) \cdot O_{VZmin}^V \quad (\text{Rov.: 14.2-5})$$

$$O_{SP} = 10.403 + (1.095 - 1) \cdot 9.398 = 11.296 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$O_{SPsRec} = O_{SP} + O_{SPRec} = 11.296 + 1.153 = 12.449 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 14.2-6})$$

Objemové části tříatomových plynů-s uvážením střední hodnoty α_o a recirkulace

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2sRec}}{O_{SPsRec}} = \frac{1.099}{12.449} = 0.088 \quad (\text{Rov.: 14.2-7})$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O sRec}}{O_{SPsRec}} = \frac{2.408}{12.449} = 0.193 \quad (\text{Rov.: 14.2-8})$$

Součet objemových částí tříatomových plynů

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0.088 + 0.193 = 0.282 \quad (\text{Rov.: 14.2-9})$$

Světlý průřez spalin

$$F_{SP} = a \cdot b - D \cdot l_{TR} \cdot n_{TR1} = 1.820 \cdot 4.360 - 0.0318 \cdot 4.29 \cdot 22 = 4.934 m^2 \quad (\text{Rov.: 14.2-10})$$

14.3 Součinitel prostupu tepla

Při spalování plynu po spalování mazutu se pro součinitel tepelné efektivity ψ bere střední hodnota z hodnot pro mazut a plyn

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0.75 \cdot 102.715 = 77.036 W/m^2K \quad (\text{Rov.: 14.3-1})$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_K + \alpha_S = 99.399 + 5.117 = 102.715 W/m^2K \quad (\text{Rov.: 14.3-2})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_K = c_Z \cdot c_S \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{Rov.: 14.3-3})$$

$$\alpha_K = 1 \cdot 0.394 \cdot \frac{0.0485}{0.0318} \cdot \left(\frac{8.307 \cdot 0.0318}{43.2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0.71^{0,33} = 110.474 W/m^2K$$

Oprava pro vystřídání uspořádání trubek

Oprava c_S na uspořádání svazku podle σ_1 a φ_σ

$$c_S = 0.275 \cdot \varphi_\sigma^{0,5} = 0.275 \cdot 2.049^{0,5} = 0.394 \quad (\text{Rov.: 14.3-4})$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0.09}{0.0318} = 2.830 \quad (\text{Rov.: 14.3-5})$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0.04}{0.0318} = 1.258 \quad (\text{Rov.: 14.3-6})$$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 2.830^2 + 1.258^2} = 1.893 \quad (\text{Rov.: 14.3-7})$$

Hodnota φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{2.830 - 1}{1.893 - 1} = 2.049 \quad (\text{Rov.: 14.3-8})$$

Oprava c_Z na počet podélných řad

$$c_Z = 1 \quad (\text{Rov.: 14.3-9})$$

-pro $z \geq 10$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{STR}^{SP} + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)}} \quad (\text{Rov.: 14.3-10})$$

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.8 + 1}{2} \cdot 0.132 \cdot (280.250 + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(189.3 + 273.15)}{(280.250 + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(189.3 + 273.15)}{(280.250 + 273.15)}}$$

$$\alpha_S = 3.316 \text{ W/m}^2\text{K}$$

-stupeň černosti stěny $a_{st} = 0,8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0.141} = 0.132 \quad (\text{Rov.: 14.3-11})$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{SP} \cdot r_{SP} + k_P \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (\text{Rov.: 14.3-12})$$

$$k \cdot p \cdot s = (49.609 \cdot 0.282 + 0 \cdot 0) \cdot 0.1 \cdot 0.198 = 0.141$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{STR}^{SP} + 273.15}{1000} \right) \quad (\text{Rov.: 14.3-13})$$

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,2}{3,16 \cdot \sqrt{0,029 \cdot 0,101}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{280,250 + 273,15}{1000} \right) = 49,609 / m \cdot Mpa$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0318 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,09 \cdot 0,04}{0,0318^2} - 1 \right) = 0,101 \text{ m} \quad (\text{Rov.: 14.3-14})$$

Střední teplota proudu media

$$t_{MED}^{STŘ} = \frac{t_{MED}^{out} + t_{MED}^{in}}{2} = \frac{177,3 + 151,3}{2} = 164,3 \text{ °C} \quad (\text{Rov.: 14.3-15})$$

Střední tlak proudu media

$$p_{MED}^{STŘ} = \frac{p_{MED}^{out} + p_{MED}^{in}}{2} = \frac{4,25 + 4,5}{2} = 4,375 \text{ Mpa} \quad (\text{Rov.: 14.3-16})$$

$$T_Z = t_{MED}^{STŘ} + \Delta t = 164,3 + 25 = 189,3 \text{ °C} \quad (\text{Rov.: 14.3-17})$$

14.4 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}} = \frac{139,7 - 92,2}{\ln \frac{139,7}{92,2}} = 114,457 \text{ °C} \quad (\text{Rov.: 14.4-1})$$

$$\Delta t_V = t_{SP}^{in} - t_{MED}^{out} = 317 - 177,3 = 139,7 \text{ °C}$$

$$\Delta t_M = t_{SP}^{out} - t_{MED}^{in} = 243,5 - 151,3 = 92,2 \text{ °C}$$

14.5 Rovnice sdílení tepla

$$Q_V^{EKO1} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{PV}} \cdot 10^{-3} = \frac{77,036 \cdot 114,457 \cdot 235,303}{1,625} \cdot 10^{-3} = 1276,720 \text{ kJ} / m^3 \quad (\text{Rov.: 14.5-1})$$

14.6 Celková bilance

$$\Delta Q = \frac{Q_b^{EKO1} - Q_V^{EKO1}}{Q_b^{EKO1}} \cdot 100 \quad (\text{Rov.: 14.5-2})$$

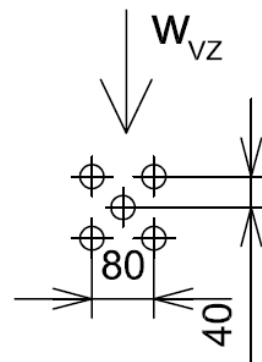
$$\Delta Q = \frac{1255.733 - 1276.720}{1255.733} \cdot 100 = -1.671\%$$

15 OVZ 2

Trubkové ohříváky vzduchu zůstaly stávající. Spaliny proudí uvnitř trubek a vzduch kolem. Rozměry převzaty z technické dokumentace kotle.

Rozměry

Výška tahu	$a = 1.4 \text{ m}$
Hloubka tahu	$b = 4.636$
Vnější průměr trubek	$D = 0.04 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubek	$d = 0.037 \text{ m}$
Počet trubek v první řadě	$n_{TR1} = 57$
Počet trubek celkem	$n_{TRC} = 2472$
Délka trubky	$l_{TR} = 1.45 \text{ m}$
Rozteč trubek	$s_1 = 0.08 \text{ m}$
Rozteč trubek	$s_2 = 0.04 \text{ m}$



Obr.15-1: Rozteče trubek OVZ1

Výhřevná plocha

$$S^{OVZ2} = \pi \cdot D \cdot l_{TRH} \cdot n_{TRC} = \pi \cdot 0.04 \cdot 1.45 \cdot 2472 = 450.429 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 15-1})$$

Spaliny			medium (vzduch)	
	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$
Vstup	243.5	4179.054	71.4	905.675
výstup	199	3417.867	127.5	1620.930

Bilanční teplo spalin

$$Q_b^{OVZ2} = \varphi \cdot (I_{SP}^{in} - I_{SP}^{out}) \quad (\text{Rov.: 15-2})$$

$$Q_b^{OVZ2} = 0.991 \cdot (4179.054 - 3417.867) = 754.595 \text{ kJ/m}^3$$

15.1 Rovnice tepelné bilance

$$i_{MED}^{in} = i_{MED}^{out} - \frac{Q_b^{OVZ2}}{\left(\beta_{OVZ} + \frac{\Delta\alpha_{OVZ}}{2} + \beta_{Rec}\right)} \quad (\text{Rov.: 15.1-2})$$

$$i_{MED}^{in} = 1620.930 - \frac{754.595}{\left(1.05 + \frac{0.01}{2} + 0\right)} = 905.675 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 15.1-3})$$

-této entalpií odpovídá teplota 71.5°C

Střední teplota proudu spalin

$$t_{STR}^{SP} = \frac{t_{SP}^{in} + t_{SP}^{out}}{2} = \frac{243.5 + 199}{2} = 221.25^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 15.1-4})$$

Látkové vlastnosti spalin

$\lambda \text{ [W/mK]}$	0.0432
Pr	0.706
$\nu \text{ [m}^2\text{/s]}$	$35.4 \cdot 10^{-6}$

Rychlost spalin

$$w_{SP} = \frac{M_{PV} \cdot O_{SPsRec}}{F_{SP}} \cdot \left(1 + \frac{t_{STR}^{SP}}{273,15}\right) \quad (\text{Rov.: 15.1-5})$$

$$w_{SP} = \frac{1.625 \cdot 12.543}{2.658} \cdot \left(1 + \frac{221.25}{273,15}\right) = 13.880 \text{ m/s}$$

Objem spalin při střední hodnotě α_o a recirkulaci

$$\alpha_{STR} = \frac{\alpha_{1.1} + \alpha_{1.11}}{2} = \frac{1.1 + 1.11}{2} = 1.105 \quad (\text{Rov.: 15.1-6})$$

$$O_{SP} = O_{SPmin}^V + (\alpha_o - 1) \cdot O_{VZmin}^V \quad (\text{Rov.: 15.1-7})$$

$$O_{SP} = 10.403 + (1.105 - 1) \cdot 9.398 = 11.390 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$O_{SPsRec} = O_{SP} + O_{SPRec} = 11.390 + 1.153 = 12.543 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 15.1-8})$$

Objemové části tříatomových plynů

-s uvážením střední hodnoty α_o a recirkulace

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2sRec}}{O_{SPsRec}} = \frac{1.098}{12.543} = 0.088 \quad (\text{Rov.: 15.1-9})$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2OsRec}}{O_{SPsRec}} = \frac{2.406}{12.543} = 0.192 \quad (\text{Rov.: 15.1-10})$$

Součet objemových částí tříatomových plynů

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0.088 + 0.192 = 0.279 \quad (\text{Rov.: 15.1-11})$$

Světlý průřez spalin

$$F_{SP} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{TRC} = \frac{\pi \cdot 0.037^2}{4} \cdot 2472 = 2.658 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 15.1-12})$$

15.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0.85 \cdot \frac{51.769 \cdot 73.808}{51.769 + 73.808} = 25.863 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 15.2-1})$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_K + \alpha_S = 49.843 + 1.925 = 51.769 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Rov.: 15.2-2})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_K = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (\text{Rov.: 15.2-3})$$

$$\alpha_K = 0.023 \cdot \frac{0.0432}{0.037} \cdot \left(\frac{13.88 \cdot 0.037}{35.4 \cdot 10^{-6}} \right)^{0.8} \cdot 0.706^{0.4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 49.843 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Oprava pro vystřídání uspořádání trubek

Oprava c_S na uspořádání svazku podle σ_1 a φ_σ

$$c_S = 0.27 \cdot \varphi_\sigma^{0.5} = 0.27 \cdot 2.414^{0.5} = 0.364 \quad (\text{Rov.: 15.2-4})$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0.080}{0.040} = 2 \quad (\text{Rov.: 15.2-5})$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0.040}{0.040} = 1 \quad (\text{Rov.: 15.2-6})$$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 2^2 + 1^2} = 1.414 \quad (\text{Rov.: 15.2-7})$$

Hodnota φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{2 - 1}{1.414 - 1} = 2.414 \quad (\text{Rov.: 15.2-8})$$

Oprava c_Z na počet podélných řad

$$c_Z = 1 \quad (\text{Rov.: 15.2-9})$$

-pro $z \geq 10$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{STR}^{SP} + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(T_Z + 273.15)}{(T_{STR}^{SP} + 273.15)}} \quad (\text{Rov.: 15.2-10})$$

$$\alpha_S = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.8 + 1}{2} \cdot 0.101 \cdot (221.25 + 273.15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{(124.45 + 273.15)}{(221.25 + 273.15)} \right)^{3,6}}{1 - \frac{(124.45 + 273.15)}{(221.25 + 273.15)}}$$

$$\alpha_S = 1.925 \text{ W/m}^2\text{K}$$

-stupeň černosti stěny $a_{st} = 0,8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0.107} = 0.101 \quad (\text{Rov.: 15.2-11})$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{SP} \cdot r_{SP} + k_P \cdot \mu) \cdot p \cdot s \quad (\text{Rov.: 15.2-12})$$

$$k \cdot p \cdot s = (68.80 \cdot 0.279 + 0 \cdot 0) \cdot 0.1 \cdot 0.198 = 0.107$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{STR}^{SP} + 273.15}{1000} \right) \quad (\text{Rov.:15.2-13})$$

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0.192}{3,16 \cdot \sqrt{0.029 \cdot 0.056}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{221.25 + 273.15}{1000} \right)$$

$$k_{SP} = 68.809 / m \cdot Mpa$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0.04 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0.08 \cdot 0.04}{0.04^2} - 1 \right) = 0.056 \, m \quad (\text{Rov.: 15.2-14})$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média

$$\alpha_2 = c_Z \cdot c_S \cdot \frac{0.0323}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{Rov.: 15.2-15})$$

$$\alpha_2 = 1 \cdot 0.371 \cdot \frac{0.0323}{0.04} \cdot \left(\frac{6.869 \cdot 0.04}{23.13 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0.69^{0,33} = 73.808 \, W/m^2 K$$

Střední teplota proudu média

$$t_{MED}^{STR} = \frac{t_{MED}^{out} + t_{MED}^{in}}{2} = \frac{127.5 + 71.4}{2} = 99.45 \, ^\circ C \quad (\text{Rov.: 15.2-16})$$

$$T_Z = t_{MED}^{STR} + \Delta t = 99.45 + 25 = 124.45 \, ^\circ C \quad (\text{Rov.: 15.2-17})$$

Látkové vlastnosti média

$\lambda \, [W/mK]$	0.0323
Pr	0.69
$\nu \, [m^2/s]$	$23.13 \cdot 10^{-6}$

Rychlost média

$$w_{MED} = \frac{M_{PV} \cdot \beta_{OVZ} \cdot O_{VZmin}^V}{f} \cdot \left(1 + \frac{t_{MED}^{STR}}{273.15} \right) \quad (\text{Rov.: 15.2-18})$$

$$w_{MED} = \frac{1.625 \cdot 1.05 \cdot 9.398}{3.184} \cdot \left(1 + \frac{99.45}{273.15} \right) = 6.869 \, m/s$$

Průřez pro medium

$$f = a \cdot b - (D \cdot l_{TR} \cdot n_{TR1}) = 4.636 \cdot 1.4 - (0.04 \cdot 1.45 \cdot 57) = 3.184 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 15.2-19})$$

15.3 Teplotní spád

$$P = \frac{\tau_M}{t_{SP}^{in} - t_{MED}^{in}} = \frac{56.1}{243.5 - 71.4} = 0.325 \quad (\text{Rov.: 15.3-1})$$

$$R = \frac{\tau_V}{\tau_M} = \frac{44.5}{56.1} = 0.794 \quad (\text{Rov.: 15.3-2})$$

$$\tau_V = t_{SP}^{in} - t_{SP}^{out} = 243.5 - 199 = 44.5^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 15.3-3})$$

$$\tau_M = t_{MED}^{out} - t_{MED}^{in} = 127.5 - 71.4 = 56.1^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 15.3-4})$$

-z nomogramu vyplývá pro hodnoty P a R součinitel $\psi = 0.98$. Hodnotu jsem zvolil $\psi = 0.85$, se kterou jsem se přiblížil odpovídajícím teplotám spalin a vzduchu, při kontrolním propočtu stávajícího kotle.

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{pr} = 0.85 \cdot 121.689 = 103.436^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 15.3-5})$$

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}} = \frac{127.6 - 116}{\ln \frac{127.6}{116}} = 121.689^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 15.3-6})$$

$$\Delta t_M = t_{SP}^{in} - t_{MED}^{out} = 243.5 - 127.5 = 116^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 15.3-7})$$

$$\Delta t_V = t_{SP}^{out} - t_{MED}^{in} = 199 - 71.4 = 127.6^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 15.3-8})$$

15.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_V^{OVZ2} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{PV}} \cdot 10^{-3} = \frac{25.863 \cdot 103.436 \cdot 450.429}{1.625} \cdot 10^{-3} = 741.499 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 15.4-1})$$

15.5 Celková bilance

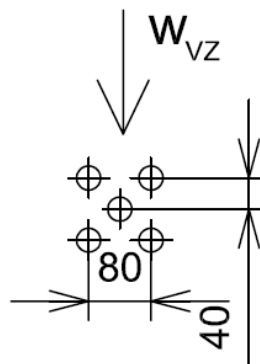
$$\Delta Q = \frac{Q_b^{OVZ2} - Q_V^{OVZ2}}{Q_b^{OVZ2}} \cdot 100 = \frac{754.595 - 741.499}{754.595} = 1.735\% \quad (\text{Rov.: 15.5-1})$$

16 OVZ 1

Do prvního stupně ohříváku vzduchu vstupuje vzduch o teplotě 30°C. Rozměry převzaty z technické dokumentace kotle.

Rozměry

Výška tahu	$a = 1.4 \text{ m}$
Hloubka tahu	$b = 4.636$
Vnější průměr trubek	$D = 0.043 \text{ m}$
Vnitřní průměr trubek	$d = 0.04 \text{ m}$
Počet trubek v první řadě	$n_{TR1} = 57$
Počet trubek celkem	$n_{TRC} = 2128$
Délka trubky	$l_{TR} = 1.45 \text{ m}$
Rozteč trubek	$s_1 = 0.08 \text{ m}$
Rozteč trubek	$s_2 = 0.04 \text{ m}$



Obr.16-1: Rozteče trubek OVZ1

Výhřevná plocha

$$S^{OVZ1} = \pi \cdot D \cdot l_{TRH} \cdot n_{TRC} = \pi \cdot 0.043 \cdot 1.45 \cdot 2128 = 416.829 \text{ m}^2 \quad (\text{Rov.: 16-1})$$

Spaliny			medium (vzduch)	
	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I [\text{kJ/kg}]$
Vstup	199	3417.867	30	379.378
výstup	165	2847.682	71.4	905.675

Bilanční teplo spalin

$$Q_b^{OVZ1} = \varphi \cdot (I_{SP}^{in} - I_{SP}^{out}) \quad (\text{Rov.: 16-2})$$

$$Q_b^{OVZ1} = 0.991 \cdot (3417.867 - 2847.682) = 565.247 \text{ kJ/m}^3$$

16.1 Rovnice tepelné bilance

$$i_{MED}^{in} = i_{MED}^{out} - \frac{Q_b^{OVZ1}}{\left(\beta_{OVZ} + \frac{\Delta\alpha_{OVZ}}{2} + \beta_{Rec}\right)} \quad (\text{Rov.: 16.1-1})$$

$$i_{MED}^{in} = 905.675 - \frac{565.247}{\left(1.05 + \frac{0.01}{2} + 0\right)} = 379.378 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 16.1-2})$$

-této entalpií odpovídá teplota vzduchu 30°C, teplota na vstupu do OVZ1.

Střední teplota proudu spalin

$$t_{STR}^{SP} = \frac{t_{SP}^{in} + t_{SP}^{out}}{2} = \frac{199 + 165}{2} = 182^{\circ}\text{C} \quad (\text{Rov.: 16.1-3})$$

Látkové vlastnosti spalin

$\lambda [W/mK]$	0.0397
Pr	0.714
$\nu [m^2/s]$	$30.1 \cdot 10^{-6}$

Rychlost spalin

$$w_{SP} = \frac{M_{PV} \cdot O_{SPsRec}}{F_{SP}} \cdot \left(1 + \frac{t_{STR}^{SP}}{273,15}\right) \quad (\text{Rov.: 16.1-4})$$

$$w_{SP} = \frac{1.625 \cdot 12.637}{2.674} \cdot \left(1 + \frac{182}{273,15}\right) = 12.796 \text{ m/s}$$

Objem spalin při střední hodnotě α_o a recirkulaci

$$\alpha_{STR} = \frac{\alpha_{1.11} + \alpha_{1.11}}{2} = \frac{1.1 + 1.12}{2} = 1.115 \quad (\text{Rov.: 16.1-5})$$

$$O_{SP} = O_{SPmin}^V + (\alpha_o - 1) \cdot O_{VZmin}^V \quad (\text{Rov.: 16.1-6})$$

$$O_{SP} = 10.403 + (1.115 - 1) \cdot 9.398 = 11.484 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$O_{SPsRec} = O_{SP} + O_{SPRec} = 11.484 + 1.153 = 12.637 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Rov.: 16.1-7})$$

Objemové části tříatomových plynů-s uvažováním střední hodnoty α_o a recirkulace

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_{2sRec}}}{O_{SPsRec}} = \frac{1.097}{12.637} = 0.087 \quad (\text{Rov.: 16.1-8})$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O_{sRec}}}{O_{SPsRec}} = \frac{2.404}{12.637} = 0.190 \quad (\text{Rov.: 16.1-9})$$

Součet objemových částí tříatomových plynů

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0.087 + 0.190 = 0.277 \quad (\text{Rov.: 16.1-10})$$

Světlý průřez spalín

$$F_{SP} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{TRC} = \frac{\pi \cdot 0.04^2}{4} \cdot 2128 = 2.674 m^2 \quad (\text{Rov.: 16.1-11})$$

16.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0.85 \cdot \frac{47.593 \cdot 46.537}{47.593 + 46.537} = 20 W/m^2K \quad (\text{Rov.: 16.2-1})$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_K = 47.593 W/m^2K \quad (\text{Rov.: 16.2-2})$$

- součinitel přestupu tepla sáláním se počítá jen u druhého stupně OVZ

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_K = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (\text{Rov.: 16.2-3})$$

$$\alpha_K = 0.023 \cdot \frac{0.0397}{0.04} \cdot \left(\frac{12.796 \cdot 0.04}{30.1 \cdot 10^{-6}} \right)^{0.8} \cdot 0.714^{0.4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 49.843/m^2K$$

Oprava pro vystřídání uspořádání trubek

Oprava c_s na uspořádání svazku podle σ_1 a φ_σ

$$c_s = 0.27 \cdot \varphi_\sigma^{0.5} = 0.27 \cdot 2.727^{0.5} = 0.376 \quad (\text{Rov.: 16.2-4})$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0.080}{0.043} = 1.86 \quad (\text{Rov.: 16.2-5})$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0.040}{0.043} = 0.93 \quad (\text{Rov.: 16.2-6})$$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 1.86^2 + 0.93^2} = 1.316 \quad (\text{Rov.: 16.2-7})$$

Hodnota φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{1.86 - 1}{1.316 - 1} = 2.727 \quad (\text{Rov.: 16.2-8})$$

Oprava c_Z na počet podélných řad

$$c_Z = 1 \quad (\text{Rov.: 16.2-9})$$

-pro $z \geq 10$

Součinitel přestupu tepla konvekci na straně media

$$\alpha_2 = c_Z \cdot c_S \cdot \frac{0.0323}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0.6} \cdot Pr^{0.33} \quad (\text{Rov.: 16.2-10})$$

$$\alpha_2 = 1 \cdot 0.371 \cdot \frac{0.0244}{0.043} \cdot \left(\frac{6.467 \cdot 0.043}{28 \cdot 10^{-6}} \right)^{0.6} \cdot 0.7^{0.33} = 46.537 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střední teplota proudu media

$$t_{MED}^{STŘ} = \frac{t_{MED}^{out} + t_{MED}^{in}}{2} = \frac{71.4 + 30}{2} = 50.7 \text{ °C} \quad (\text{Rov.: 16.2-11})$$

Látkové vlastnosti média

$\lambda \text{ [W/mK]}$	0.0244
Pr	0.7
$\nu \text{ [m}^2\text{/s]}$	$28 \cdot 10^{-6}$

Rychlost media

$$w_{MED} = \frac{M_{PV} \cdot \beta_{OVZ} \cdot O_{VZmin}^V}{f} \cdot \left(1 + \frac{t_{MED}^{STŘ}}{273.15} \right) \quad (\text{Rov.: 16.2-12})$$

$$w_{MED} = \frac{1.625 \cdot 1.05 \cdot 9.398}{2.936} \cdot \left(1 + \frac{50.7}{273.15} \right) = 6.467 \text{ m/s}$$

Průřez pro medium

$$f = a \cdot b - (D \cdot l_{TR} \cdot n_{TR1}) = 4.636 \cdot 1.4 - (0.043 \cdot 1.45 \cdot 57) = 2.936 m^2 \quad (\text{Rov.: 16.2-7})$$

16.3 Teplotní spád

Hodnotu zvolena $\psi = 0.85$, viz. OVZ2

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{pr} = 0.85 \cdot 131.612 = 111.870 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 16.3-1})$$

$$\Delta t_{pr} = \frac{\Delta t_V - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_V}{\Delta t_M}} = \frac{135 - 127.6}{\ln \frac{135}{127.6}} = 131.612 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 16.3-2})$$

$$\Delta t_M = t_{SP}^{in} - t_{MED}^{out} = 199 - 71.4 = 127.6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 16.3-3})$$

$$\Delta t_V = t_{SP}^{out} - t_{MED}^{in} = 165 - 30 = 135 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov.: 16.3-4})$$

16.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_V^{OVZ2} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{PV}} \cdot 10^{-3} = \frac{20 \cdot 111.870 \cdot 416.829}{1.625} \cdot 10^{-3} = 573.9 kJ/m^3 \quad (\text{Rov.: 16.4-1})$$

16.5 Celková bilance

$$\Delta Q = \frac{Q_b^{OVZ1} - Q_V^{OVZ1}}{Q_b^{OVZ1}} \cdot 100 = \frac{565.247 - 573.9}{565.247} = -1.531\% \quad (\text{Rov.: 16.5-1})$$

v

17 Celková Bilance kotle na straně spalín

$$\Sigma Q_b =$$

$$\begin{aligned} &= Q_s + Q_b^{Mříž} + Q_b^{VRAT.KOM} + Q_b^{PP2+ZTR} + Q_b^{PP1+ZTR} + Q_b^{Dot.výp} + Q_b^{EKO2} + Q_b^{EKO1} + Q_b^{OVZ2} + Q_b^{OVZ1} \\ &= 15191.967 + 764.771 + 714.781 + 2980.446 + 3794.387 + 3892.727 + 2984.463 + 1255.733 \\ &+ 754.595 + 565.247 = 31579.276 kJ/m^3 \quad (\text{Rov.: 17-1}) \end{aligned}$$

$$\Delta Q = Q_P^P \cdot \eta_K - \Sigma Q_b = 34300 \cdot 0.91578 - 31579.276$$
$$= -168.022 \text{ kJ/m}^3 \quad (\text{Rov.: 17-2})$$

$$\Delta = \frac{\Delta Q}{Q_P^P} \cdot 100 = \frac{-168.022}{34300} \cdot 100 = -0.48\% \quad (\text{Rov.: 17-3})$$

Při tepelném výpočtu byly dodrženy odchylky tepelných výkonů z bilance spalin od výkonů přenosu tepla počítaných ploch do $\pm 2\%$ a odchylka celkové bilance kotle do $\pm 0.5\%$

18 Závěr

Cílem práce bylo upravit stávající kotel pro provoz na zemní plyn s ohledem na ekonomickou stránku rekonstrukce a provést tepelný přepočít pro provoz na zemní plyn při zachování tepelného výkonu a parametrů páry a navrhnout opatření pro dodržení limitu $NO_x = 100 \text{ mg/Nm}^3$.

Pro dodržení limitu NO_x byly zvoleny nízkoemisní plynové hořáky a zavedena recirkulace spalin zpět do spalovací komory. Teplota přiváděného spalovacího vzduchu z hlediska omezení emisí NO_x by se měla pohybovat kolem 130°C . Teplota vzduchu na výstupu z druhého stupně ohříváku vzduchu je 127.5°C

Při změně paliva z mazutu na plyn byla hodnota teploty spalin na konci spalovací komory vyšší než byl kotel konstruován, a muselo dojít k několika úpravám Kotle. První úprava, a to úprava spalovací komory, kde byl navrhnout tzv. „nos“ ve spalovací komoře a tím zvětšená plocha výparníku. Teplota spalin se snížila, ale i přesto docházelo ve stávajícím přehříváku k přehřívání páry na vyšší teplotu páry, než byl požadavek i při max. množství vstřiku, který je omezen velikostí kondenzátoru. Přehřívák musel být zkrácen. Důsledkem zkrácení přehříváku bylo menší odebírané teplo spalin a na výstupu vody z EKA docházelo k varu vody. Pro eliminaci tohoto problému byl navrhnout dodatkový výparník napojen na výparník ve spalovací komoře. Tento krok pomohl ke snížení teploty spalin a k teplotě vody na výstupu z EKA 238°C . Při úpravách jsme byli omezeni rozměry stávajícího kotle a pro získání potřebného prostoru pro dodatkový přehřívák musel být posunut první stupeň přehříváku, zkráceny závěsné trubky a posunuty EKA. Stávající kotel byl konstruován v době kdy mazut obsahoval vysoké procento síry, z toho důvodu byl konstruován tak, aby teplota za kotlem se pohybovala kolem 160°C i při jmenovitém výkonu páry 55t/h. Po plynofikaci a úpravách kotle jsme s přihlédnutím na ekonomickou stránku rekonstrukce dosáhli teploty za kotlem 165°C při jmenovitém výkonu páry 65t/h. Tímto účinnost kotle je 91.578% s množstvím přivedeného paliva $1.625 \text{ m}^3/\text{s}$.

19 Seznam použitých zdrojů

- [1] Doc. Ing. Florian Budaj, CSc.:
- [2] Ing. Dlouhý, CSc.:
- [3] Ing. Marek Baláš, : Kotle a výměníky tepla

20 Seznam obrázků

Obr.:2-1 *Schéma stávajícího olejového kotle (mazut)*
Obr.:2.1-1 *I-t diagram spalín (mazut)*
Obr.:2.2-1 *Pilový diagram stávajícího kotle (mazut)*
Obr. 3-1: *Schéma kotle po plynofikaci*
Obr.:4.3-1 *I-t diagram spalín*
Obr.:6.1-1 *Zjednodušený obr. spalovací komory po plynofikaci*
Obr.7.2.1-1 *Bilance přehřátí vody na vstupu do Eka1*
Obr.7.2.4-1 *Bilance vstříku*
Obr.7.3-1: *Pilový diagram (plyn)*
Obr.8-1: *Rozteče trubek mříže*
Obr.9.1-1: *Rozteče trubek mříže PP2*
Obr.10.1-1: *Rozteče trubek PP2*
Obr.10.1-1: *Rozteče trubek PP1*
Obr.12-1: *žebrování*
Obr.12-2: *Rozteče dodatkového výparníku*
Obr.13-1: *Rozteče trubek EKO2*
Obr.14-1: *Rozteče trubek EKO1*
Obr.15-1: *Rozteče trubek OVZ1*
Obr.16-1: *Rozteče trubek OVZ1*

21 Seznam tabulek

Tab.:2-1 *Složení paliva (mazut)*
Tab.:2.1-1 *I-t tabulka vzduchu a produktu spalování*
Tab.:4.3-1 *Entalpie složek spalín*
Tab.:4.3-2 *I-t tabulka vzduchu a produktu spalování*

22 Seznam použitých symbolů

a	m	šířka spalovací komory nebo tahu
a	-	stupeň černosti proudu spalin
a_o	-	stupeň černosti ohniště
a_{ST}	-	stupeň černosti povrchu stěn
a_{PL}	-	efektivní stupeň černosti plamene
a_{NS}	-	stupeň černosti nesvítivé části plamene
a_{SV}	-	stupeň černosti svítivé části plamene
b	m	hloubka tahu
B_o	-	Boltzmannovo číslo
c_P	$kJ/kg \cdot K$	měrná tepelná kapacita paliva
c	$kJ/kg \cdot K$	měrná teplo
c_S	-	korekční součinitel na uspořádání svazku na příčné rozteči
c_Z	-	korekční součinitel na počet řad v podélném směru
d_e	m	ekvivalentní průměr
D	m	vnější průměr trubky
d	m	vnitřní průměr trubky
f	m^2	průřez pro médium
$F_{horní}$	m^2	plocha horní části spalovací komory
$F_{střed}$	m^2	plocha střeni části spalovací komory
$F_{dolní}$	m^2	plocha dolní části spalovací komory
$F_{SP.K}$	m^2	součet ploch částí komor
F_{nos}	m^2	plocha nosu ve spalovací komory
$F_{zaNosem}$	m^2	plocha ze nosem ve spalovací komoře
$F_{zeb.tr.}$	m^2	plocha ze nosem spalovací komory
$F_{4hoř.}$	m^2	plocha hořáků
$F_{3otv.}$	m^2	plocha otvorů
F_{ST}	m^2	celková plocha spalovací komory
$F_{ÚS}$	m^2	účinná plocha stěn spalovací komory
F_{SP}	m^2	světlý průřez spalin
h_h	m	výška hořáku
h_c	m	výška ohniště
i_{Buben}	kJ/kg	entalpie páry v bubnu
$i_{vstřík}$	kJ/kg	entalpie vstříku
i_{KonOUT}	kJ/kg	entalpie přehřáté vody v kondenzátoru
i_{Ek01IN}	kJ/kg	entalpie na vstupu do ekonomizéru 1
$i_{Ek01OUT}$	kJ/kg	entalpie na výstupu do ekonomizéru 1
i_{Ek02IN}	kJ/kg	entalpie na vstupu do ekonomizéru 2
$i_{Ek02OUT}$	kJ/kg	entalpie na výstupu do ekonomizéru 2
i_{PP2IN}	kJ/kg	entalpie na vstupu do přehříváku 2
i_{PP1OUT}	kJ/kg	entalpie na výstupu z přehříváku 1
$i_{PP2mřížOUT}$	kJ/kg	entalpie na výstupu z přehřívákové mříže
i_P	kJ/kg	fyzické teplo paliva
i_{NV}	kJ/kg	entalpie napájecí vody
i_{PP}	kJ/kg	entalpie přehřáté páry

I_{SPmin}	kJ/kg	entalpie spalin při stechiometrickém spalování
I_{VZmin}	kJ/kg	entalpie vzduchu při stechiometrickém spalování
I_{SP}	kJ/kg	entalpie spalin
I_{VZ}	kJ/kg	entalpie vzduchu
k	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel prostupu tepla
k	$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$	součinitel zeslabení sálání
k_{NS}	$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$	součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny
k_{NS}	$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$	součinitel zeslabení sálání svítivými tříatomovými plyny
M	-	součinitel
M_{PP}	t/h	parní výkon kotle
M_{PV}	t/h	množství paliva
$M_{vstřik}$	kg/s	množství vstřiku
n_{TR}	-	počet trubek v jedné řadě
O_{Ar}	m^3/m^3	objem argonu
O_{CO_2}	m^3/m^3	objem oxidu uhličitého
O_{N_2}	m^3/m^3	objem dusíku
O_{O_2min}	m^3/m^3	minimální objem kyslíku ke spálení m^3 paliva
O_{VZmin}^S	m^3/m^3	minimální objem suchého vzduchu ke spálení m^3 paliva
O_{VZmin}^V	m^3/m^3	minimální objem vlhkého vzduchu ke spálení m^3 paliva
O_{SPmin}^S	m^3/m^3	minimální objem suchých spalin po spálení m^3 paliva
O_{H_2Omin}	m^3/m^3	minimální objem vodní páry ve spalinách po spálení m^3 Paliva
O_{SPod}	m^3/m^3	objem spalin odchozích
O_{SPmin}^V	m^3/m^3	minimální objem vlhkých spalin po spálení m^3 paliva
O_{SPsRec}	m^3/m^3	objem spalin s recirkulací
O_{VZ}	m^3/m^3	skutečný objem vzduchu ke spálení m^3 paliva
O_{SP}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	skutečný objem spalin ke spálení m^3 paliva
$\overline{O_{SP} \cdot C}$	$kJ/m^3 \cdot K$	střední celkové měrné teplo spalin
p_{SP}	MPa	parciální tlak tříatomových plynů
Pr	-	Prandtlovo číslo
ΔQ	%	odchylka celkové bilance
Q_b	kJ/m^3	Bilanční teplo spalin
Q_C	kJ/m^3	celkové teplo odebrané spalinám
Q_P^P	kJ/m^3	teplo přivedené do kotle spálením 1 kg paliva
Q_{VZ}	kJ/m^3	Teplo přivedené do kotle spalovacím vzduchem
Q_S	kJ/m^3	Množství tepla odevzdané ve spalovací komoře
Q_V	kW	Výrobní teplo páry
Q_V^{PP}	kW	tepelný výkon přehříváku
Q_V^{VYP}	kW	tepelný výkon výparníku
Q_V^{EKO}	kW	tepelný výkon ohříváku vody
Q_V^{CEL}	kW	součet výkonů
Q_i^r	$kJ \cdot kg^{-1}$	výhřevnost paliva
r_{H_2O}	-	objemový podíl vodní páry ve spalinách
r_{SP}	-	objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách
S	m	účinná tloušťka sálavé plochy
S_1, S_2	m	rozteč trubek

S	m^2	teplosměnná plocha
t_K	$^{\circ}C$	teplota na konci kotle
t_o	$^{\circ}C$	teplota na konci ohniště
t_P	$^{\circ}C$	teplota paliva
t_{STR}^{SP}	$^{\circ}C$	střední teplota spalin
t_{MED}^{out}	$^{\circ}C$	teplota média na výstupu
t_{MED}^{in}	$^{\circ}C$	teplota média na vstupu
t_{MED}^{STR}	$^{\circ}C$	střední teplota proudu média
T_Z	K	teplota vnějšího nánosů na trubkách
V_O	m^3	aktivní objem ohniště
w_{PP}	$m \cdot s^{-1}$	rychlost média
w_{SP}	m/s	rychlost spalin
z	-	počet řad
z_{CO}	%	ztráta chemickým nedopalem
z_{SO}	%	ztráta sdílením tepla do okolí
z_K	%	ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta)
α_K	-	součinitel přebytku vzduchu na konci kotle
β	-	součinitel přebytku vzduchu do hořáku
Δt	$^{\circ}C$	Střední teplotní log spád
ξ	-	součinitel zanesení stěn
η_K	%	účinnost kotle
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti
ν	$m^2 \cdot s^{-1}$	kinematická viskozita
σ_1	-	poměrná příčná rozteč
σ_2	-	poměrná podélná rozteč
φ	-	součinitel uchování tepla
ψ	-	součinitel tepelné efektivnosti stěn

23 Seznam použitých zkratk

PP- přehřívák páry

EKO- ekonomizér

OVZ- ohřívák vzduchu

24 Seznam příloh

24-1-Zkrácení přehříváku

24-2-Napojení dodat výparníku