VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ BIOMASY

GRATE BOILER FOR BIOMASS COMBUSTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Marián Kopeček
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	**Bc. Marián Kopeček**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.**
Akademický rok:	2015/16

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:

Roštový kotel na spalování biomasy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracujte tepelný výpočet a rozměrový návrh kotle na spalování biomasy na vibračním roštu moderní konstrukce. Množství vzduchu a umístění sekundárního vzduchu ve spalovací komoře je dáno dodavatelem roštu. Stanovte teplotu spalin na výstupu z kotle při nahrazení vstupního ohříváku vzduchu trubkovým ohřívákem vody.

Kotel řešte s parním ohřívákem vzduchu pro předehřev vzduchu trubkovým spalinovým ohřívákem vzduchu, výhřevnými plochami EKA a přehříváky páry s regulací teploty páry dvěma vstřiky napájecí vodou.

Složení paliva a parametry kotle budou definovány zadavatelem během výpočtu.

Cíle diplomové práce:

Vypracujte tepelný výpočet a rozměrový návrh kotle na spalování biomasy, který bude respektovat obsah síry v palivu, vyčíslete dosaženou účinnost kotle. Práci doplňte o diagram průběhu teploty pracovního média a spalin, nakreslete schéma bilance vstřiků kotle. Stanovte bilanci vstřiků a jejich dimenzování.

Seznam 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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce obsahuje návrh parního kotle na spalování dřevní štěpky o parametrech páry 88 t/h, 9,6 MPa, 520 °C. Pro dané parametry je zpracován tepelný výpočet a rozměrový návrh kotle.

ABSTRACT

The thesis includes design of steam boiler burning woodchips with parameters of steam 88 t/h, 9,6 MPa, 520 °C. For these parameters is processed a heat calculation and dimensional design of boiler.

KLÍČOVÉ SLOVA

Parní kotel, biomasa, dřevní štěpka, výparník, přehřívák, ekonomizér, účinnost

KEYWORDS

Steam boiler, biomass, woodchips, evaporator, super heater, economizer, efficiency

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOPEČEK, Marián. *Roštový kotel na spalování biomasy o parametrech páry 88 t/h, 9,6 MPa, 520 °C*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně za pomoci odborných konzultací, literatury a podkladů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 27. 5. 2016 …….

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Těmito pár řádky bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Zdeňku Skálovi, CSc. a panu Ing. Mirku Hudečkovi, CSc. za odbornou pomoc, vedení a cenné rady a připomínky v průběhu zpracovávání této práce.

OBSAH

1 ÚVOD 10
2 STECHIOMETRICKÉ VÝPOČTY 11
2.1 Minimální množství spalin a vzduchu 11
2.2 Množství spalin a vzduchu při spalování s přebytkem vzduchu 13
2.3 Entalpie vzduchu a produktů spalování 14
3 ZÁKLADNÍ BILANCE KOTLE 16
3.1 Redukovaná výhřevnost 16
3.2 Tepelné ztráty a účinnost kotle 17
3.2.1 Ztráta mechanickým nedopalem 17
3.2.2 Ztráta chemickým nedopalem 18
3.2.3 Ztráta sáláním a vedením do okolí Z_{sv} 19
3.2.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků 19
3.2.5 Ztráta citelným teplem spalin (komínová) 20
3.2.6 Účinnost kotle 21
3.3 Výrobní teplo páry a množství paliva 21
3.4 Tepelné bilance jednotlivých dílů kotle 21
3.4.1 Přehřívák páry IV (PIV) 22
3.4.2 Vstřik napájecí vody II (VSII) 22
3.4.3 Přehřívák páry III (PIII) 23
3.4.4 Vstřik napájecí vody I (VSI) 23
3.4.5 Přehřívák páry II (PII) 24
3.4.6 Přehřívák páry I (PI) 24
3.4.7 Výparník (VYP) 25
3.4.8 Ohřívák vody III (EKOIII) 25
3.4.9 Ohříváky vody II a I (EKO-II,I) 26
3.4.10 Ohřívák vzduchu IV (OVZIV) 26
3.4.11 Ohříváky vzduchu III,II,I (OVZ-III,II,I) 27

4 VÝPOČET SPALOVACÍ KOMORY 28
5 VÝPOČET KONVEKČNÍCH PLOCH 33
5.1 Deskový přehřívák páry (část A) 33
5.1.1 Parametry 34
5.1.2 Proudění ze strany spalin (příčné) 34
5.1.3 Proudění ze strany páry (podélné) 36
5.2 Deskový přehřívák (část B) 45
5.2.1 Parametry 45
5.2.2 Proudění ze strany spalin (příčné) 46
5.2.3 Proudění ze strany páry (podélné) 48
5.2.4 Výpočet paralelních ploch v prostoru přehříváku III 57
5.3 Přehřívák IV (PIV) 58
5.3.1 Parametry 58
5.3.2 Proudění ze strany spalin (příčné) 59
5.3.3 Podélné obtékání ze strany páry 60
5.3.4 Výpočet paralelních ploch v prostoru přehříváku PIV 66
5.4 Přehřívák II (PII) 67
5.4.1 Parametry 67
5.4.2 Proudění ze strany spalin (příčné) 68
5.4.3 Podélné obtékání ze strany páry 70
5.4.4 Výpočet paralelních ploch v prostoru přehříváku PII 75
5.5 Kotlová mříž 76
5.5.1 Proudění ze strany spalin (příčné) 76
5.5.2 Proudění ze strany páry (podélné) 78
5.6 Přehřívák I (PI) 82
5.6.1 Proudění ze strany spalin (příčné) 83
5.6.2 Proudění ze strany páry (podélné) 84
5.7 Ohřívák vody III (EKOIII) 90
5.7.1 Proudění ze strany spalin (příčné) 91

5.7.2 Proudění ze strany vody (podélné) 92
5.8 Ohřívák vzduchu IV (OVZIV) 97
5.8.1 Proudění ze strany spalin (příčné) 98
5.8.2 Proudění ze strany vzduchu (podélné) 99
5.9 Ohřívák vody II,I (EKO-II,I) 105
5.9.1 Proudění ze strany spalin (příčné) 106
5.9.2 Proudění ze strany vody (podélné) 108
5.10 Ohřívák vzduchu III,II,I (OVZ-III,II,I) 111
5.10.1 Proudění ze strany spalin (příčné) 111
5.10.2 Proudění ze strany vzduchu (podélné) 113
6 PILOVÝ DIAGRAM 119
7 KONTROLA TEPELNÉ BILANCE 120
8 ZÁVĚR 122

1 Úvod

Diplomová práce obsahuje tepelný výpočet a rozměrový návrh kotle na spalování biomasy, konkrétně čisté dřevní štěpky. Palivo je spalováno na vibračním roštu moderní konstrukce. Kotel používá parní ohřívák pro předehřev vzduchu na 40 °C. Teplota napájecí vody je 154 °C.

Parametry dřevní štěpky

Výhřevnost	$Q_i^r = 10800 \quad kJ/kg$
Obsah celkové vody	$W_t^r = 40 \ \%$
Obsah popele	$A^r = 2 \ \%$

Složení hořlaviny surového paliva

Obsah uhlíku	$C^r = 31,72 \ \%$
Obsah vodíku	$H^r = 3,42 \ \%$
Obsah dusíku	$N^r = 0,23 \ \%$
Obsah kyslíku	$O^r = 22,62 \ \%$
Obsah síry	$S^r = 0,009 \ \%$

Prvotní část práce obsahuje stechiometrické výpočty. Je zde vypočítáno minimální množství spalin a vzduchu při stechiometrickém spalování a při spalování s přebytkem vzduchu. Dále pak určeny entalpie vzduchu a produktů spalování.

V následující části je provedena tepelná bilance kotle, která spočívá ve výpočtu redukované výhřevnosti, tepelných ztrát, účinnosti, určení množství paliva, výrobního tepla páry, tepelné bilance jednotlivých dílů kotle (přehřívák páry IV, přehřívák páry III, přehřívák páry II, přehřívák páry I, výparník, ohřívák vody III, ohřívák vody II, II, I, ohřívák vzduchu IV, ohřívák vzduchu III, II, I) a také bilance dvou vstřiků napájecí vody do páry za přehřívákem páry III a II. Dále je část věnována návrhu rozměrů a výpočtu spalovací komory a určení teploty nechlazeného plamene a teploty spalin na výstupu z ohniště.

Další část je věnována výpočtům jednotlivých konvekčních ploch (určení rozměrů, počtu trubek a řad,…), na jejichž koncích je vypočítán skutečný výkon ploch, který je porovnán s navrhovaným výkonem a určena chyba výpočtu v procentech a teplota spalin na výstupu z kotle.

Na konci práce je sestrojen pilový digram z výsledných hodnot výkonů jednotlivých ploch a zjištěných teplot spalin a médií a provedena kontrola tepelné bilance ukončená vypočítáním celkové odchylky.

2 Stechiometrické výpočty

Stechiometrické výpočty slouží ke zjištění objemu vzduchu, který je potřebný pro spálení 1 kilogramu paliva a objemu spalin, které vzniknou při spalování. Základem stechiometrických výpočtů jsou chemické reakční rovnice (stechiometrické spalovací rovnice). Vzorce v této diplomové práci jsou brány pro průběh dokonalého spalování. [1]

2.1 Minimální množství spalin a vzduchu

Minimální množství kyslíku potřebné pro dokonalé spálení 1 kg paliva

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

$$O_{O_2\,\min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,3172}{12,01} + \frac{0,0342}{4,032} + \frac{0,00009}{32,06} - \frac{0,2262}{32} \right) = \underline{0,623058 \;\; Nm^3 / kg} \qquad [2.1]$$

Minimální množství suchého vzduchu pro dokonalé spálení 1 kg paliva
(vycházíme z množství kyslíku v suchém vzduchu z *Tab. 2-1*)

Složka	Objemový podíl [-]
kyslík O_2	0,2100
dusík N_2	0,7805
argon Ar (včetně vzácných plynů)	0,0092
oxid uhličitý CO_2	0,0003

Tab. 2-1 Objemové složení suchého vzduchu [1]

$$O_{VS\,\min} = \frac{O_{O_2\,\min}}{0,21} = \frac{0,623058}{0,21} = \underline{2,966944 \;\; Nm^3 / kg} \qquad [2.2]$$

Součinitel χ_v

Vyjadřuje podíl vodní páry v 1 Nm^3 suchého vzduchu

$$\chi_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\phi}{100} \cdot p''}$$

$$\chi_v = 1 + \frac{70}{100} \cdot \frac{0,00358376}{0,1 - \frac{70}{100} \cdot 0,00358376} = \underline{1,000000025} \qquad [2.3]$$

Kde φ [%] - relativní vlhkost vzduchu, volím 70 % [1]
p'' $[MPa]$ - parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro danou teplotu vzduchu (aproximací z *Tab. 2-2* pro teplotu vzduchu 25 °C)
p_c $[MPa]$ - celkový tlak, obvykle bývá 0,1 MPa [1]

t_v [℃]	0	10	20	30	40	50
p" [MPa]	0,00061	0,00123	0,00234	0,00424	0,00737	0,01233

Tab. 2-2 Závislost parciálního tlaku páry na teplotě vzduchu [1]

Minimální množství vlhkého vzduchu potřebné pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$O_{VV\,\min} = \chi_v \cdot O_{VS\,\min} = 1,000000025 \cdot 2,966944 = \underline{2,96694418 \;\; Nm^3/kg} \qquad [2.4]$$

Množství vodní páry v tomto objemu

$$O^V_{H_2O} = O_{VV\,\min} - O_{VS\,\min} = 2,96694418 - 2,966944108 = \underline{7,44 \cdot 10^{-8} \;\; Nm^3/kg} \qquad [2.5]$$

Minimální množství spalin

Při dokonalém spálení 1 kg paliva s minimálním množstvím vzduchu, tj. se součinitelem přebytku spalovacího vzduchu α=1.

$$O_{SS\,\min} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar}$$
$$O_{SS\,\min} = 0,588806153 + 0,00006145041 + 2,317538823 + 0,027295886 \qquad [2.6]$$
$$O_{SS\,\min} = \underline{2,933702 \;\; Nm^3/kg}$$

Množství jednotlivých složek ve spalinách vypočteme následovně:

Množství oxidu uhličitého

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VS\,\min}$$
$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,3172 + 0,0003 \cdot 2,966944 = \underline{0,588806153 \;\; Nm^3/kg} \qquad [2.7]$$

Množství oxidu siřičitého

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,00009 = \underline{0,00006145041 \;\; Nm^3/kg} \qquad [2.8]$$

Množství dusíku

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot O_{VS\,\min}$$
$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0023 + 0,7805 \cdot 2,966944 = \underline{2,317538823 \;\; Nm^3/kg} \qquad [2.9]$$

Množství argonu (včetně dalších vzácných plynů ve vzduchu)

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VS\,\min} = 0,0092 \cdot 2,966944 = \underline{0,027295886 \;\; Nm^3 / kg} \qquad [2.10]$$

Množství vodní páry v minimálním množství vlhkých spalin

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W_t^r + O_{H_2O}^V$$

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,0342 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,4 + 0,049339 = \underline{0,877335776 \;\; Nm^3 / kg} \qquad [2.11]$$

Minimální množství vlhkých spalin

$$O_{SV\,\min} = O_{SS\,\min} + O_{H_2O}^S = 2,933702 + 0,877335776 = \underline{3,811038 \;\; Nm^3 / kg} \qquad [2.12]$$

2.2 Množství spalin a vzduchu při spalování s přebytkem vzduchu

Množství spalin z 1 kg paliva při spalování s přebytkem vzduchu

$$O_{SV} = O_{SV\,\min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV_{\min}}$$

$$O_{SV} = 3,811038 + (1,404 - 1) \cdot 2,96694418 = \underline{5,00968 \;\; Nm^3 / kg} \qquad [2.13]$$

Množství vzduchu při spalování s přebytkem

$$O_{VV} = \alpha \cdot O_{VV\,\min} = 1,404 \cdot 2,96694418 = \underline{4,16559 \;\; Nm^3 / kg} \qquad [2.14]$$

2.3 Entalpie vzduchu a produktů spalování

t [℃]	CO_2	SO_2	N_2	A_r	H_2O	suchý vzduch	CO	O_2	popílek [kJ/kg]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,1	32,57	32,49	32,78	20,2
100	170	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4
200	357,5	394,1	259,9	186	304,5	266,2	261,4	267	170
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395	406,8	264,6
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6
500	994,4	1070	664	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1	960,4	1003	658,3
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1129	1109	1159	760,8
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1283	1260	1318	868,4
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1439	1413	1477	982,8
1100	2458	2540	1544	1020	1925	1597	1567	1638	1106
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1756	1723	1802	1240
1300	2976	3063	1853	1207	2344	1916	1881	1965	1386
1400	3239	3323	2009	1300	2559	2077	2040	2129	1543
1500	3503	3587	2166	1393	2779	2240	2199	2293	1710
1600	3769	3838	2325	1577	3002	2403	2359	2465	2061

Tab. 2-3 Měrná entalpie vybraných složek spalin v závislosti na teplotě [1]

Entalpii spalin, které mají teplotu t $[°C]$ a vzniknou při spálení 1 kg paliva s přebytkem vzduchu α vypočítáme

$$I_S^{t,\alpha} = I_{S\min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{V\min}^t \qquad [kJ/kg] \qquad [2.15]$$

V tomto vzorci je $I_{S\min}^t$ entalpie spalin při $\alpha = 1$ a $I_{V\min}^t$ entalpie minimálního množství vzduchu při teplotě t, které určíme podle vztahu

$$I_{S\min}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^t + a_{ú} \cdot A^r \cdot i_{pop}^t \qquad [kJ/kg] \qquad [2.16]$$

$$I_{V\min}^t = O_{VS\min} \cdot i_{VS}^t + O_{H_{2O}}^v \cdot i_{H_2O}^t \qquad [kJ/kg] \qquad [2.17]$$

Vzorový výpočet entalpie spalin pro t=25 ℃

$$I^t_{S\min} = O_{CO_2} \cdot i^t_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i^t_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i^t_{N_2} + O_{H_2O} \cdot i^t_{H_2O} + O_{A^r} \cdot i^t_{A^r}$$
$$I^t_{S\min} = 0,58881 \cdot 41,62 + 0,0000615 \cdot 46,81 + 2,31754 \cdot 32,53 + 0,87734 \cdot 39,1 + 0,0273 \cdot 23,32 \qquad [2.18]$$
$$I^t_{S\min} = \underline{134,839 \ \ kJ / Nm^3}$$

$$I^t_{V\min} = O_{VS\min} \cdot i^t_{VS} + O^v_{H_2O} \cdot i^t_{H_2O}$$
$$I^t_{V\min} = 2,966944105 \cdot 32,57 + 7,44 \cdot 10^{-8} \cdot 39,1 \qquad [2.19]$$
$$I^t_{V\min} = \underline{96,633 \ \ kJ / Nm^3}$$

$$I^{t,\alpha_1}_S = I^t_{S\min} + (\alpha_1 - 1) \cdot I^t_{V\min}$$
$$I^{t,\alpha_1}_S = 134,8388954 + (1-1) \cdot 96,63337242 \qquad [2.20]$$
$$I^{t,\alpha_1}_S = \underline{134,839 \ \ kJ / Nm^3}$$

$$I^{t,\alpha_2}_S = I^t_{S\min} + (\alpha_2 - 1) \cdot I^t_{V\min}$$
$$I^{t,\alpha_2}_S = 134,8388954 + (1,324 - 1) \cdot 96,63337242 \qquad [2.21]$$
$$I^{t,\alpha_2}_S = \underline{166,148 \ \ kJ / Nm^3}$$

$$I^{t,\alpha_3}_S = I^t_{S\min} + (\alpha_3 - 1) \cdot I^t_{V\min}$$
$$I^{t,\alpha_3}_S = 134,8388954 + (1,344 - 1) \cdot 96,63337242 \qquad [2.22]$$
$$I^{t,\alpha_3}_S = \underline{168,081 \ \ kJ / Nm^3}$$

$$I^{t,\alpha_4}_S = I^t_{S\min} + (\alpha_4 - 1) \cdot I^t_{V\min}$$
$$I^{t,\alpha_4}_S = 134,8388954 + (1,364 - 1) \cdot 96,63337242 \qquad [2.23]$$
$$I^{t,\alpha_4}_S = \underline{170,013 \ \ kJ / Nm^3}$$

$$I^{t,\alpha_5}_S = I^t_{S\min} + (\alpha_5 - 1) \cdot I^t_{V\min}$$
$$I^{t,\alpha_5}_S = 134,8388954 + (1,384 - 1) \cdot 96,63337242 \qquad [2.24]$$
$$I^{t,\alpha_5}_S = \underline{171,946 \ \ kJ / Nm^3}$$

$$I^{t,\alpha_5}_S = I^t_{S\min} + (\alpha_6 - 1) \cdot I^t_{V\min}$$
$$I^{t,\alpha_5}_S = 134,8388954 + (1,404 - 1) \cdot 96,63337242 \qquad [2.25]$$
$$I^{t,\alpha_5}_S = \underline{173,879 \ \ kJ / Nm^3}$$

t [℃]	I^t_{Smin} [kJ/kg]	I^t_{Vmin} [kJ/kg]	$I_{\alpha i}$ [kJ/kg]					
			α_1=1	α_2=1,324	α_3=1,344	α_4=1,364	α_5=1,384	α_6=1,404
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	134,839	96,633	134,839	166,148	168,081	170,013	171,946	173,879
100	534,897	392,527	534,897	662,076	669,926	677,777	685,628	693,478
200	1085,077	789,801	1085,077	1340,972	1356,768	1372,564	1388,360	1404,156
300	1651,410	1194,195	1651,410	2038,330	2062,214	2086,097	2109,981	2133,865
400	2234,469	1607,194	2234,469	2755,200	2787,344	2819,487	2851,631	2883,775
500	2834,148	2029,687	2834,148	3491,766	3532,360	3572,954	3613,548	3654,141
600	3450,539	2461,377	3450,539	4248,026	4297,253	4346,481	4395,708	4444,936
700	4082,141	2901,968	4082,141	5022,379	5080,418	5138,458	5196,497	5254,536
800	4728,622	3349,680	4728,622	5813,918	5880,912	5947,905	6014,899	6081,893
900	5387,167	3806,589	5387,167	6620,502	6696,634	6772,765	6848,897	6925,029
1000	6060,281	4269,433	6060,281	7443,577	7528,966	7614,355	7699,743	7785,132
1100	6742,435	4738,210	6742,435	8277,615	8372,379	8467,143	8561,907	8656,672
1200	7435,438	5209,954	7435,438	9123,463	9227,662	9331,861	9436,061	9540,260
1300	8136,296	5684,665	8136,296	9978,127	10091,821	10205,514	10319,207	10432,901
1400	8843,870	6162,343	8843,870	10840,469	10963,716	11086,963	11210,209	11333,456
1500	9558,737	6645,955	9558,737	11712,026	11844,945	11977,864	12110,783	12243,703
1600	10284,532	7129,567	10284,532	12594,511	12737,103	12879,694	13022,285	13164,877

Tab. 2-4 I-t tabulka spalin

3 Základní bilance kotle

Cílem základních bilancí je určení účinnosti kotle a spotřeby paliva pro dosažení požadovaného výkonu. [1]

3.1 Redukovaná výhřevnost

Redukovaná výhřevnost

$$Q_{i\,red} = Q_i^r + i_{pv} + Q_{cz}$$
$$Q_{i\,red} = 10800 + 47,08 + 80,89 = \underline{10927,97 \quad kJ/kg} \qquad [3.1]$$

Fyzické teplo paliva

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv} = 2,354 \cdot 20 = \underline{47,08 \quad kJ/kg} \qquad [3.2]$$

Fyzické teplo uvažujeme pouze, je-li palivo předehříváno mimo kotel nebo u sušení v otevřeném mlecím okruhu. Jestliže palivo není předehříváno cizím zdrojem, uvažujeme fyzické teplo jen v případě, kdy platí rovnost

$$W_t^r \geq \frac{Q_i^r}{15000 \cdot 4{,}19}$$
$$0{,}4 \geq \frac{10800}{15000 \cdot 4{,}19} \qquad [1] \qquad [3.3]$$
$$0{,}4 \geq 0{,}1718$$

Nerovnost je splněna, takže s i_{pv} počítáme a teplotu paliva berem $t_{pv} = 20°C$ a měrnou tepelnou kapacitu paliva vypočítáme

$$c_{pv} = 4{,}19 \cdot W_t^r + c_{su} \cdot \left(1 - W_t^r\right)$$
$$c_{pv} = 4{,}19 \cdot 0{,}4 + 1{,}13 \cdot (1 - 0{,}4) = \underline{2{,}354 \quad kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}} \qquad [3.4]$$

Kde c_{su} $\left[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}\right]$ - měrné teplo sušiny paliva
(po odborné konzultaci volím hodnotu pro hnědé uhlí, tj. $c_{su} = 1{,}13 \quad kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

Teplo přivedené cizím zdrojem

$$Q_{cz} = \alpha \cdot \Delta I_{V\min} = 1{,}324 \cdot (157{,}73 - 96{,}633) = \underline{80{,}89 \quad kJ/kg} \qquad [3.5]$$

Kde α $[-]$ - součinitel přebytku vzduchu na vstupu do OVZ
(teplota vzduchu uvažována 25 ℃)
$\Delta I_{V\min}$ $[kJ \cdot kg]$ - rozdíl entalpií vzduchu pro teploty $40\,°C$ a $25\,°C$

3.2 Tepelné ztráty a účinnost kotle

3.2.1 Ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_c = Z_{cs} + Z_{cp} + Z_{cú} + Z_{cr}$$
$$Z_c = 0{,}012706 + 0{,}002541 + 0{,}029023 = 0{,}04427 = \underline{4{,}427 \ \%} \qquad [3.6]$$

Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce a škváře

$$Z_{cs} = \frac{C_s}{1 - C_s} \cdot X_s \cdot \frac{A^r}{Q_{i\,red}} \cdot Q_c$$
$$Z_{cs} = \frac{0{,}46}{1 - 0{,}46} \cdot 0{,}25 \cdot \frac{0{,}02}{10927{,}97} \cdot 32600 \qquad [3.7]$$
$$Z_{cs} = 0{,}012706 = \underline{1{,}2706 \ \%}$$

Kde X_s $[-]$ - podíl popela ve škváře, po odborné konzultaci volím 0,25
C_s $[-]$ - podíl hořlaviny ve škváře, po odborné konzultaci volím 0,46
Q_c $[kJ/kg]$ - výhřevnost hořlaviny strusky, uvažuje se $32600 \ kJ/kg$ [1]

Ztráta mechanickým nedopalem v popílku

$$Z_{cp} = \frac{C_p}{1-C_p} \cdot X_p \cdot \frac{A^r}{Q_{i\,red}} \cdot Q_c$$

$$Z_{cp} = \frac{0,46}{1-0,46} \cdot 0,05 \cdot \frac{0,02}{10927,97} \cdot 32600 \qquad [3.8]$$

$$Z_{cp} = 0,002541 = \underline{0,2541\ \%}$$

Kde X_p $[-]$ - podíl popela v popílku, po odborné konzultaci volím 0,05

C_p $[-]$ - podíl hořlaviny v popílku, po odborné konzultaci volím 0,46

Q_c $[kJ/kg]$ - výhřevnost hořlaviny popílku, uvažuje se 32600 kJ/kg [1]

Ztráta nedopalem v úletu

$$Z_{cú} = \frac{C_ú}{1-C_ú} \cdot X_ú \cdot \frac{A^r}{Q_{i\,red}} \cdot Q_c$$

$$Z_{cú} = \frac{0,41}{1-0,41} \cdot 0,7 \cdot \frac{0,02}{10927,97} \cdot 32600 \qquad [3.9]$$

$$Z_{cú} = 0,029023 = \underline{2,9023\ \%}$$

Kde $X_ú$ $[-]$ - podíl popela v úletu, po odborné konzultaci volím 0,7

$C_ú$ $[-]$ - podíl hořlaviny v úletu, po odborné konzultaci volím 0,41

Q_c $[kJ/kg]$ - výhřevnost hořlaviny úletu, uvažuje se 32600 kJ/kg [1]

Ztráta nedopalem v roštovém propadu Z_{cr}

Po odborné konzultaci neuvažujeme, protože roštový propad je nasypán do škváry, tudíž je již zahrnut ve ztrátě mechanickým nedopalem ve škváře či strusce.

3.2.2 Ztráta chemickým nedopalem

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{SS\,min}}{(21-O_{2\,ref}) \cdot Q_{i\,red}}$$

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot 200 \cdot 2,9337}{(21-0,06) \cdot 10927,97} \qquad [3.10]$$

$$Z_{CO} = 0,000543 = \underline{0,0543\ \%}$$

Kde $mgCO$ $[mg/Nm^3]$ - emisní limit CO, po odborné konzultaci 200 mg/Nm^3

$O_{2\,ref}$ $[\%]$ - obsah kyslíku pro referenční stav spalin, uvažováno 6 % [1]

3.2.3 Ztráta sáláním a vedením do okolí Z_{sv}

Po odborné konzultaci zvoleno $Z_{sv} = \underline{0,8\ \%}$

3.2.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = Z_{fs} + Z_{fp} + Z_{fú} + Z_{fr}$$
$$Z_f = 0,000216 + 0,000041 + 0,00037 = 0,000627 = \underline{0,0627\ \%} \qquad [3.11]$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků ve škváře či strusce

$$Z_{fs} = \frac{X_s}{1-C_s} \cdot \frac{A^r}{Q_{i\,red}} \cdot c_s \cdot t_s$$
$$Z_{fs} = \frac{0,25}{1-0,46} \cdot \frac{0,02}{10927,97} \cdot 0,979641 \cdot 260 = 0,000216 = \underline{0,0216\ \%} \qquad [3.12]$$

Kde X_s $[-]$ - podíl popela ve škváře či strusce, po odborné konzultaci 0,25
C_s $[-]$ - podíl hořlaviny ve škváře či strusce, po odborné konzultaci 0,46
c_s $[kJ/kgK]$ - měrná tepelná kapacita tuhých zbytků ve škváře či strusce (pro teplotu $260\ °C$)
t_s $[°C]$ - teplota tuhých zbytků, po odborné konzultaci zvoleno $260\ °C$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v popílku

$$Z_{fp} = \frac{X_p}{1-C_p} \cdot \frac{A^r}{Q_{i\,red}} \cdot c_p \cdot t_p$$
$$Z_{fp} = \frac{0,05}{1-0,46} \cdot \frac{0,02}{10927,97} \cdot 0,974621 \cdot 250 = 0,000041 = \underline{0,0041\ \%} \qquad [3.13]$$

Kde X_p $[-]$ - podíl popela v popílku, po odborné konzultaci 0,05
C_p $[-]$ - podíl hořlaviny v popílku, po odborné konzultaci 0,46
c_p $[kJ/kgK]$ - měrná tepelná kapacita tuhých zbytků v popílku (pro teplotu $250\ °C$)
t_p $[°C]$ - teplota tuhých zbytků v popílku, po odborné konzultaci $250\ °C$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v úletu

$$Z_{fú} = \frac{X_{ú}}{1-C_{ú}} \cdot \frac{A^r}{Q_{i\,red}} \cdot c_{ú} \cdot t_{ú}$$

$$Z_{fú} = \frac{0,7}{1-0,41} \cdot \frac{0,02}{10927,97} \cdot 0,945891 \cdot 181 = 0,00037 = \underline{0,037\ \%} \qquad [3.14]$$

Kde $X_{ú}$ $[-]$ - podíl popela v úletu, po odborné konzultaci 0,7

$C_{ú}$ $[-]$ - podíl hořlaviny v úletu, po odborné konzultaci 0,41

$c_{ú}$ $[kJ/kgK]$ - měrná tepelná kapacita tuhých zbytků v úletu (pro teplotu 181 $°C$)

$t_{ú}$ $[°C]$ - teplota tuhých zbytků v úletu, po odborné konzultaci 181 $°C$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v propadu Z_{fr}

Po odborné konzultaci neuvažujeme, protože roštový propad je nasypán do škváry, tudíž je již zahrnut ve ztrátě fyzickým teplem tuhých zbytků ve škváře či strusce.

3.2.5 Ztráta citelným teplem spalin (komínová)

$$Z_k = (1-Z_c) \cdot \frac{I_s^{181} - I_S^{25}}{Q_{i\,red}}$$

$$Z_k = (1-0,04427) \cdot \frac{1269,127 - 173,492}{10927,97} = 0,095821 = \underline{9,5821\ \%} \qquad [3.15]$$

Kde I_s^{181} - entalpie spalin za kotlem při teplotě 181 $°C$ a přebytku vzduchu 1,404

I_S^{25} - entalpie spalin při teplotě vzduchu v kotelně 25 $°C$ a přebytku vzduchu 1,404

Typ ztráty		**Procentuální podíl [%]**
ztráta mechanickým nedopalem	Z_c	4,427
ztráta chemickým nedopalem	Z_{CO}	0,0543
ztráta sáláním a vedením do okolí	Z_{sv}	0,8
ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	Z_f	0,0627
Ztráta citelným teplem spalin	Z_k	9,5821
CELKEM		**14,927**

Tab. 3-1 Jednotlivé ztráty kotle

3.2.6 Účinnost kotle

$$\eta_k = 1 - Z_c - Z_{co} - Z_{sv} - Z_f - Z_k$$
$$\eta_k = 1 - 0,04427 - 0,000543 - 0,008 - 0,000627 - 0,095821 = 0,85073 = \underline{85,073\ \%} \qquad [3.16]$$

3.3 Výrobní teplo páry a množství paliva

Výrobní teplo páry

$$Q_V = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) = 24,44 \cdot (3430,8 - 656,2) = \underline{67823,556\quad kW} \qquad [3.17]$$

Kde i_{pp} $[kJ/kg]$ - entalpie přehřáté páry, $i_{pp} = f(p_{pp}, t_{pp}) = 3430,8\quad kJ/kg$ [2]
i_{nv} $[kJ/kg]$ - entalpie napájecí vody, $i_{nv} = f(p_{nv}, t_{nv}) = 656,2\quad kJ/kg$ [2]

$$M_{pp} = \frac{88 \cdot 1000}{3600} = 24,444\quad kg/s$$

Množství paliva

$$M_{pal} = \frac{Q_v}{Q_{i\,red} \cdot \eta_k}$$
$$M_{pal} = \frac{67823,556}{10927,97 \cdot 0,85073} = \underline{7,29\quad kg/s} \qquad [3.18]$$

Výpočtové množství spáleného paliva

$$M_{pv} = M_{pal} \cdot (1 - z_c)$$
$$M_{pv} = 7,29 \cdot (1 - 0,04427) = \underline{6,97\quad kg/s} \qquad [3.19]$$

3.4 Tepelné bilance jednotlivých dílů kotle

Zadáno

Výstupní hodnoty přehřáté páry

$t_{pp} = 520\ °C$

$p_{pp} = 9,6\ MPa$

$i_{pp} = f(p_{pp}, t_{pp}) = 3430,8\ kJ/kg$ [2]

Hodnoty napájecí vody

$t_{nv} = 154\ °C$

$p_{nv} = 11,55\ MPa$

$i_{nv} = f(p_{nv}, t_{nv}) = 656,28\ kJ/kg$ [2]

3.4.1 Přehřívák páry IV (PIV)

$\Delta p_{PIV} = 0,4 \quad MPa$

Vstupní parametry páry do PIV

$$p_{PIV}^{in} = p_{PIV}^{out} + \Delta p_{PIV} = 9,6 + 0,4 = 10 \quad MPa$$
$$t_{PIV}^{in} = 400 \ °C \qquad [3.20]$$
$$i_{PIV}^{in} = f(p_{PIV}^{in}, t_{PIV}^{in}) = 3097,4 \quad kJ/kg \quad [2]$$

Výstupní hodnoty páry z PIV

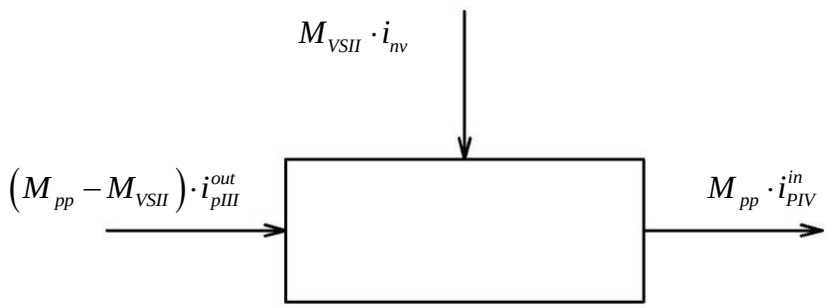
$$p_{PIV}^{out} = p_{pp} = 9,6 \quad MPa$$
$$t_{PIV}^{out} = t_{pp} = 520 \ °C$$
$$i_{PIV}^{out} = i_{pp} = 3430,8 \quad kJ/kg$$

Teplo předané PIV

$$Q_{PIV} = M_{pp} \cdot (i_{PIV}^{out} - i_{PIV}^{in})$$
$$Q_{PIV} = 24,444 \cdot (3430,8 - 3097,4) \qquad [3.21]$$
$$Q_{PIV} = \underline{8149,6296 \quad kJ/kg}$$

3.4.2 Vstřik napájecí vody II (VSII)

Za přehřívákem PIII je vstřik napájecí vodou, kterým se kontroluje výstupní teplota páry z kotle.



Obr. 3-1 Schéma vstřiku napájecí vody II

$$\left(M_{pp} - M_{VSII}\right) \cdot i_{pIII}^{out} + M_{VSII} \cdot i_{nv} = M_{pp} \cdot i_{PIV}^{in}$$
$$M_{pp} \cdot i_{PIII}^{out} - M_{VSII} \cdot i_{PIII}^{out} + M_{VSII} \cdot i_{nv} = M_{pp} \cdot i_{PIV}^{in}$$
$$M_{VSII} \cdot (i_{nv} - i_{PIII}^{out}) + M_{pp} \cdot i_{PIII}^{out} = M_{pp} \cdot i_{PIV}^{in}$$
$$M_{VSII} \cdot (i_{nv} - i_{PIII}^{out}) = M_{pp} \cdot i_{pIV}^{in} - M_{pp} \cdot i_{PIII}^{out} \qquad [3.22]$$
$$M_{VSII} = \frac{M_{pp} \cdot i_{PIV}^{in} - M_{pp} \cdot i_{PIII}^{out}}{i_{nv} - i_{PIII}^{out}} = \frac{M_{pp} \cdot \left(i_{IV}^{in} - i_{PIII}^{out}\right)}{i_{nv} - i_{PIII}^{out}}$$
$$M_{VSII} = \frac{24,44 \cdot \left(3097,4 - 3309,7\right)}{656,28 - 3309,7} = \underline{1,9557 \quad kg/s}$$

3.4.3 Přehřívák páry III (PIII)

$$\Delta p_{PIII} = 0,4 \quad MPa$$

Výstupní hodnoty páry z PIII

$$p_{PIII}^{out} = p_{PIV}^{in} = 10 \quad MPa$$
$$t_{PIII}^{out} = 475 \ °C$$
$$i_{PIII}^{out} = f(p_{PIII}^{out}, t_{PIII}^{out}) = 3309,7 \quad kJ/kg \quad [2]$$

Vstupní parametry do PIII

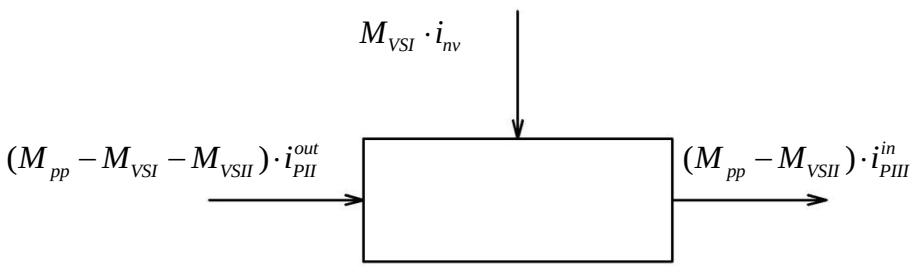
$$p_{PIII}^{in} = p_{PIII}^{out} + \Delta p_{PIII} = 10 + 0,4 = 10,4 \quad MPa$$
$$t_{PIII}^{in} = 390 \ °C \qquad [3.23]$$
$$i_{PIII}^{in} = f(p_{PIII}^{in}, t_{PIII}^{in}) = 3056,4 \quad kJ/kg \quad [2]$$

Teplo předané PIII

$$Q_{PIII} = (M_{pp} - M_{VSII}) \cdot (i_{PIII}^{out} - i_{PIII}^{in})$$
$$Q_{PIII} = (24,444 - 1,9557) \cdot (3309,7 - 3056,4) = \underline{5696,2704 \quad kW} \qquad [3.24]$$

3.4.4 Vstřik napájecí vody I (VSI)

Za přehřívákem PII je vstřik napájecí vodou, kterým se kontroluje výstupní teplota páry. Teplota páry nesmí překročit 475˚C vzhledem k doporučenému materiálu.



Obr. 3-2 Schéma vstřiku napájecí vody I

$$(M_{pp} - M_{VSI} - M_{VSII}) \cdot i_{PII}^{out} + M_{VSI} \cdot i_{nv} = (M_{pp} - M_{VSII}) \cdot i_{PIII}^{in}$$
$$M_{pp} \cdot i_{PII}^{out} - M_{VSI} \cdot i_{PII}^{out} - M_{VSII} \cdot i_{PII}^{out} + M_{VSI} \cdot i_{nv} = M_{pp} \cdot i_{PIII}^{in} - M_{VSII} \cdot i_{PIII}^{in}$$
$$M_{VSI} \cdot (i_{nv} - i_{PII}^{out}) = M_{pp} \cdot i_{PIII}^{in} - M_{VSII} \cdot i_{PIII}^{in} - M_{pp} \cdot i_{PII}^{out} + M_{VSII} \cdot i_{PII}^{out}$$
$$M_{VSI} = \frac{M_{pp} \cdot (i_{PIII}^{in} - i_{PII}^{out}) - M_{VSII} \cdot (i_{PIII}^{in} - i_{PII}^{out})}{(i_{nv} - i_{PII}^{out})} \qquad [3.25]$$
$$M_{VSI} = \frac{24,44 \cdot (3056,4 - 3263,5) - 1,9557 \cdot (3056,4 - 3263,5)}{(656,28 - 3263,5)}$$
$$M_{VSI} = \underline{1,7863 \quad kg/s}$$

3.4.5 Přehřívák páry II (PII)

$$\Delta p_{PII} = 0,4 \quad MPa$$

Výstupní hodnoty z PII

$$p_{PII}^{out} = p_{PIII}^{in} = 10,4 \quad MPa$$
$$t_{PII}^{out} = 460 \quad °C$$
$$i_{PII}^{out} = f(p_{PII}^{out}, t_{PII}^{out}) = 3263,5 \quad kJ/kg \quad [2]$$

Vstupní hodnoty do PII

$$p_{PII}^{in} = p_{PII}^{out} + \Delta p_{PII} = 10,4 + 0,4 = 10,8 \quad MPa$$
$$t_{PII}^{in} = 360 \quad °C \qquad [3.26]$$
$$i_{PII}^{in} = f(p_{PII}^{in}, t_{PII}^{in}) = 2937,1 \quad kJ/kg \quad [2]$$

Teplo odevzdané PII

$$Q_{PII} = (M_{pp} - M_{VSII} - M_{VSI}) \cdot (i_{PII}^{out} - i_{PII}^{in})$$
$$Q_{PII} = (24,444 - 1,9558 - 1,7863) \cdot (3263,5 - 2937,1) = \underline{6757,1076 \quad kW} \qquad [3.27]$$

3.4.6 Přehřívák páry I (PI)

$$\Delta p_{PI} = 0,4 \quad MPa$$

Výstupní parametry páry z PI

$$p_{PI}^{out} = p_{PII}^{in} = 10,8 \quad MPa$$
$$t_{PI}^{out} = t_{PII}^{in} = 360 \quad °C$$
$$i_{PI}^{out} = i_{PII}^{in} = 2937,1 \quad kJ/kg$$

Vstupní parametry páry do PI

$p_{PI}^{in} = 11,2 \quad MPa \quad - tlak\, v\, bubnu$

$t_{PI}^{in} = 319,44 \ °C$

$i_{PI}^{in} = f(p_{PI}^{in}, t_{PI}^{in}) = 2702,4 \quad kJ/kg \quad [2]$

Teplo odevzdané PI

$$Q_{PI} = (M_{pp} - M_{VSII} - M_{VSI}) \cdot (i_{PI}^{out} - i_{PI}^{in})$$

$$Q_{PI} = (24,44 - 1,9557 - 1,7863) \cdot (2937,1 - 2702,4) \qquad [3.28]$$

$$Q_{PI} = \underline{4858,7413 \quad kW}$$

3.4.7 Výparník (VYP)

Výstupní hodnoty páry z VYP

$p_{VYP}^{out} = 11,2 \quad MPa \quad - tlak\ v\ bubnu$

$t_{VYP}^{out} = f(p_{výp}^{out}, x = 1) = 319,44 \ °C \quad [2]$

$i_{VYP}^{out} = f(p_{výp}^{out}, x = 1) = 2702,4 \quad kJ/kg \quad [2]$

Vstupní hodnoty vody do VYP

- včetně nedohřevu z EKOIII

$p_{VYP}^{in} = p_{VYP}^{out} = 11,2 \quad MPa$

$i_{VYP}^{in} = i_{EKOIII}^{out} = 989,44 \quad kJ/kg$

$t_{VYP}^{in} = t_{EKOIII}^{out} = 229,44 \ °C$

Teplo předané ve VYP

$$Q_{VYP} = (M_{pp} - M_{VSII} - M_{VSI}) \cdot (i_{VYP}^{out} - i_{VYP}^{in})$$

$$Q_{VYP} = (24,44 - 1,9557 - 1,7863) \cdot (2702,4 - 229,44) \qquad [3.29]$$

$$Q_{VYP} = \underline{35461,566 \quad kW}$$

3.4.8 Ohřívák vody III (EKOIII)

Výstupní parametry vody z EKOIII

$p_{EKOIII}^{out} = p_{VYP}^{in} = 11,2 \quad MPa$

$$t_{EKOIII}^{out} = t_{výp}^{out} - \Delta t = 319,44 - 90 = 229,44 \ °C \qquad [3.30]$$

$i_{EKOIII}^{out} = f(p_{EKOIII}^{out}, t_{EKOIII}^{out}) = 989,44 \quad kJ/kg \quad [2]$

Kde $\Delta t \quad [°C]$ - nedohřev, voleno 90 °C

Vstupní hodnoty vody do EKOIII

$$p_{EKOIII}^{in} = p_{EKOIII}^{out} + \Delta p_{EKOIII} = 11,2 + 0,19 = 11,39 \quad MPa$$
$$t_{EKOIII}^{in} = 204 \ °C \qquad [3.31]$$
$$i_{EKOIII}^{in} = f(p_{EKOIII}^{in}, t_{EKOIII}^{in}) = 874,32 \quad kJ/kg \quad [2]$$

Teplo předané EKOIII

$$Q_{EKOIII} = (M_{pp} - M_{VSII} - M_{VSI}) \cdot (i_{EKOIII}^{out} - i_{EKOIII}^{in})$$
$$Q_{EKOIII} = (24,444 - 1,9557 - 1,7863) \cdot (989,44 - 874,32) \qquad [3.32]$$
$$Q_{EKOIII} = \underline{2383,205 \quad kW}$$

3.4.9 Ohříváky vody II a I (EKO-II,I)

Výstupní hodnoty vody EKO-II,I

$$p_{EKO-II,I}^{out} = p_{EKOIII}^{in} = 11,39 \quad MPa$$
$$i_{EKO-II,I}^{out} = i_{EKOIII}^{in} = 874,32 \quad kJ/kg$$
$$t_{EKO-II,I}^{out} = t_{EKOIII}^{in} = 204 \ °C$$

Vstupní hodnoty vody EKO-II,I

$$p_{EKO-II,I}^{in} = p_{nv} = 11,55 \quad MPa$$
$$t_{EKO-II,I}^{in} = t_{nv} = 154 \ °C$$
$$i_{EKO-II,I}^{out} = f(p_{EKO-II,I}^{out}, t_{EKO-II,I}^{out}) = 656,28 \quad kJ/kg \quad [2]$$

Teplo předané v EKO-II,I

$$Q_{EKO-II,I} = (M_{pp} - M_{VSII} - M_{VSI}) \cdot (i_{EKO-II,I}^{out} - i_{EKO-II,I}^{in})$$
$$Q_{EKO-II,I} = (24,444 - 1,9557 - 1,7863) \cdot (874,32 - 656,28) \qquad [3.33]$$
$$Q_{EKO-II,I} = \underline{4513,847 \quad kW}$$

3.4.10 Ohřívák vzduchu IV (OVZIV)

$$t_{OVZIV}^{in} = 227 \ °C$$
$$t_{OVZIV}^{out} = 338,2 \ °C$$
$$i_{OVZIV}^{in} = 303,001 \quad kJ/kg$$
$$i_{OVZIV}^{out} = 455,6744 \quad kJ/kg$$

Kde i_{OVZIV}^{in} $[kJ/kg]$ - entalpie vzduchu pro teplotu $227 \ °C$, interpolací z *Tab. 2-3*

i_{OVZIV}^{out} $[kJ/kg]$ - entalpie vzduchu pro teplotu $338,5 \ °C$, interpolací z *Tab. 2-3*

Teplo předané v OVZIV

$$Q_{OVZIV} = M_{pv} \cdot \beta \cdot (i_{OVZIV}^{out} - i_{OVZIV}^{in})$$
$$Q_{OVZIV} = 6,97 \cdot 1,274 \cdot (455,6744 - 303,001) \qquad [3.34]$$
$$Q_{OVZIV} = \underline{1356,165 \quad kW}$$

3.4.11 Ohříváky vzduchu III,II,I (OVZ-III,II,I)

$$t_{OVZ-III,II,I}^{in} = 40 \ °C$$
$$t_{OVZ-III,II,I}^{out} = 227 \ °C$$
$$i_{OVZ-III,II,I}^{in} = 52,516 \quad kJ/kg$$
$$i_{OVZ-III,II,I}^{out} = 303,001 \quad kJ/kg$$

Kde $i_{OVZ-II,I}^{in} \left[kJ/kg\right]$ - entalpie vzduchu pro teplotu $40 \ °C$, interpolací z *Tab. 2-3*

$i_{OVZ-II,I}^{out} \left[kJ/kg\right]$ - entalpie vzduchu pro teplotu $227 \ °C$, interpolací z *Tab. 2-3*

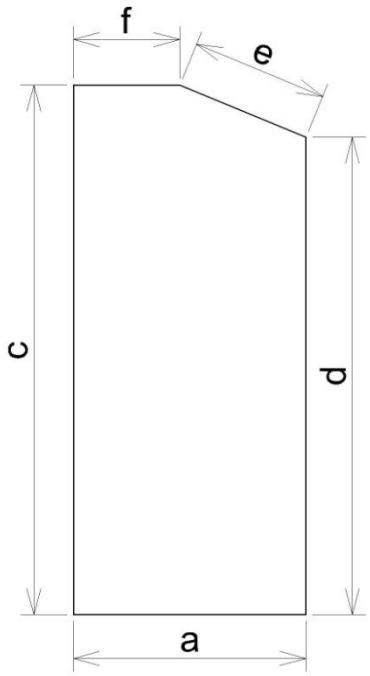
Teplo předané v OVZ-III,II,I

$$Q_{OVZ-III,II,I} = M_{pv} \cdot \beta \cdot (i_{OVZ-II,II,I}^{out} - i_{OVZ-III,II,I}^{in})$$
$$Q_{OVZ-III,II,I} = 6,97 \cdot 1,274 \cdot (303,001 - 52,516) \qquad [3.35]$$
$$Q_{OVZ-III,II,I} = \underline{2225,005 \quad kW}$$

Teplosměnná plocha	Médium				
		Teplota [° C]	Tlak [MPa]	Entalpie [kJ/kg]	Předané teplo [kW]
Přehřívák IV (PIV)	**výstup**	520	9,6	3430,8	8149,6296
	vstup	400	10	3097,4	
Přehřívák III (PIII)	**výstup**	475	10	3309,7	5696,2704
	vstup	390	10,4	3056,4	
Přehřívák II (PII)	**výstup**	460	10,4	3263,5	6757,1076
	vstup	360	10,8	2937,1	
Přehřívák I (PI)	**výstup**	360	10,8	2937,1	4858,7413
	vstup	319,44	11,2	2702,4	
Výparník (VYP)	**výstup**	319,44	11,2	2702,4	35461,5655
	vstup	229,44	11,2	989,44	
Ohřívák vody III (EKO-III)	**výstup**	229,44	11,2	989,44	2383,2053
	vstup	204	11,39	874,32	
Ohřívák vody II,I (EKO-II,I)	**výstup**	204	11,39	874,32	4513,8472
	vstup	154	11,55	656,28	
CELKEM					**67820,367**

Tab. 3-2 Shrnutí tepelných bilancí na straně páry a vody

4 Výpočet spalovací komory



Obr. 4-1
Spalovací komora

Parametry spalovací komory

$a = 6,715 \quad m$

$b = 5,375 \quad m$

$c = 15,275 \quad m$

$d = 13,767 \quad m$

$e = 4,237 \quad m$

$f = 3,068 \quad m$

Kde $b \; [m]$ - hloubka spalovací komory

Plocha ohniště

$$S_0 = a \cdot b = 6,715 \cdot 5,375 = \underline{36,0931 \quad m^2} \qquad [4.1]$$

Tepelné zatížení ohniště

$$q_s = \frac{M_{pv} \cdot Q_{i\,red}}{S_o} = \frac{6,97 \cdot 10927,97}{36,0931} = \underline{2111,0322 \quad kW/m^2} \qquad [4.2]$$

Aktivní objem ohniště

$$V_o = a \cdot b \cdot c - \left(\frac{(a-f) \cdot b \cdot (c-d)}{2} \right)$$

$$V_o = 6,715 \cdot 5,375 \cdot 15,2 - \left(\frac{(6,715-3,563) \cdot 5,375 \cdot (15,2-13,336)}{2} \right) \qquad [4.3]$$

$$V_o = \underline{536,5421 \quad m^3}$$

Povrch stěn ohniště [4.4]

$$S_{st} = (a \cdot b) + (c \cdot b) + 2 \cdot \left(a \cdot c - \frac{(c-d) \cdot (a-f)}{2} \right) + (d \cdot b) + (f \cdot b) + (e \cdot b)$$

$$S_{st} = b \cdot (a + c + d + e + f) + 2 \cdot \left(a \cdot c - \frac{(c-d) \cdot (a-f)}{2} \right)$$

$$S_{st} = 5,375 \cdot (6,715 + 15,2 + 13,336 + 3,662 + 3,563) + 2 \cdot \left(6,715 \cdot 15,2 - \frac{(15,2-13,336) \cdot (6,715-3,563)}{2} \right)$$

$$S_{st} = \underline{431,1018 \quad m^2}$$

Součinitel tepelné efektivnosti

$$\psi = x \cdot \zeta = 1 \cdot 0,45 = \underline{0,45} \qquad [4.5]$$

Kde x $[-]$ - úhlový součinitel, volím x = 1 [1]

ζ $[-]$ - součinitel zanesení stěn ohniště, volím $\zeta = 0,45$ [1]

Poměrná teplota spalin na výstupu z ohniště

$$\Theta_{ok} = \frac{T_{ok}}{T_{np}} = \frac{Bo^{0,6}}{M \cdot a_o^{0,6} + Bo^{0,6}}$$

$$\Theta_{ok} = \frac{1,113848^{0,6}}{0,4375 \cdot 0,746888^{0,6} + 1,113848^{0,6}} \qquad [4.6]$$

$$\Theta_{ok} = \underline{0,743926}$$

Součinitel M

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot x_{pl} = 0,59 - 0,5 \cdot 0,305 = \underline{0,4375} \qquad [4.7]$$

Kde x_{pl} $[-]$ - poloha maximální teploty plamene, po odborné konzultaci $x_{pl} = 0,305$

Boltzmannovo číslo

$$Bo = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp} \cdot c_s}}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot \psi \cdot S_{st} \cdot (273,15 + t_{np})^3}$$

$$Bo = \frac{0,990684 \cdot 6,97 \cdot 8,485418}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot 0,45 \cdot 431,1018 \cdot (273,15 + 1410,84)^3} \qquad [4.8]$$

$$Bo = \underline{1,113848}$$

Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{z_{sv}}{\eta_k + z_{sv}} = 1 - \frac{0,008}{0,85073 + 0,008} = \underline{0,990684} \qquad [4.9]$$

Střední celkové měrné teplo spalin

$$\overline{O_{sp} \cdot c_s} = \frac{I_{np} - I_{ok}}{t_{np} - t_{ok}} = \frac{10934,98 - 7274,847}{1410,844 - 979,5} = \underline{8,485418 \quad kJ / kg°C} \qquad [4.10]$$

Teplo uvolněné v ohništi

$$Q_u = Q_{i\,red} \cdot (1 - z_{CO} - z_c - z_f) + Q_v - Q_{cz}$$

$$Q_u = 10927,97 \cdot (1 - 0,000542 - 0,04427 - 0,000627) + 584,463 - 80,892 \qquad [4.11]$$

$$Q_u = \underline{10934,98 \quad kJ / kg}$$

Kde Q_v $[kJ / kg]$ - teplo přivedené ve vzduchu

Teplo přivedené ve vzduchu

$$Q_v = \beta_{OVZ} \cdot I_V^{t_{OVZ}} + (\alpha_O - \beta) \cdot I_V^{t_f}$$
$$Q_v = 1,274 \cdot 457,484 + (1,324 - 1,274) \cdot 32,57 \qquad [4.12]$$
$$Q_v = \underline{584,463 \quad kJ/kg}$$

Kde $I_V^{t_{OVZ}}$ $[kJ/kg]$ - entalpie řízeného vzduchu do kotle pro teplotu $338,2\ °C$ za OVZ

$I_V^{t_f}$ $[kJ/kg]$ - entalpie přisávaného vzduchu při teplotě $25\ °C$

Entalpie nechlazeného plamene

Kotel nemá recirkulaci spalin, tudíž platí $I_{np} = Q_u = 10934,98 \quad kJ/kg$

Teplota nechlazeného plamene odpovídající Q_u

$t_{np} = 1410,84 \quad °C$ (interpolací z *Tab.2-4* pro $I_{np} = 10936,945\ kJ/kg$ a $\alpha = 1,324$)

Předpokládaná teplota na výstupu z ohniště a její odpovídající entalpie

$t_{ok} = 979,5\ °C$

$I_{ok} = 7274,847 \quad kJ/kg$ (interpolací z *Tab.2-4* pro $t_{ok} = 979,5\ °C$ a $\alpha = 1,324$)

Stupeň černosti ohniště

$$a_o = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{R}{S_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \psi) \cdot (1 - \frac{R}{S_{st}})}$$

$$a_o = \frac{0,531171 + (1 - 0,531171) \cdot \frac{36,0931}{431,1018}}{1 - (1 - 0,531171) \cdot (1 - 0,45) \cdot (1 - \frac{36,0931}{431,1018})} \qquad [4.13]$$

$$a_o = \underline{0,746888}$$

Plocha hořící vrstvy paliva na roštu

$$R = a \cdot b = 6,715 \cdot 5,375 = \underline{36,0931 \quad m^2} \qquad [4.14]$$

Stupeň černosti plamene

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,757518} = \underline{0,531171} \qquad [4.15]$$

Optická hustota plamene

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk} + k_{kok} \cdot \chi_1 \cdot \chi_2) \cdot p \cdot s$$
$$k \cdot p \cdot s = (1,355479 + 0,185221 + 10 \cdot 0,5 \cdot 0,03) \cdot 0,1 \cdot 4,4805 \qquad [4.16]$$
$$k \cdot p \cdot s = \underline{0,757518}$$

Kde k_{kok} $[-]$ - součinitel, $k_{kok} = 10$ [1]

χ_1 $[-]$ - parametr druhu paliva, $\chi_1 = 0,5$ [1]

χ_2 $[-]$ - parametr způsobu spalování, $\chi_2 = 0,03$ [1]

p $[MPa]$ - tlak v ohništi, bere se $0,1\ MPa$ u kotlů bez přetlaku [1]

Koncentrace popela ve spalinách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_ú + 1)}{2 \cdot G_s} = \frac{0,02 \cdot (0,7 + 1)}{2 \cdot 6,110274} = \underline{0,002782 \quad kg/kg} \qquad [4.17]$$

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{ok} \cdot O_{VV\,\min}$$
$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,324 \cdot 2,96694 \qquad [4.18]$$
$$G_s = \underline{6,110274 \quad kg/kg}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{ok} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$
$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002782}{\sqrt[3]{(979,5 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \qquad [4.19]$$
$$k_p \cdot \mu_{pk} = \underline{0,185221 \quad 1/mMPa}$$

Kde d_{pk} $[\mu m]$ - střední efektivní průměr částic popílku, volím $20\ \mu m$ [1]

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{ok} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s$$
$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,183838}{\sqrt{0,030723 \cdot 4,4805}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{979,5 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,30723 \qquad [4.20]$$
$$k_s \cdot r_s = \underline{1,355479 \quad 1/mMPa}$$

Objemové podíly tříatomových plynů ve spalinách

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0{,}183838 + 0{,}123392 = \underline{0{,}30723} \qquad [4.21]$$

$$r_{H_2O} = \frac{O^S_{H_2O} + (\chi_v - 1)\cdot(\alpha_{ok} - 1)\cdot O_{VV\,\min}}{O_{sv\,\min} + (\alpha_{ok} - 1)\cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{0{,}877336 + (1{,}000000025 - 1)\cdot(1{,}324 - 1)\cdot 2{,}966944}{3{,}811038 + (1{,}324 - 1)\cdot 2{,}96694} \qquad [4.22]$$

$$r_{H_2O} = \underline{0{,}183838}$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SV\,\min} + (\alpha_{ok} - 1)\cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{RO_2} = \frac{0{,}588806 + 0{,}00006145}{3{,}811038 + (1{,}324 - 1)\cdot 2{,}966944} \qquad [4.23]$$

$$r_{RO_2} = \underline{0{,}123392}$$

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3{,}6\cdot\frac{V_o}{S_{st}} = 3{,}6\cdot\frac{536{,}54211}{426{,}5692} = \underline{4{,}4805 \quad m} \qquad [4.24]$$

Parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$p_s = r_s \cdot p = 0{,}30723\cdot 0{,}1 = \underline{0{,}030723 \quad MPa} \qquad [4.25]$$

Skutečná teplota spalin na výstupu z ohniště

$$t_{ok_{skut}} = \frac{t_{np} + 273{,}15}{1 + M\cdot\left(\frac{a_0}{Bo}\right)^{0{,}6}} - 273{,}15$$

$$t_{ok_{skut}} = \frac{1410{,}844 + 273{,}15}{1 + 0{,}4375\cdot\left(\frac{0{,}746888}{1{,}113848}\right)^{0{,}6}} - 273{,}15 \qquad [4.26]$$

$$t_{ok_{skut}} = \underline{979{,}6 \ \ °C}$$

Entalpie pro skutečnou teplotu spalin na výstupu z ohniště

$I_{ok_{skut}} = \underline{7274{,}847 \quad kJ/kg}$ (interpolací z *Tab.2-4* pro $t_{ok} = 977{,}2 \ \ °C$ a $\alpha = 1{,}324$)

Teplo odevzdané v ohništi

$$Q_s = \varphi\cdot(I_{np} - I_{ok_{skut}}) = 0{,}990684\cdot(10934{,}98 - 7274{,}847) = \underline{3626{,}036 \quad kJ/kg} \qquad [4.27]$$

Střední zatížení stěn ohniště

$$\bar{q} = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot (I_{np} - I_{ok_{skut}})}{S_{ús}} = \frac{0,990684 \cdot 6,97 \cdot (10934,98 - 7274,847)}{395,0087} = \underline{64,0037 \quad kW/m^2} \quad [4.28]$$

Kde $S_{ús}$ $\left[m^2\right]$ - účinná sálavá plocha stěn ohniště

Účinná sálavá plocha stěn ohniště

$$S_{ús} = S_{st} - a \cdot b = 426,5692 - 6,715 \cdot 5,375 = \underline{395,0087 \quad m^2} \quad [4.29]$$

Plocha výstupního otvoru

$$S_{vo} = b \cdot f = 5,375 \cdot 3,068 = \underline{16,4905 \quad m^2} \quad [4.30]$$

Teplo předané výparníku v ohništi

$$Q_{VYP}^{SK} = \bar{q} \cdot (S_{ús} - S_{vo}) = 64,0037 \cdot (395,0087 - 16,4905) = \underline{32313,354 \quad kW} \quad [4.31]$$

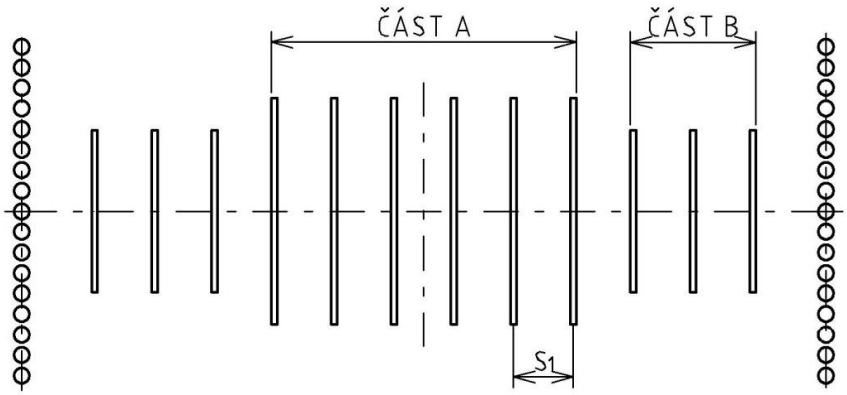
Vysálané teplo výstupním otvorem

$$Q_{ods} = \bar{q} \cdot S_{vo} = 64,0037 \cdot 16,4905 = \underline{1055,453 \quad kW} \quad [4.32]$$

5 Výpočet konvekčních ploch

5.1 Deskový přehřívák páry (část A)

Deskový (šotový) přehřívák III byl rozdělen na dvě části A a B (zapojené sériově) z důvodu nízké rychlosti protékající páry. Pára nejdříve prochází částí A tvořenou 6 deskami po 14 trubkách, která je umístěna uprostřed kanálu a potom vstupuje do části B tvořené 6 deskami po 10 trubkách. Část B je rozdělena na 2 poloviny po stranách části A.



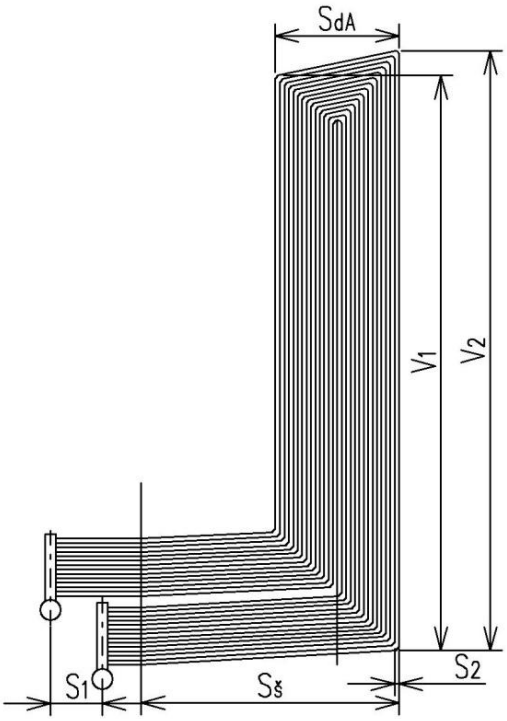
Obr. 5-1 Rozložení částí A a B šotového přehříváku III

5.1.1 Parametry

Vnější průměr trubky	D	= 33,7	mm = 0,0337	m
Vnitřní průměr trubky	d	= 21,7	mm = 0,0217	m
Tloušťka stěny	tl	= 6	mm = 0,006	m
Rozteč (příčná)	s_1	= 350	mm = 0,35	m
Rozteč (podélná)	s_2	= 47	mm = 0,047	m
Počet trubek	n_{tr}	= 14		
Počet desek	n_d	= 6		

Rozměr šotů

Šířka	$s_š$	= 2751	mm = 2,751	m
Šířka desky	s_{dA}	= 1322	mm = 1,322	m
Výška 1	v_1	= 6283	mm = 6,283	m
Výška 2	v_2	= 6550	mm = 6,55	m
Střední výška	v_s	= 6417	mm = 6,417	m



Obr. 5-2 Deskový přehřívák – část A

5.1.2 Proudění ze strany spalin (příčné)

Střední teplota spalin

$$\bar{t}_s = \frac{t^s_{PIIIA-in} + t^s_{PIIIA-out}}{2} = \frac{979,6+869}{2} = \underline{924,308\ °C} \qquad [5.1]$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{\frac{V_s}{2}}{F_s} \cdot \frac{273,15+\bar{t}_s}{273,15}$$

$$w_s = \frac{\frac{33,377818}{2}}{10,3024} \cdot \frac{273,15+924,308}{273,15} \qquad [5.2]$$

$$w_s = \underline{7,1\quad m/s}$$

Střední hodnota přebytku vzduchu

$$\alpha_1 = 1,324$$

$$\alpha_2 = 1,334 \qquad [5.3]$$

$$\alpha_{1,2\,stř} = \frac{\alpha_1+\alpha_2}{2} = \frac{1,324+1,334}{2} = \underline{1,329}$$

Objemový průtok spalin pro střední hodnotu přebytku vzduchu

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sv\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}]$$

$$V_s = 6,97 \cdot [3,81104 + (1,329 - 1) \cdot 2,96694] \qquad [5.4]$$

$$V_s = \underline{33,377818 \quad Nm^3/s}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_s = \frac{2 \cdot F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2} = \frac{2 \cdot 7,689 \cdot 15,6068}{7,689 + 15,6068} = \underline{10,3024 \quad m^2} \qquad [5.5]$$

Kde $F_1 \left[m^2\right]$ - světlý průřez na vstupu PIIIA

$F_2 \left[m^2\right]$ -světlý průřez na výstupu PIIIA

$$F_1 = f \cdot \frac{b}{2} - n_d \cdot D \cdot s_{\check{s}}$$

$$F_1 = 3,068 \cdot 2,6875 - 6 \cdot 0,0337 \cdot 2,751 \qquad [5.6]$$

$$F_1 = \underline{7,689 \quad m^2}$$

$$F_2 = h \cdot \frac{b}{2} - n_d \cdot D \cdot v_2$$

$$F_2 = 6,3 \cdot 2,6875 - 6 \cdot 0,0337 \cdot 6,55 \qquad [5.7]$$

$$F_2 = \underline{15,6068 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro desky

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu}\right)^{0,65} \cdot \mathrm{Pr}^{0,33}$$

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,4488 \cdot \frac{0,100673918}{0,0337} \cdot \left(\frac{7,1 \cdot 0,0337}{0,000154531}\right)^{0,65} \cdot 0,58^{0,33} \qquad [5.8]$$

$$\alpha_{k_1} = \underline{26,53 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

Pro $n_{tr} \geq 10$ je $C_z = 1$ [1]

Korekční součinitel na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči trubek

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

$$C_s = \frac{1}{\left[1+\left(2\cdot 10,386-3\right)\cdot\left(1-\frac{1,395}{2}\right)^3\right]^2} \qquad [5.9]$$

$$C_s = \underline{0,448766}$$

Kde σ_1 [−] - poměrná příčná rozteč trubek PIIIA
σ_2 [−] - poměrná podélná rozteč trubek PIIIA

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,35}{0,0337} = \underline{10,386} \qquad [5.10]$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,047}{0,0337} = \underline{1,395} \qquad [5.11]$$

Hodnoty pro střední teplotu spalin získané interpolací

Kinematická viskozita	$\nu = 0,000154531 \quad m^2/s$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,100673918 \quad W/mK$
Prandtlovo číslo	$\mathrm{Pr} = 0,58$

5.1.3 Proudění ze strany páry (podélné)

Střední hodnota teploty páry

$$\overline{t_p} = \frac{t^m_{PIIIA-in} + t^m_{PIIIA-out}}{2} = \frac{385+436}{2} = \underline{410,5\ °C} \qquad [5.12]$$

Kde t^{in}_{PIIIA} $[°C]$ - teplota páry na vstupu do přehříváku PIIIA
t^{out}_{PIIIA} $[°C]$ - teplota páry na výstupu z přehříváku PIIIA

Střední hodnota tlaku páry

$$\overline{p_p} = \frac{p^m_{PIIIA-in} + p^m_{PIIIA-out}}{2} = \frac{10,4+10,1697}{2} = \underline{10,2849 \quad MPa} \qquad [5.13]$$

Kde p^{in}_{PIIIA} $[°C]$ - tlak páry na vstupu do přehříváku PIIIA
p^{out}_{PIIIA} $[°C]$ - tlak páry na výstupu z přehříváku PIIIA

Množství páry

$$M^{PIIIA}_{pp} = M_{pp} - M_{VSII}$$
$$M^{PIIIA}_{pp} = 24,444 - 1,9558 = \underline{22,4882 \quad kg/s} \qquad [5.14]$$

Hodnoty pro střední teplotu páry získané interpolací

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,070000379 \quad W/mK$
Součinitel dynamické viskozity $\eta = 0,0000249475 \quad Pa \cdot s$
Měrná tepelná kapacita $c_p = 3,025468513 \quad kJ/kg \cdot K$

Prandtlovo číslo

$$\Pr = \frac{\eta \cdot c_p \cdot 10^3}{\lambda}$$
$$\Pr = \frac{0,0000249475 \cdot 3,025468513 \cdot 10^3}{0,070000379} \qquad [5.15]$$
$$\Pr = \underline{1,07824966}$$

Součinitel kinematické viskozity

$$\nu = \eta \cdot v''$$
$$\nu = 0,0000249475 \cdot 0,0252 \qquad [5.16]$$
$$\nu = \underline{6,28677 \cdot 10^{-7} \quad m^2/s}$$

Kde v'' - měrný objem páry $v'' = f(\overline{t_p}, \overline{p_p}) = 0,0252 \quad m^3/kg$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{M^{PIIIA}_{pp} \cdot v''}{F_p}$$
$$w_p = \frac{22,4882 \cdot 0,0252}{0,0311} \qquad [5.17]$$
$$w_p = \underline{18,24 \quad m/s}$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_d$$

$$F_p = \frac{\pi \cdot 0,0217^2}{4} \cdot 14 \cdot 6 \qquad [5.18]$$

$$F_p = \underline{0,0311 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_{k_2} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_m \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_m$$

$$\alpha_{k_2} = 0,023 \cdot \frac{0,070000379}{0,0217} \cdot \left(\frac{18,24 \cdot 0,0217}{6,28677 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,07824966^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \qquad [5.19]$$

$$\alpha_{k_2} = \underline{3332,24 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde C_t $[-]$ - opravný koeficient, při ochlazování spalin $C_t = 1$ [1]

C_m $[-]$ - opravný koeficient, při dvoustranném ohřevu $C_m = 1$ [1]

Ekvivalentní průměr d_e

Ekvivalentní průměr je při proudění uvnitř trubek roven vnitřnímu průměru trubky $d_e = d = 0,0217 \quad m$ [1]

Součinitel přestupu tepla sáláním

Uvažujeme sálání tříatomových plynů a i sálání tuhých částic v úletu (popílku) [1]

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_s}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,215075 \cdot (924,477 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{489,92 + 273,15}{924,477 + 273,5} \right)^4}{1 - \frac{489,92 + 273,15}{924,477 + 273,15}} \qquad [5.20]$$

$$\alpha_{sal} = \underline{43,68 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde a_{st} $[-]$ - stupeň černosti povrchu stěn, uvažuje se $a_{st} = 0,8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$
$$a = 1 - e^{-0,242567} \qquad [5.21]$$
$$a = \underline{0,215389}$$

Příslušná optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = \left(k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}\right) \cdot p \cdot s$$
$$k \cdot p \cdot s = \left(4,35988 + 0,190266\right) \cdot 0,1 \cdot 0,5331 \qquad [5.22]$$
$$k \cdot p \cdot s = \underline{0,242567}$$

Kde $p \quad [MPa]$ - je tlak spalin, bere se $p = 0,1 \quad MPa$ [1]

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{C}}$$
$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{6,417} + \frac{1}{0,35} + \frac{1}{2,751}} \qquad [5.23]$$
$$s = \underline{0,5331 \quad m}$$

Kde $A, B, C \quad [m]$ - je výška, šířka a hloubka volného prostoru mezi deskami
$A = v, \; B = s_1$ a $C = s_{š}$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{\overline{t_s} + 273,15}{1000}\right) \cdot r_s$$
$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,183268}{3,16 \cdot \sqrt{0,030628 \cdot 0,5331}} - 1,02\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{924,31 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,306278 \qquad [5.24]$$
$$k_s \cdot r_s = \underline{4,35988 \quad 1/mMPa}$$

Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O^s_{H_2O} + \left(\chi - 1\right) \cdot \left(\alpha_{1,2\,str} - 1\right) \cdot O_{VS\min}}{O_{SV\min} + \left(\alpha_{1,2\,str} - 1\right) \cdot O_{VV\min}}$$
$$r_{H_2O} = \frac{0,87734 + \left(1,000000025 - 1\right) \cdot \left(1,329 - 1\right) \cdot 2,966944105}{3,811038 + \left(1,329 - 1\right) \cdot 2,966944} \qquad [5.25]$$
$$r_{H_2O} = \underline{0,183268}$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2}$$
$$r_s = 0,183268 + 0,123009 \qquad [5.26]$$
$$r_s = \underline{0,306278}$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SV\,\min} + \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VV\,\min}}$$
$$r_{RO_2} = \frac{0,588806 + 0,00006145}{3,811038 + (1,329 - 1) \cdot 2,966944} \qquad [5.27]$$
$$r_{RO_2} = \underline{0,123009}$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$p_s = r_s \cdot p$$
$$p_s = 0,306278 \cdot 0,1 \qquad [5.28]$$
$$p_s = \underline{0,030628 \quad MPa}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{\left(\overline{t_s} + 273,15\right)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$
$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002773}{\sqrt[3]{(924,31 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \qquad [5.29]$$
$$k_p \cdot \mu_{pk} = \underline{0,190266 \quad 1/mMPa}$$

Kde d_{pk} $[\mu m]$ - je střední průměr popílkových částic, volím 20 μm [1]

Koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{ú} + 1)}{2 \cdot G_s} = \frac{0,02 \cdot (0,7 + 1)}{2 \cdot 6,129648} = \underline{0,002773 \quad kg/kg} \qquad [5.30]$$

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{1,2\,stř} \cdot O_{VV\,\min}$$
$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,329 \cdot 2,96694 \qquad [5.31]$$
$$G_s = \underline{6,129648 \quad kg/kg}$$

Střední povrchová teplota nánosu na zevnějšku trubek

$$t_z = \overline{t_p} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_{k_2}}\right) \cdot \frac{Q_{pIIIA} + Q_{s,A}}{S_{TPA}} \cdot 10^3$$

$$t_z = 410,5 + \left(0,002 + \frac{1}{3332,24}\right) \cdot \frac{3424,959 + 273,73}{107,0365} \cdot 10^3 \qquad [5.32]$$

$$t_z = \underline{489,98 \ °C}$$

Výkon přehříváku PIII-A

$$Q_{PIIIA} = (M_{pp} - M_{VSII}) \cdot (i_{PIIIA}^{out} - i_{PIIIA}^{in})$$

$$Q_{PIIIA} = (24,44 - 1,9558) \cdot (3208,7 - 3056,4) \qquad [5.33]$$

$$Q_{PIIIA} = \underline{3424,959 \quad kW}$$

Kde i_{PIIIA}^{out} $[kJ/kg]$ - entalpie páry na výstupu z PIIIA, $f\left(t_{PIIIA}^{out}, p_{PIIIA}^{out}\right)$ [2]

i_{PIIIA}^{in} $[kJ/kg]$ - entalpie páry na výstupu do PIIIA, $f\left(t_{PIIIA}^{in}, p_{PIIIA}^{in}\right)$ [2]

Součinitel zanesení

Po odborné konzultaci bereme součinitel zanesení $\varepsilon = 0,002$

Výhřevná plocha desek (část A)

$$S_{TPA} = n_d \cdot S_{1dA} \cdot x$$

$$S_{TPA} = 6 \cdot 20,7435 \cdot 0,86 \qquad [5.34]$$

$$S_{TPA} = \underline{107,0365 \quad m^2}$$

Kde x $[-]$ - úhlový součinitel osálání stěn, odečteno $x = 0,86$, z obr.6-2a v [1]

Plocha jedné desky

Poněvadž se jedná o případ oboustranného omývání, bere se výhřevná plocha jedné desky jako dvojnásobek.

$$S_{1dA} = 2 \cdot (s_{dA} \cdot v_s + (s_š - s_{dA}) \cdot s_{dA})$$

$$S_{1dA} = 2 \cdot (1,322 \cdot 6,417 + (2,751 - 1,322) \cdot 1,322) \qquad [5.35]$$

$$S_{1dA} = \underline{20,7435 \quad m^2}$$

Hustota tepelného toku procházejícího výstupním průřezem přehříváku do dalších ploch

$$q_{sv} = y_h \cdot \bar{q} \cdot \frac{S_{vo}}{S_{sv}} \cdot (1-a) \cdot \varphi_{o-sv} + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot \psi_{sv} \cdot a \cdot \left(\frac{\bar{t}_s}{100} \right)^4$$

$$q_{sv} = 0,65 \cdot 64,0037 \cdot \frac{16,4905}{33,8625} \cdot (1-0,215389) \cdot 0,0634 + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 0,215389 \cdot \left(\frac{924,31}{100} \right)^4 \qquad [5.36]$$

$$q_{sv} = \underline{5,4877 \quad kW/m^2}$$

Kde y_h $[-]$ - součinitel tepelné nerovnoměrnosti po výšce ohniště,
voleno $y_h = 0,65$ [1]

ψ_{sv} $[-]$ - součinitel tepelné efektivnosti následujícího svazku,
bereme $\psi_{sv} = 0,5$ [1]

Výstupní průřez šotového prostoru

$$S_{sv} = b \cdot h = 5,375 \cdot 6,3 = \underline{33,8625 \quad m^2} \qquad [5.37]$$

Úhlový součinitel ohniště

$$\varphi_{o-sv} = \sqrt{\left(\frac{C}{B}\right)^2 + 1} - \frac{C}{B}$$

$$\varphi_{o-sv} = \sqrt{\left(\frac{2,751}{0,35}\right)^2 + 1} - \frac{2,751}{0,35} \qquad [5.38]$$

$$\varphi_{o-sv} = \underline{0,0634}$$

Kde C $[m]$ - hloubka deskového přehříváku PIIIA ve směru proudění spalin, $C = s_š$

B $[m]$ - vzdálenost mezi deskami PIIIA, $B = s_1$

Sálavé teplo z ohniště a z prostoru desek zachycené v prostoru desek

$$Q_{s,dp} = \delta \cdot y_h \cdot \bar{q} \cdot S_{vo} - q_{sv} \cdot S_{sv}$$

$$Q_{s,dp} = 1 \cdot 0,65 \cdot 64,0037 \cdot 16,4905 - 5,4877 \cdot 33,8625 \qquad [5.39]$$

$$Q_{s,dp} = \underline{500,216 \quad kW}$$

Kde δ $[-]$ - součinitel, $\delta = 1$ [1]

Odebraná část přehřívákem (částí A)

$$Q_{s,A} = \frac{S_{TPA}}{S_{TPA} + S_{parIII}} \cdot Q_{s,dp}$$

$$Q_{s,A} = \frac{107,0365}{107,0365 + 88,563} \cdot 500,216 \qquad [5.40]$$

$$Q_{s,A} = \underline{273,73 \quad kW}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \alpha_s \cdot \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_{k_2}} \right) \cdot (1+m)}$$

$$k = \frac{74,5}{1 + 74,5 \cdot \left(0,002 + \frac{1}{3332,24} \right) \cdot (1 + 0,1461)} \qquad [5.41]$$

$$k = \underline{62,27 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \xi \cdot \left(\alpha_{k_1} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot s_2 \cdot x} + \alpha_{sal} \right)$$

$$\alpha_s = 0,95 \cdot \left(26,53 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0337}{2 \cdot 0,047 \cdot 0,86} + 43,68 \right) \qquad [5.42]$$

$$\alpha_s = \underline{74,5 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde ξ $[-]$ - součinitel využití plochy PIIIA, bráno $\xi = 0,95$ [1]

x $[-]$ - úhlový součinitel osálání desek PIIIA, $x = 0,86$ [1]

Zachycený podíl tepla vysálaného z ohniště

$$m = \frac{Q_{s,dp}}{Q_{PIIIA}}$$

$$m = \frac{50,216}{3424,959} \qquad [5.43]$$

$$m = \underline{0,1461}$$

Teplo předané deskovému přehříváku PIIIA

$$Q_{PIIIA}^{skut} = k \cdot \Delta t \cdot S_{TPA}$$

$$Q_{PIIIA}^{skut} = 62,27 \cdot 513,81 \cdot 107,0365 \qquad [5.44]$$

$$Q_{PIIIA}^{skut} = \underline{3424,813 \quad kW}$$

Logaritmický teplotní spád (protiproud)

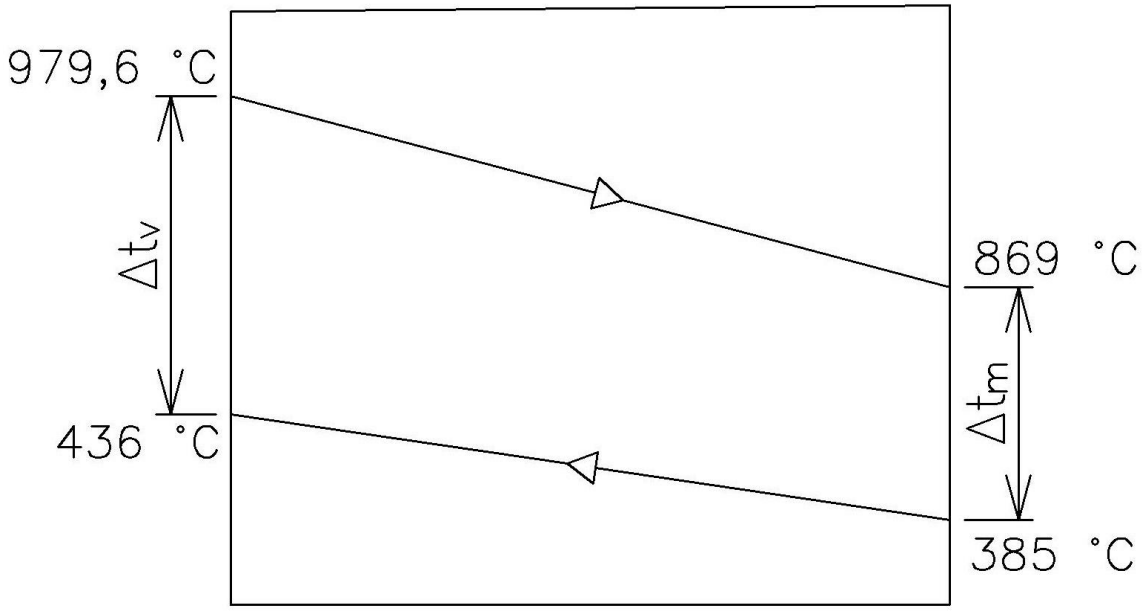
$$\Delta t_v = t^s_{PIIIA-in} - t^m_{PIIIA-out} = 979,6 - 436 = 543,62 \ °C \qquad [5.45]$$

$$\Delta t_m = t^s_{PIIIA-out} - t^m_{PIIIA-in} = 869 - 385 = 484 \ °C \qquad [5.46]$$

$$\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} = 1,12 \qquad [5.47]$$

$1,12 \leq 1,7 \quad \Rightarrow$ teplotní spád lze počítat jako střední aritmetický

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v + \Delta t_m}{2} = \frac{543,62 + 484}{2} = \underline{513,81 \ °C} \qquad [5.48]$$



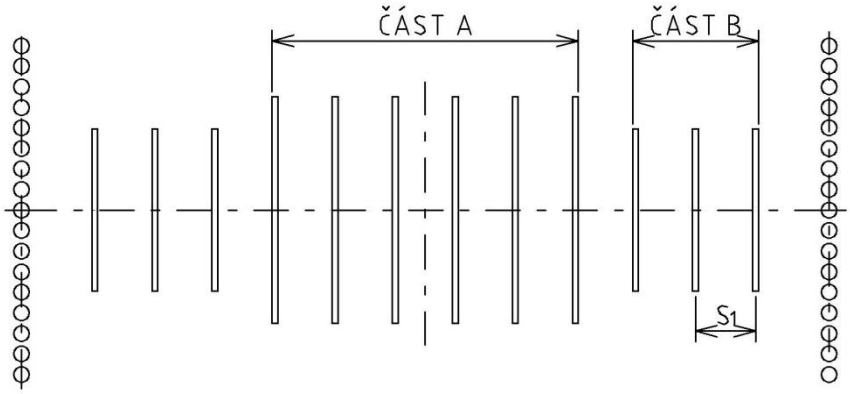
Obr. 5-3 Teplotní spád přehříváku III – části A

Odchylka skutečného předaného tepla od navrhovaného pro přehřívák PIII-A

$$p_{PIIIA} = \frac{Q_{PIIIA} - Q^{skut}_{PIIIA}}{Q_{PIIIA}} = \frac{3424,959 - 3424,813}{3424,959} \cdot 100 = \underline{0,0042 \ \%} \qquad [5.49]$$

5.2 Deskový přehřívák (část B)

Deskový (šotový) přehřívák III byl rozdělen na dvě části A a B (zapojené sériově) z důvodu nízké rychlosti protékající páry. Pára nejdříve prochází částí A tvořenou 6 deskami po 14 trubkách, která je umístěna uprostřed kanálu a potom vstupuje do části B tvořené 6 deskami po 10 trubkách. Část B je rozdělena na 2 poloviny po stranách části A.



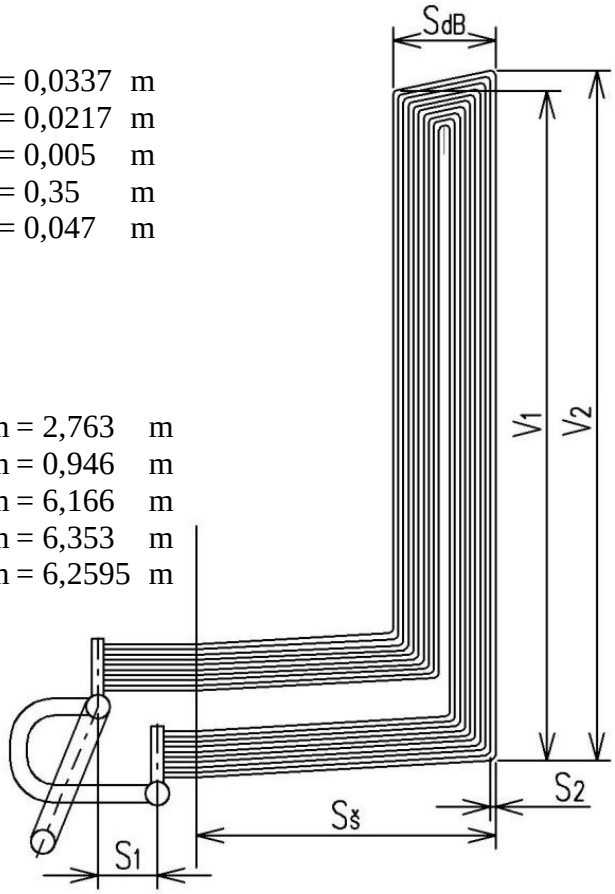
Obr. 5-4 Rozložení částí A a B šotového přehříváku III

5.2.1 Parametry

Průměr trubky	D	= 33,7	mm = 0,0337	m
Vnitřní průměr trubky	d	= 21,7	mm = 0,0217	m
Tloušťka stěny	tl	= 6	mm = 0,005	m
Rozteč (příčná)	s_1	= 350	mm = 0,35	m
Rozteč (podélná)	s_2	= 47	mm = 0,047	m
Počet trubek	n_{tr}	= 10		
Počet desek	n_d	= 6		

Rozměr šotů

Šířka	$s_š$	= 2763	mm = 2,763	m
Šířka desky	s_{dB}	= 946	mm = 0,946	m
Výška 1	v_1	= 6166	mm = 6,166	m
Výška 2	v_2	= 6353	mm = 6,353	m
Střední výška	v_s	= 6259,5	mm = 6,2595	m



Obr. 5-5 Deskový přehřívák – část B

5.2.2 Proudění ze strany spalin (příčné)

Střední teplota spalin

$$\bar{t}_s = \frac{t^s_{PIII-in} + t^s_{PIII-out}}{2} = \frac{979,6+850}{2} = \underline{914,81\ °C} \qquad [5.50]$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{\frac{V_s}{2}}{F_s} \cdot \frac{273,15+\bar{t}_s}{273,15}$$

$$w_s = \frac{\frac{33,3778}{2}}{10,3088} \cdot \frac{273,15+914,81}{273,15} \qquad [5.51]$$

$$w_s = \underline{7,04\quad m/s}$$

Kde $\frac{V_s}{2}\ \left[Nm^3/kg\right]$ - poloviční objemový průtok spalin prostřední hodnotu přebytku vzduchu

$F_s\ \left[m^2\right]$ - světlý průřez pro spaliny

$\bar{t}_s\ \left[°C\right]$ - střední teplota spalin

Střední hodnota přebytku vzduchu

$$\alpha_1 = 1,324$$

$$\alpha_2 = 1,334 \qquad [5.52]$$

$$\alpha_{1,2\,str} = \frac{\alpha_1+\alpha_2}{2} = \frac{1,324+1,334}{2} = \underline{1,329}$$

Objemový průtok spalin pro střední hodnotu přebytku vzduchu

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sv\,\min} + (\alpha_{1,2\,str} - 1) \cdot O_{VV\,\min}]$$

$$V_s = 6,97 \cdot [3,81104 + (1,329-1) \cdot 2,96694] \qquad [5.53]$$

$$V_s = \underline{33,377818\quad Nm^3/kg}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_s = \frac{2 \cdot F_1 \cdot F_2}{F_1+F_2} = \frac{2 \cdot 7,6866 \cdot 15,6467}{7,6866+15,6467} = \underline{10,3088\quad m^2} \qquad [5.54]$$

$$F_1 = f \cdot \frac{b}{2} - n_d \cdot D \cdot s_s$$
$$F_1 = 3,068 \cdot 2,6875 - 6 \cdot 0,0337 \cdot 2,763 \qquad [5.55]$$
$$F_1 = \underline{7,6866 \quad m^2}$$

$$F_2 = h \cdot \frac{b}{2} - n_d \cdot D \cdot v_2$$
$$F_2 = 6,3 \cdot 2,6875 - 6 \cdot 0,0337 \cdot 6,353 \qquad [5.56]$$
$$F_2 = \underline{15,6467 \quad m^2}$$

Kde $h \quad [m]$ - výška výstupního kanálu PIIIB

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro desky

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu}\right)^{0,65} \cdot \mathrm{Pr}^{0,33}$$
$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,448766 \cdot \frac{0,099628918}{0,0337} \cdot \left(\frac{7,02 \cdot 0,0337}{0,000152966}\right)^{0,65} \cdot 0,58^{0,33} \qquad [5.57]$$
$$\alpha_{k_1} = \underline{26,28 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

Pro $n_{tr} \geq 10$ je $C_z = 1$ [1]

Korekční součinitel na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči trubek

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3\right]^2}$$
$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 10,386 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,395}{2}\right)^3\right]^2} \qquad [5.58]$$
$$C_s = \underline{0,448766}$$

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,35}{0,0337} = \underline{10,386} \qquad [5.59]$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,047}{0,0337} = \underline{1,395} \qquad [5.60]$$

Hodnoty pro střední teplotu spalin získané interpolací

Kinematická viskozita	$\nu = 0,000152966 \quad m^2/s$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,099628918 \quad W/mK$
Prandtlovo číslo	$\mathrm{Pr} = 0,58$

5.2.3 Proudění ze strany páry (podélné)

Střední hodnota teploty páry

$$\overline{t_p} = \frac{t^m_{PIIIB-in} + t^m_{PIIIB-out}}{2} = \frac{436+475}{2} = \underline{455,5 \ °C} \qquad [5.61]$$

Střední hodnota tlaku páry

$$\overline{p_p} = \frac{p^m_{PIIIB-in} + p^m_{PIIIB-out}}{2} = \frac{10,1697+10}{2} = \underline{10,08485 \ MPa} \qquad [5.62]$$

Množství páry

$$M^{PIIIB}_{pp} = M_{pp} - M_{VSII}$$
$$M^{PIIIB}_{pp} = 24,444 - 1,9558 = \underline{22,488237 \ kg/s} \qquad [5.63]$$

Hodnoty pro střední teplotu páry získané interpolací

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,073037209 \quad W/mK$
Součinitel dynamické viskozity	$\eta = 0,0000269234 \quad Pa \cdot s$
Měrná tepelná kapacita	$c_p = 2,711024388 \quad kJ/kg \cdot K$

Prandtlovo číslo

$$\mathrm{Pr} = \frac{\eta \cdot c_p \cdot 10^3}{\lambda}$$
$$\mathrm{Pr} = \frac{0,0000269234 \cdot 2,711024388 \cdot 10^3}{0,073037209} \qquad [5.64]$$
$$\mathrm{Pr} = \underline{0,999353331}$$

Součinitel kinematické viskozity

$$\nu = \eta \cdot v''$$
$$\nu = 0,0000269234 \cdot 0,0295 \qquad [5.65]$$
$$\nu = \underline{7,9424 \cdot 10^{-7} \quad m^2/s}$$

Kde v'' - měrný objem páry $v'' = f(\overline{t_p}, \overline{p_p}) = 0,0295 \quad m^3/kg$ [2]

Rychlost páry

$$w_p = \frac{M_{pp}^{PIIIB} \cdot v''}{F_p}$$

$$w_p = \frac{22,4882 \cdot 0,0295}{0,0222} \qquad [5.66]$$

$$w_p = \underline{29,9 \quad m/s}$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_d$$

$$F_p = \frac{\pi \cdot 0,0217^2}{4} \cdot 10 \cdot 6 \qquad [5.67]$$

$$F_p = \underline{0,0222 \quad m^3}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_{k_2} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \mathrm{Pr}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_m$$

$$\alpha_{k_2} = 0,023 \cdot \frac{0,073037209}{0,0217} \cdot \left(\frac{29,9 \cdot 0,0217}{7,9424 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,999353331^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \qquad [5.68]$$

$$\alpha_{k_2} = \underline{4153,36 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde C_t $[-]$ - opravný koeficient, při ochlazování spalin $C_t = 1$ [1]

C_m $[-]$ - opravný koeficient, při dvoustranném ohřevu $C_m = 1$ [1]

Ekvivalentní průměr d_e

Ekvivalentní průměr je při proudění uvnitř trubek roven vnitřnímu průměru trubky $d_e = d = 0,0217 \quad m$ [1]

Součinitel přestupu tepla sáláním

Uvažujeme sálání tříatomových plynů a i sálání tuhých částic v úletu (popílku) [1]

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st}+1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)^4}{1-\frac{T_z}{T_s}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8+1}{2} \cdot 0,216515 \cdot (914,81+273,15)^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{526,82+273,15}{914,81+273,5}\right)^4}{1-\frac{526,82+273,15}{914,81+273,15}} \qquad [5.69]$$

$$\alpha_{sal} = \underline{45,29 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde a_{st} $[-]$ - stupeň černosti povrchu stěn, uvažuje se $a_{st} = 0,8$ [1]

a $[-]$ - stupeň černosti proudu spalin při teplotě T_S

T_S $[K]$ - teplota proudu spalin

T_z $[K]$ - absolutní teplota zaneseného povrchu plochy

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,244003} \qquad [5.70]$$

$$a = \underline{0,216515}$$

Příslušná optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = \left(k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}\right) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = \left(4,38897 + 0,191279\right) \cdot 0,1 \cdot 0,5327 \qquad [5.71]$$

$$k \cdot p \cdot s = \underline{0,244003}$$

Kde p $[MPa]$ - je tlak spalin, bere se $p = 0,1 \quad MPa$ [1]

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{C}}$$

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{6,2595} + \frac{1}{0,35} + \frac{1}{2,763}} \qquad [5.72]$$

$$s = \underline{0,5327 \quad m}$$

Kde A, B, C $[m]$ - je výška, šířka a hloubka volného prostoru mezi deskami

$A = v_s$, $B = s_1$ a $C = s_š$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,183268}{3,16 \cdot \sqrt{0,030628 \cdot 0,5327}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{914,81 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,306278 \qquad [5.73]$$

$$k_s \cdot r_s = \underline{4,38897} \quad 1/mMPa$$

Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O^s_{H_2O} + (\chi - 1) \cdot (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VS\,\min}}{O_{SV\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,87734 + (1,000000025 - 1) \cdot (1,329 - 1) \cdot 2,966944105}{3,811038 + (1,329 - 1) \cdot 2,966944} \qquad [5.74]$$

$$r_{H_2O} = \underline{0,183268}$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

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

$$r_s = 0,183268 + 0,12301 \qquad [5.75]$$

$$r_s = \underline{0,306278}$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SV\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,588806 + 0,00006145}{3,811038 + (1,329 - 1) \cdot 2,966944} \qquad [5.76]$$

$$r_{RO_2} = \underline{0,12301}$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$p_s = r_s \cdot p$$

$$p_s = 0,306278 \cdot 0,1 \qquad [5.77]$$

$$p_s = \underline{0,0306278 \quad MPa}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{\left(\overline{t_s} + 273,15\right)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002773}{\sqrt[3]{\left(914,81 + 273,15\right)^2 \cdot 20^2}} \qquad [5.78]$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \underline{0,191279 \quad 1/mMPa}$$

Kde d_{pk} $[\mu m]$ - je střední průměr popílkových částic, volím 20 μm [1]

Koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{ú} + 1)}{2 \cdot G_s} = \frac{0,02 \cdot (0,7 + 1)}{2 \cdot 6,12965} = \underline{0,002773 \quad kg/kg} \qquad [5.79]$$

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{1,2\,stř} \cdot O_{VV\,\min}$$

$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,329 \cdot 2,96694 \qquad [5.80]$$

$$G_s = \underline{6,12965 \quad kg/kg}$$

Střední povrchová teplota nánosu na zevnějšku trubek

$$t_z = \overline{t_p} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_{k_2}}\right) \cdot \frac{Q_{PIIIB} + Q_{s,B}}{S_{TP}} \cdot 10^3$$

$$t_z = 455,5 + \left(0,002 + \frac{1}{4153,36}\right) \cdot \frac{2271,312 + 238,222}{78,8486} \cdot 10^3 \qquad [5.81]$$

$$t_z = \underline{526,82 \quad °C}$$

Výkon přehříváku PIII-B

$$Q_{PIIIB} = (M_{pp} - M_{VSII}) \cdot (i_{PIIIB}^{out} - i_{PIIIB}^{in})$$

$$Q_{PIIIb} = (24,44 - 1,9558) \cdot (3309,7 - 3208,7) \qquad [5.82]$$

$$Q_{PIIIB} = \underline{2271,312 \quad kW}$$

Kde i_{PIIIB}^{out} $[kJ/kg]$ - entalpie páry na výstupu z PIIIB, $f\left(t_{PIIIB}^{out}, p_{PIIIB}^{out}\right)$ [2]

i_{PIIIB}^{in} $[kJ/kg]$ - entalpie páry na výstupu do PIIIB, $f\left(t_{PIIIB}^{in}, p_{PIIIB}^{in}\right)$ [2]

Součinitel zanesení

Po odborné konzultaci na základě zkušeností bereme $\varepsilon = 0,002$

Výhřevná plocha desek (část B)

$$S_{TPB} = n_d \cdot S_{1dB} \cdot x$$
$$S_{TPB} = 6 \cdot 15,2807 \cdot 0,86 \qquad [5.83]$$
$$S_{TPB} = \underline{78,8486 \quad m^2}$$

Kde x $[-]$ - úhlový součinitel osálání stěn, odečteno $x = 0,86$ z obr.6-2a v [1]

Plocha jedné desky

Poněvadž se jedná o případ oboustranného omývání, bere se výhřevná plocha jedné desky jako dvojnásobek.

$$S_{1dB} = 2 \cdot (s_{dB} \cdot v_s + (s_{\check{s}} - s_{dB}) \cdot s_{dB})$$
$$S_{1dB} = 2 \cdot (0,946 \cdot 6,2595 + (2,763 - 0,946) \cdot 0,946) \qquad [5.84]$$
$$S_{1dB} = \underline{15,2807 \quad m^2}$$

Hustota tepelného toku procházejícího výstupním průřezem přehříváku do dalších ploch

$$q_{sv} = y_h \cdot \bar{q} \cdot \frac{S_{vo}}{S_{sv}} \cdot (1-a) \cdot \varphi_{o-sv} + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot \psi_{sv} \cdot a \cdot \left(\frac{\bar{t}_s}{100}\right)^4$$
$$q_{sv} = 0,65 \cdot 64,037 \cdot \frac{16,4905}{33,8625} \cdot (1-0,2165) \cdot 0,0631 + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 0,2165 \cdot \left(\frac{914,81}{100}\right)^4 \qquad [5.85]$$
$$q_{sv} = \underline{5,32 \quad kW/m^2}$$

Kde y_h $[-]$ - součinitel tepelné nerovnoměrnosti po výšce ohniště,
voleno $y_h = 0,65$ [1]

ψ_{sv} $[-]$ - součinitel tepelné efektivnosti následujícího svazku,
bereme $\psi_{sv} = 0,5$ [1]

Výstupní průřez šotového prostoru

$$S_{sv} = b \cdot h = 5,375 \cdot 6,3 = \underline{33,8625 \quad m^2} \qquad [5.86]$$

Úhlový součinitel ohniště

$$\varphi_{o-sv} = \sqrt{\left(\frac{C}{B}\right)^2 + 1} - \frac{C}{B}$$

$$\varphi_{o-sv} = \sqrt{\left(\frac{2,763}{0,35}\right)^2 + 1} - \frac{2,763}{0,35} \qquad [5.87]$$

$$\varphi_{o-sv} = \underline{0,0631}$$

Kde C $[m]$ - hloubka deskového přehříváku PIIIB ve směru proudění spalin, $C = s_{š}$

B $[m]$ - vzdálenost mezi deskami PIIIB, $B = s_1$

Sálavé teplo z ohniště a z prostoru desek zachycené v prostoru desek

$$Q_{s,dp} = \delta \cdot y_h \cdot \bar{q} \cdot S_{vo} - q_{sv} \cdot S_{sv}$$

$$Q_{s,dp} = 1 \cdot 0,65 \cdot 64,0037 \cdot 16,4905 - 5,32 \cdot 33,8625 \qquad [5.88]$$

$$Q_{s,dp} = \underline{505,793 \quad kW}$$

Kde δ $[-]$ - součinitel, $\delta = 1$ [1]

Odebraná část přehřívákem (částí B)

$$Q_{s,B} = \frac{S_{TPB}}{S_{TPB} + S_{par}} \cdot Q_{s,dp}$$

$$Q_{s,B} = \frac{78,8486}{78,8486 + 88,563} \cdot 505,793 \qquad [5.89]$$

$$Q_{s,B} = \underline{238,222 \quad kW}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \alpha_s \cdot \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_{k_2}}\right) \cdot (1+m)}$$

$$k = \frac{75,73}{1 + 75,73 \cdot \left(0,002 + \frac{1}{4153,361}\right) \cdot (1 + 0,222688)} \qquad [5.90]$$

$$k = \underline{62,71 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \xi \cdot \left(\alpha_{k_1} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot s_2 \cdot x} + \alpha_{sal} \right)$$

$$\alpha_s = 0,95 \cdot \left(26,28 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0337}{2 \cdot 0,047 \cdot 0,86} + 45,29 \right) \qquad [5.91]$$

$$\alpha_s = \underline{75,73 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde ξ $[-]$ - součinitel využití plochy PIIIB, $\xi = 0,95$ [1]

x $[-]$ - úhlový součinitel osálání desek, $x = 0,86$ [1]

Zachycený podíl tepla vysálaného z ohniště

$$m = \frac{Q_{s,dp}}{Q_{PIIIB}}$$

$$m = \frac{505,793}{2271,312} \qquad [5.92]$$

$$m = \underline{0,222688}$$

Teplo předané deskovému přehříváku PIIIB

$$Q_{PIIIB}^{skut} = k \cdot \Delta t \cdot S_{TPB}$$

$$Q_{PIIIB}^{skut} = 62,71 \cdot 459,31 \cdot 78,8486 \qquad [5.93]$$

$$Q_{PIIIB}^{skut} = \underline{2271,254 \quad kW}$$

Logaritmický teplotní spád (protiproud)

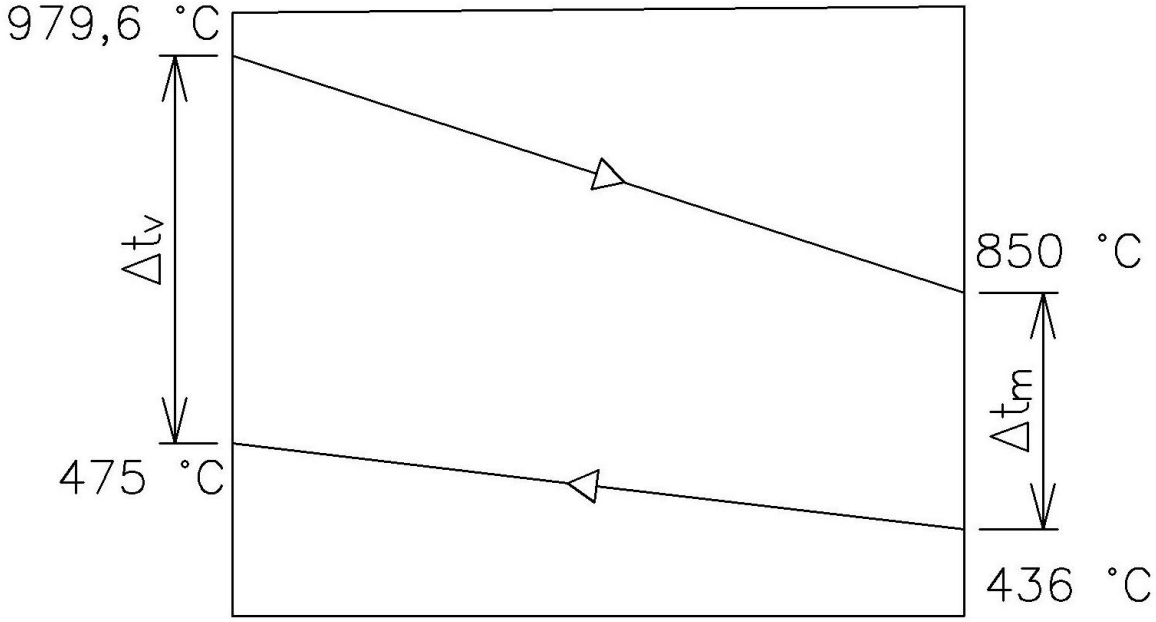
$$\Delta t_v = t_{PIIIB-in}^{s} - t_{PIIIB-out}^{m} = 979,6 - 475 = 504,62 \ °C \qquad [5.94]$$

$$\Delta t_m = t_{PIII-out}^{s} - t_{PIIIB-in}^{m} = 850 - 436 = 414 \ °C \qquad [5.95]$$

$$\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} = 1,2 \qquad [5.96]$$

$1,2 \leq 1,7 \quad \Rightarrow$ teplotní spád lze počítat jako střední aritmetický

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v + \Delta t_m}{2} = \frac{504,62 + 414}{2} = \underline{459,31 \ °C} \qquad [5.97]$$



Obr. 5-6 Teplotní spád přehříváku III – části B

Odchylka skutečného předaného tepla od navrhovaného pro přehřívák PIIIB

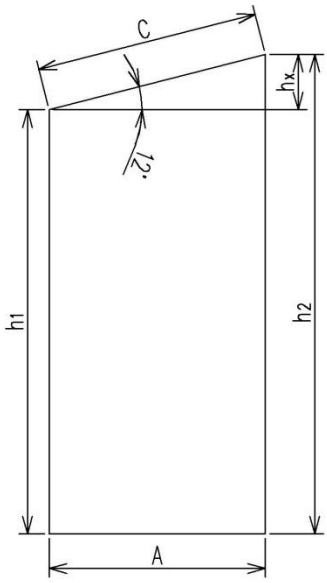
$$p_{PIIIB} = \frac{Q_{PIIIB} - Q_{PIIIB}^{skut}}{Q_{PIIIB}} = \frac{2271,312 - 2271,254}{2271,312} \cdot 100 = \underline{0,0025\ \%} \qquad [5.98]$$

Výsledná teplota spalin na výstupu z deskových přehříváků

$$t_{PIII-out}^{s} = \frac{t_{PIIIA-out}^{s} + t_{PIIIB-out}^{s}}{2} = \frac{869 + 850}{2} = \underline{859,5\ °C} \qquad [5.99]$$

5.2.4 Výpočet paralelních ploch v prostoru přehříváku III

Šířka boční stěny	A	= 3068	mm = 3,068	m
Výška boční stěny 1	h_1	= 6006	mm = 6,006	m
Výška boční stěny 2	h_2	= 6790	mm = 6,79	m
	h_x	= 784	mm = 0,784	m
Šikmá délka	C	= 3167	mm = 3,167	m
Hloubka kanálu	B	= 5375	mm = 5,375	m



Obr. 5-7 Paralelní plocha PIII-A,B

Velikost paralelních ploch [5.100]

$$S_{par\,III} = h_1 \cdot B + B \cdot C + 2 \cdot \left(A \cdot h_1 + \frac{A \cdot h_x}{2} \right)$$

$$S_{par\,III} = 6,006 \cdot 5,375 + 5,375 \cdot 3,167 + 2 \cdot \left(3,068 \cdot 6,006 + \frac{3,068 \cdot 0,784}{2} \right)$$

$$S_{par\,III} = \underline{88,563 \quad m^2}$$

Skutečný celkový výkon deskových přehříváků

$$Q_{PIII}^{skut} = Q_{PIIIA}^{skut} + Q_{PIIIB}^{skut}$$

$$Q_{PIII}^{skut} = 3424,813 + 2271,254 \qquad [5.101]$$

$$Q_{PIII}^{skut} = \underline{5696,067 \quad kW}$$

Tepelný tok v prostoru deskových přehříváků

$$q_{PIII} = \frac{Q_{PIII}^{skut}}{S_{TPA} + S_{TPB} + S_{parIII}}$$

$$q_{PIII} = \frac{5696,067}{107,0365 + 78,8486 + 88,563} \qquad [5.102]$$

$$q_{PIII} = \underline{20,7546 \quad kW / m^2}$$

Tepelný výkon paralelních ploch v prostoru deskových přehříváků

$$Q_{parIII}^{skut} = q_{PIII} \cdot S_{parIII}$$

$$Q_{parIII}^{skut} = 20,7546 \cdot 88,563 \qquad [5.103]$$

$$Q_{parIII}^{skut} = \underline{1838,092 \quad kW}$$

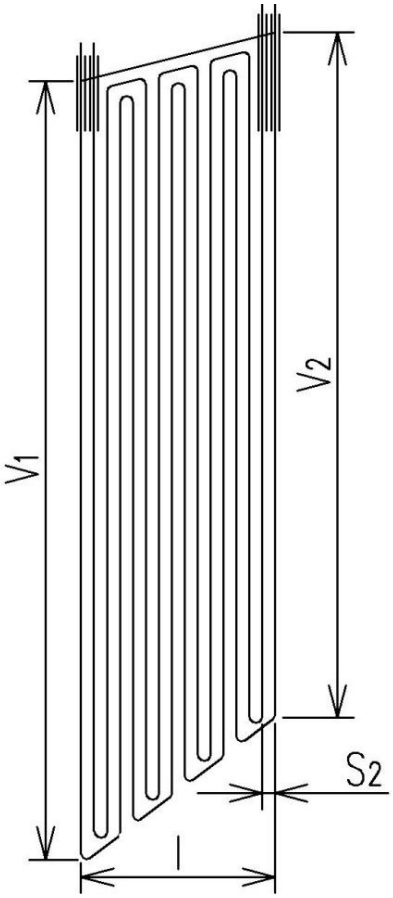
5.3 Přehřívák IV (PIV)

5.3.1 Parametry

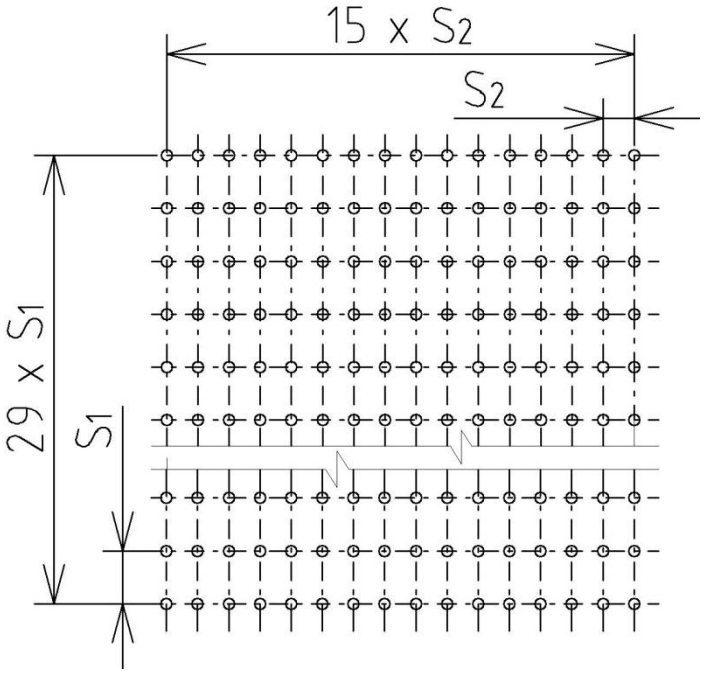
Průměr trubky	D	= 38	mm = 0,038	m
Vnitřní průměr trubky	d	= 26,8	mm = 0,0268	m
Tloušťka stěny	tl	= 5,6	mm = 0,006	m
Rozteč (příčná)	s_1	= 170	mm = 0,17	m
Rozteč (podélná)	s_2	= 100	mm = 0,1	m
Počet trubek	n_{tr}	= 30		
Počet řad	$n_{řad}$	= 16		
Celkový počet trubek	n_{celk}	= 480		

Rozměry kanálu

Šířka	b	= 5375	mm = 5,375	m
Délka	l	= 1500	mm = 1,5	m
Výška vstup	v_1	= 6040	mm = 6,040	m
Výška výstup	v_2	= 5282	mm = 5,282	m
Střední výška	v_s	= 5661	= 5,661	m



Obr. 5-8 Přehřívák PIV



Obr. 5-9 Uspořádání svazku trubek přehříváku PIV

5.3.2 Proudění ze strany spalin (příčné)

Střední teplota spalin

$$\overline{t_s} = \frac{t^s_{PIV-in} + t^s_{PIV-out}}{2} = \frac{859,5 + 696,3}{2} = \underline{777,9 \ °C} \qquad [5.104]$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{V_s}{F_s} \cdot \frac{273,15 + \overline{t_s}}{273,15}$$

$$w_s = \frac{33,584684}{23,8669} \cdot \frac{273,15 + 777,9}{273,15} \qquad [5.105]$$

$$w_s = \underline{5,41 \quad m/s}$$

Střední hodnota přebytku vzduchu

$$\alpha_1 = 1,334$$

$$\alpha_2 = 1,344 \qquad [5.106]$$

$$\alpha_{1,2\,stř} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \frac{1,33 + 1,344}{2} = \underline{1,339}$$

Objemový průtok spalin pro střední hodnotu přebytku vzduchu

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sv\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}]$$

$$V_s = 6,97 \cdot [3,81104 + (1,339 - 1) \cdot 2,96694] \qquad [5.107]$$

$$V_s = \underline{33,584683 \quad Nm^3/kg}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_s = \frac{2 \cdot F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2} = \frac{2 \cdot 25,5794 \cdot 22,3693}{25,5794 + 22,3693} = \underline{23,8669 \quad m^2} \qquad [5.108]$$

$$F_1 = b \cdot v_1 - n_{tr} \cdot D \cdot v_1$$

$$F_1 = 5,375 \cdot 6,04 - 30 \cdot 0,038 \cdot 6,04 \qquad [5.109]$$

$$F_1 = \underline{25,5794 \quad m^2}$$

$$F_2 = v_2 \cdot b - n_{tr} \cdot D \cdot v_2$$

$$F_2 = 5,282 \cdot 5,375 - 30 \cdot 0,038 \cdot 5,282 \qquad [5.110]$$

$$F_2 = \underline{22,3693 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro hladké trubky, uspořádání za sebou

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \mathrm{Pr}^{0,33}$$

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,514 \cdot \frac{0,0895552}{0,038} \cdot \left(\frac{5,41 \cdot 0,038}{0,0001218} \right)^{0,65} \cdot 0,59221^{0,33} \qquad [5.111]$$

$$\alpha_{k_1} = \underline{75,23 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

Pro $n_{tr} \geq 10$ je $C_z = 1$ [1]

Korekční součinitel na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči trubek

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

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 4,474 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,632}{2} \right)^3 \right]^2} \qquad [5.112]$$

$$C_s = \underline{1,514}$$

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,17}{0,038} = \underline{4,474} \qquad [5.113]$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,1}{0,038} = \underline{2,632} \qquad [5.114]$$

Hodnoty pro střední teplotu spalin získané interpolací

Kinematická viskozita	$\nu = 0,0001218 \quad m^2 / s$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,0895552 \quad W / mK$
Prandtlovo číslo	$\mathrm{Pr} = 0,59221$

5.3.3 Podélné obtékání ze strany páry

Střední hodnota teploty páry

$$\overline{t_p} = \frac{t^m_{PIV-in} + t^m_{PIV-out}}{2} = \frac{400 + 520}{2} = \underline{460 \ °C} \qquad [5.115]$$

Střední hodnota tlaku páry

$$\overline{p_p} = \frac{p^m_{PIV-in} + p^m_{PIV-out}}{2} = \frac{10+9,6}{2} = \underline{9,8 \quad MPa} \qquad [5.116]$$

Množství páry

$$M^{PIV}_{pp} = M_{pp} = \underline{24,444 \quad kg/s} \qquad [5.117]$$

Hodnoty pro střední teplotu páry získané interpolací

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,073052 \quad W/mK$

Součinitel dynamické viskozity $\eta = 0,000027096 \quad Pa \cdot s$

Měrná tepelná kapacita $c_p = 2,67064 \quad kJ/kg \cdot K$

Prandtlovo číslo

$$\mathrm{Pr} = \frac{\eta \cdot c_p \cdot 10^3}{\lambda}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{0,000027096 \cdot 2,67064 \cdot 10^3}{0,073052} \qquad [5.118]$$

$$\mathrm{Pr} = \underline{0,99057742}$$

Součinitel kinematické viskozity

$$\nu = \eta \cdot v''$$

$$\nu = 0,000027096 \cdot 0,0311 \qquad [5.119]$$

$$\nu = \underline{8,4269 \cdot 10^{-7} \quad m^2/s}$$

Kde v'' - měrný objem páry $v'' = f(\overline{t_p}, \overline{p_p}) = 0,0311 \quad m^3/kg$ [2]

Rychlost páry

$$w_p = \frac{M^{PIV}_{pp} \cdot v''}{F_p}$$

$$w_p = \frac{22,444 \cdot 0,0311}{0,0338} \qquad [5.120]$$

$$w_p = \underline{22,46 \quad m/s}$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot 2$$

$$F_p = \frac{\pi \cdot 0,0268^2}{4} \cdot 30 \cdot 2 \qquad [5.121]$$

$$F_p = \underline{0,0338 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_{k_2} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \mathrm{Pr}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_m$$

$$\alpha_{k_2} = 0,023 \cdot \frac{0,073052}{0,026} \cdot \left(\frac{22,46 \cdot 0,0268}{8,4269 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,99057742^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \qquad [5.122]$$

$$\alpha_{k_2} = \underline{3010,88 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde C_t $[-]$ - opravný koeficient, při ochlazování spalin $C_t = 1$ [1]

C_m $[-]$ - opravný koeficient, při dvoustranném ohřevu $C_m = 1$ [1]

Ekvivalentní průměr d_e

Ekvivalentní průměr je při proudění uvnitř trubek roven vnitřnímu průměru trubky $d_e = d = 0,0268 \quad m$ [1]

Součinitel přestupu tepla sáláním

Uvažujeme sálání tříatomových plynů a i sálání tuhých částic v úletu (popílku) [1]

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_s}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,221853 \cdot (777,9 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{518,59 + 273,15}{777,9 + 273,5} \right)^4}{1 - \frac{518,59 + 273,15}{777,9 + 273,15}} \qquad [5.123]$$

$$\alpha_{sal} = \underline{36,32 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,25084} \qquad [5.124]$$

$$a = \underline{0,221853}$$

Příslušná optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = \left(k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk} \right) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = \left(5,03656 + 0,206245 \right) \cdot 0,1 \cdot 0,4784 \qquad [5.125]$$

$$k \cdot p \cdot s = \underline{0,25084}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

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

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1 \right) \qquad [5.126]$$

$$s = \underline{0,4784 \quad m}$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,18214}{3,16 \cdot \sqrt{0,030439 \cdot 0,4784}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{777,9 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,304392 \qquad [5.127]$$

$$k_s \cdot r_s = \underline{5,03656} \quad 1/mMPa$$

Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O^s_{H_2O} + (\chi - 1) \cdot (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VS\,\min}}{O_{SV\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,87734 + (1,000000025 - 1) \cdot (1,339 - 1) \cdot 2,966944105}{3,811038 + (1,339 - 1) \cdot 2,966944} \qquad [5.128]$$

$$r_{H_2O} = \underline{0,18214}$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

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

$$r_s = 0,182139 + 0,122252 \qquad [5.129]$$

$$r_s = \underline{0,304392}$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SV\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,588806 + 0,00006145}{3,811038 + (1,339 - 1) \cdot 2,966944} \qquad [5.130]$$

$$r_{RO_2} = \underline{0,122252}$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$p_s = r_s \cdot p$$

$$p_s = 0,30439 \cdot 0,1 \qquad [5.131]$$

$$p_s = \underline{0,030439 \quad MPa}$$

Kde p - je tlak spalin, bere se $p = 0,1 \quad MPa$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{\left(\overline{t_s} + 273,15\right)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002756}{\sqrt[3]{\left(777,9 + 273,15\right)^2 \cdot 20^2}} \qquad [5.132]$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \underline{0,206245 \quad 1/mMPa}$$

Kde d_{pk} $[\mu m]$ - je střední průměr popílkových částic, volím 20 μm [1]

Koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{ú} + 1)}{2 \cdot G_s} = \frac{0,02 \cdot (0,7 + 1)}{2 \cdot 6,168396} = \underline{0,002756 \quad kg/kg} \qquad [5.133]$$

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{1,2\,stř} \cdot O_{VV\,\min}$$

$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,339 \cdot 2,96694 \qquad [5.134]$$

$$G_s = \underline{6,168396 \quad kg/kg}$$

Střední povrchová teplota nánosu na zevnějšku trubek

$$t_z = \overline{t_p} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_{k_2}}\right) \cdot \frac{Q_{PIV}}{S_{TP}} \cdot 10^3$$

$$t_z = 460 + \left(0,002 + \frac{1}{3010,88}\right) \cdot \frac{8149,6296}{324,3903} \cdot 10^3 \qquad [5.135]$$

$$t_z = \underline{518,59 \quad °C}$$

Součinitel zanesení

Po odborné konzultaci na základě zkušeností bereme $\varepsilon = 0,002$

Výhřevná plocha přehříváku

$$S_{TP} = \pi \cdot D \cdot v_s \cdot n_{celk}$$

$$S_{TP} = \pi \cdot 0,038 \cdot 5,661 \cdot 480 \qquad [5.136]$$

$$S_{TP} = \underline{324,3903 \quad m^2}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_s}{1+\alpha_s \cdot \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_{k_2}}\right)}$$

$$k = \frac{105,97}{1+105,97 \cdot \left(0,002 + \frac{1}{3010,88}\right)} \qquad [5.137]$$

$$k = \underline{84,96 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \xi \cdot \left(\alpha_{k_1} + \alpha_{sal}\right)$$

$$\alpha_s = 0,95 \cdot \left(75,23 + 36,32\right) \qquad [5.138]$$

$$\alpha_s = \underline{105,97 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde ξ $[-]$ -součinitel využití plochy PIV, bráno $\xi = 0,95$ [1]

Teplo předané deskovému přehříváku PIV

$$Q_{PIV}^{skut} = k \cdot \Delta t \cdot S_{TP}$$

$$Q_{PIV}^{skut} = 84,97 \cdot 295,63 \cdot 324,39 \qquad [5.139]$$

$$Q_{PIV}^{skut} = \underline{8148,566 \quad kW}$$

Logaritmický teplotní spád (souproud)

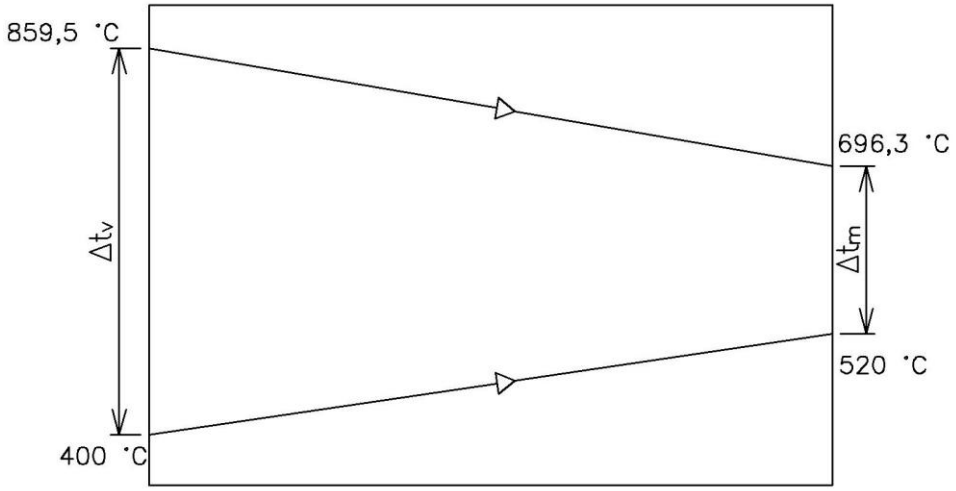
$$\Delta t_v = t_{PIV-in}^{s} - t_{PIV-in}^{m} = 859,5 - 400 = 459,5 \ °C \qquad [5.140]$$

$$\Delta t_m = t_{PIV-out}^{s} - t_{PIV-out}^{m} = 696,3 - 520 = 176,3 \ °C \qquad [5.141]$$

$$\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} = 2,6 \qquad [5.142]$$

$2,6 \leq 1,7$ *neplatí* $\Rightarrow$ teplotní spád nutno počítat jako logaritmický

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{459,5 - 176,3}{\ln \frac{459,5}{176,3}} = \underline{295,63 \ °C} \qquad [5.143]$$



Obr. 5-10 Teplotní spád přehříváku IV

Odchylka skutečného předaného tepla od navrhovaného pro přehřívák PIV

$$p = \frac{Q_{PIV} - Q_{PIV}^{skut}}{Q_{PIV}} = \frac{8149,6296 - 8148,566}{8149,6296} \cdot 100 = \underline{0,013\,\%} \qquad [5.144]$$

5.3.4 Výpočet paralelních ploch v prostoru přehříváku PIV

Šířka boční stěny	A = 1500	mm = 1,500	m
Výška boční stěny 1	h_1 = 6290	mm = 6,290	m
	h_{x1} = 919	mm = 0,919	m
	h_{x2} = 286	mm = 0,286	m
Šikmá délka	C = 1527	mm = 3,167	m
Hloubka kanálu	B = 5375	mm = 5,375	m

Velikost paralelních ploch v prostoru přehříváku

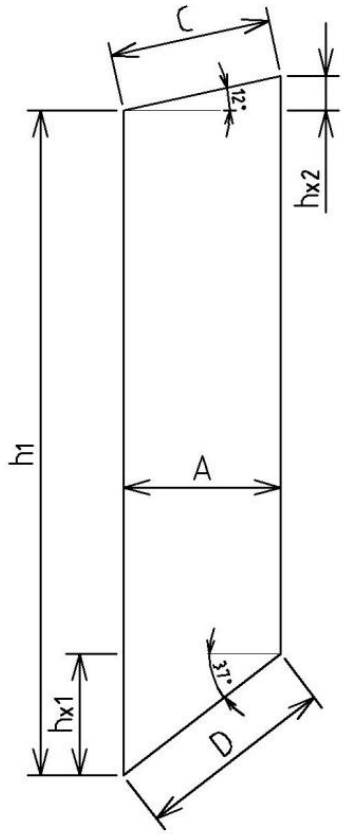
$$S_{par\,IV} = 2 \cdot A \cdot \left(h_1 - h_{x_1}\right) + \frac{A \cdot h_{x_2}}{2} + \frac{A \cdot h_{x_1}}{2}$$

$$S_{par\,IV} = 2 \cdot 1,5 \cdot (6,29 - 0,919) + \frac{1,5 \cdot 0,286}{2} + \frac{1,5 \cdot 0,919}{2} \qquad [5.145]$$

$$S_{par\,IV} = \underline{17,0168 \quad m^2}$$

Tepelný tok v prostoru přehříváku [5.146]

$$q_{PIV} = \frac{Q_{PIV}^{skut}}{S_{TP} + S_{parIV}} = \frac{8148,566}{324,3903 + 17,0168} = \underline{23,8676 \quad kW/m^2}$$



Obr. 5-11 Paralelní plocha PIV

Tepelný výkon paralelních ploch v prostoru přehříváku

$$Q_{parIV}^{skut} = q_{PIV} \cdot S_{parIV} = 23,8676 \cdot 17,0168 = \underline{406,149 \quad kW} \qquad [5.147]$$

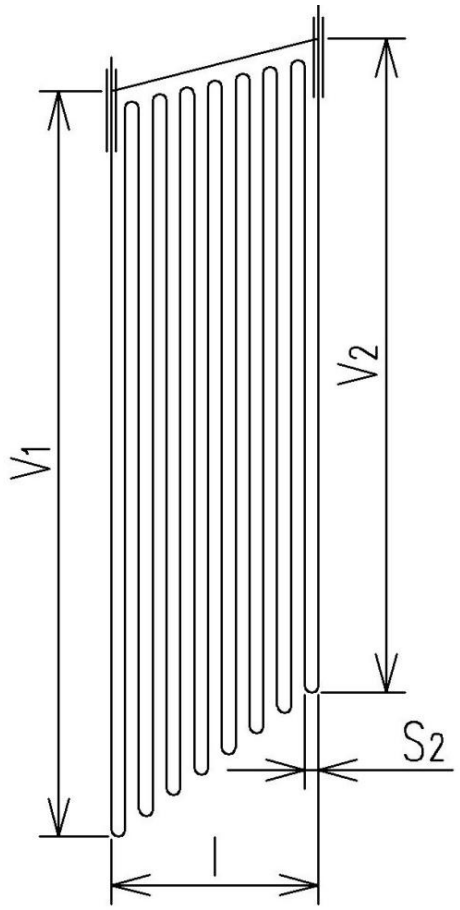
5.4 Přehřívák II (PII)

5.4.1 Parametry

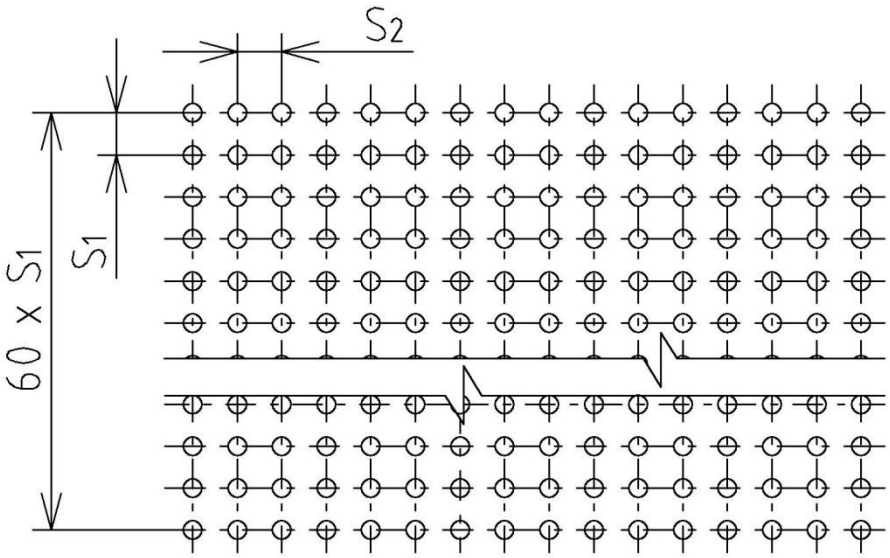
Průměr trubky	D	= 38	mm = 0,038	m
Vnitřní průměr trubky	d	= 26,8	mm = 0,0268	m
Tloušťka stěny	tl	= 5,6	mm = 0,0056	m
Rozteč (příčná)	s_1	= 85	mm = 0,085	m
Rozteč (podélná)	s_2	= 90	mm = 0,09	m
Počet trubek	n_{tr}	= 61		
Počet řad	$n_{řad}$	= 16		

Rozměry kanálu

Šířka	b	= 5375	mm = 5,375	m
Délka	l	= 1350	mm = 1,35	m
Výška vstup	v_1	= 4911	mm = 4,911	m
Výška výstup	v_2	= 4256	mm = 4,256	m
Střední výška	v_s	= 4583	mm = 4,583	m



Obr. 5-12 Přehřívák PII



Obr. 5-13 Uspořádání svazku trubek PII

5.4.2 Proudění ze strany spalin (příčné)

Střední teplota spalin

$$\bar{t}_s = \frac{t^s_{PII-in} + t^s_{PII-out}}{2} = \frac{696,3 + 562,4}{2} = \underline{629,35\ °C} \qquad [5.148]$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{V_s}{F_s} \cdot \frac{273,15 + \bar{t}_s}{273,15}$$
$$w_s = \frac{33,79155}{13,9402} \cdot \frac{273,15 + 629,35}{273,15} \qquad [5.149]$$
$$w_s = \underline{8,01\quad m/s}$$

Střední hodnota přebytku vzduchu

$$\alpha_1 = 1,344$$
$$\alpha_2 = 1,354 \qquad [5.150]$$
$$\alpha_{1,2\,str} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \frac{1,344 + 1,354}{2} = \underline{1,349}$$

Objemový průtok spalin pro střední hodnotu přebytku vzduchu

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sv\,\min} + (\alpha_{1,2\,str} - 1) \cdot O_{VV\,\min}]$$
$$V_s = 6,97 \cdot [3,81104 + (1,349 - 1) \cdot 2,96694] \qquad [5.151]$$
$$V_s = \underline{33,79155\quad Nm^3/kg}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_s = \frac{2 \cdot F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2} = \frac{2 \cdot 15,0129 \cdot 13,0106}{15,0129 + 13,0106} = \underline{13,9402\quad m^2} \qquad [5.152]$$

$$F_1 = b \cdot v_1 - n_{tr} \cdot D \cdot v_1$$
$$F_1 = 5,375 \cdot 4,911 - 61 \cdot 0,038 \cdot 5,375 \qquad [5.153]$$
$$F_1 = \underline{15,0129\quad m^2}$$

$$F_2 = v_2 \cdot b - n_{tr} \cdot D \cdot v_2$$
$$F_2 = 4,256 \cdot 5,375 - 61 \cdot 0,038 \cdot 4,256 \qquad [5.154]$$
$$F_2 = \underline{13,0106\quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro hladké trubky, uspořádání za sebou

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \mathrm{Pr}^{0,33}$$

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,0187 \cdot \frac{0,07669475}{0,038} \cdot \left(\frac{8,01 \cdot 0,038}{0,0000945656} \right)^{0,65} \cdot 0,607065^{0,33} \qquad [5.155]$$

$$\alpha_{k_1} = \underline{66,45 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

Pro $n_{tr} \geq 10$ je $C_z = 1$ [1]

Korekční součinitel na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči trubek

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

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,2368 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,3684}{2} \right)^3 \right]^2} \qquad [5.156]$$

$$C_s = \underline{1,0187}$$

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,085}{0,038} = \underline{2,2368} \qquad [5.157]$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,09}{0,038} = \underline{2,3684} \qquad [5.158]$$

Hodnoty pro střední teplotu spalin získané interpolací

Kinematická viskozita	$\nu = 0,0000945656 \quad m^2 / s$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,07669475 \quad W / mK$
Prandtlovo číslo	$\mathrm{Pr} = 0,607065$

5.4.3 Podélné obtékání ze strany páry

Střední hodnota teploty páry

$$\overline{t_p} = \frac{t^m_{PII-in} + t^m_{PII-out}}{2} = \frac{360+460}{2} = \underline{410\ °C} \qquad [5.159]$$

Střední hodnota tlaku páry

$$\overline{p_p} = \frac{p^m_{PII-in} + p^m_{PII-out}}{2} = \frac{10,8+10,4}{2} = \underline{10,6\quad MPa} \qquad [5.160]$$

Množství páry

$$M^{PII}_{pp} = M_{pp} - M_{VSII} - M_{VSI}$$
$$M^{PII}_{pp} = 24,444 - 1,9558 - 1,7863 \qquad [5.161]$$
$$M^{PII}_{pp} = \underline{20,702\quad kg/s}$$

Hodnoty pro střední teplotu páry získané interpolací

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,070728\quad W/mK$
Součinitel dynamické viskozity $\eta = 0,000024948\quad Pa \cdot s$
Měrná tepelná kapacita $c_p = 3,087\quad kJ/kg \cdot K$

Prandtlovo číslo

$$\Pr = \frac{\eta \cdot c_p \cdot 10^3}{\lambda}$$
$$\Pr = \frac{0,000024948 \cdot 3,087 \cdot 10^3}{0,070728} \qquad [5.162]$$
$$\Pr = \underline{1,088882423}$$

Součinitel kinematické viskozity

$$\nu = \eta \cdot v''$$
$$\nu = 0,000024948 \cdot 0,0228 \qquad [5.163]$$
$$\nu = \underline{5,68814 \cdot 10^{-7}\quad m^2/s}$$

Kde v'' - měrný objem páry $v'' = f(\overline{t_p}, \overline{p_p}) = 0,0228\quad m^3/kg$ [2]

Rychlost páry

$$w_p = \frac{M^{PII}_{pp} \cdot v''}{F_p}$$
$$w_p = \frac{20,702 \cdot 0,0228}{0,0344} \qquad [5.164]$$
$$w_p = \underline{13,72\quad m/s}$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr}$$

$$F_p = \frac{\pi \cdot 0,0268^2}{4} \cdot 61 \qquad [5.165]$$

$$F_p = \underline{0,0344 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_{k_2} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_m$$

$$\alpha_{k_2} = 0,023 \cdot \frac{0,070728}{0,0268} \cdot \left(\frac{13,72 \cdot 0,0268}{5,68814 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,088882423^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \qquad [5.166]$$

$$\alpha_{k_2} = \underline{2794,56 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde C_t $[-]$ - opravný koeficient, při ochlazování spalin $C_t = 1$ [1]

C_m $[-]$ - opravný koeficient, při dvoustranném ohřevu $C_m = 1$ [1]

Ekvivalentní průměr d_e

Ekvivalentní průměr je při proudění uvnitř trubek roven vnitřnímu průměru trubky $d_e = d = 0,0268 \quad m$ [1]

Součinitel přestupu tepla sáláním

Uvažujeme sálání tříatomových plynů a i sálání tuhých částic v úletu (popílku) [1]

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_s}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,159913 \cdot (629,35 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{452,49 + 273,15}{629,35 + 273,5} \right)^4}{1 - \frac{452,49 + 273,15}{629,35 + 273,15}} \qquad [5.167]$$

$$\alpha_{sal} = \underline{17,91 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde a_{st} $[-]$ - stupeň černosti povrchu stěn, uvažuje se $a_{st} = 0,8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$
$$a = 1 - e^{-0,17425} \qquad [5.168]$$
$$a = \underline{0,159913}$$

Příslušná optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = \left(k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}\right) \cdot p \cdot s$$
$$k \cdot p \cdot s = \left(8,641241 + 0,226872\right) \cdot 0,1 \cdot 0,196491 \qquad [5.169]$$
$$k \cdot p \cdot s = \underline{0,17425}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right)$$
$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,085 \cdot 0,09}{0,038^2} - 1\right) \qquad [5.170]$$
$$s = \underline{0,196491 \quad m}$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s + 273,15}{1000}\right) \cdot r_s$$
$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,181025}{3,16 \cdot \sqrt{0,0302528 \cdot 0,196491}} - 1,02\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{629,35 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,302528 \qquad [5.171]$$
$$k_s \cdot r_s = \underline{8,641241 \ 1/mMPa}$$

Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O^s_{H_2O} + \left(\chi - 1\right) \cdot \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VS\min}}{O_{SV\min} + \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VV\min}}$$
$$r_{H_2O} = \frac{0,87734 + \left(1,000000025 - 1\right) \cdot \left(1,349 - 1\right) \cdot 2,966944105}{3,811038 + \left(1,349 - 1\right) \cdot 2,966944} \qquad [5.172]$$
$$r_{H_2O} = \underline{0,181025}$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2}$$
$$r_s = 0,181025 + 0,121504 \qquad [5.173]$$
$$r_s = \underline{0,302528}$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SV\,\min} + \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,588806 + 0,00006145}{3,811038 + (1,349 - 1) \cdot 2,966944} \qquad [5.174]$$

$$r_{RO_2} = \underline{0,121504}$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$p_s = r_s \cdot p$$

$$p_s = 0,3025282 \cdot 0,1 \qquad [5.175]$$

$$p_s = \underline{0,0302528 \quad MPa}$$

Kde p - je tlak spalin, bere se $p = 0,1 \quad MPa$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{\left(\overline{t_s} + 273,15\right)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002739}{\sqrt[3]{(629,35 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \qquad [5.176]$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \underline{0,226872 \quad 1/mMPa}$$

Kde $d_{pk} \quad [\mu m]$ - je střední průměr popílkových částic, volím 20 μm [1]

Koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{ú} + 1)}{2 \cdot G_s} = \frac{0,02 \cdot (0,7 + 1)}{2 \cdot 6,207144} = \underline{0,002739 \quad kg/kg} \qquad [5.177]$$

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{1,2\,stř} \cdot O_{VV\,\min}$$

$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,349 \cdot 2,96694 \qquad [5.178]$$

$$G_s = \underline{6,207144 \quad kg/kg}$$

Střední povrchová teplota nánosu na zevnějšku trubek

$$t_z = \overline{t_p} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_{k_2}}\right) \cdot \frac{Q_{PII}}{S_{TP}} \cdot 10^3$$

$$t_z = 410 + \left(0,003 + \frac{1}{2794,558}\right) \cdot \frac{6757,108}{534,0483} \cdot 10^3 \qquad [5.179]$$

$$t_z = \underline{452,49 \quad °C}$$

Součinitel zanesení

Po odborné konzultaci na základě zkušeností bereme $\varepsilon = 0,003$

Výhřevná plocha přehříváku

$$S_{TP} = \pi \cdot D \cdot v_s \cdot n_{celk}$$
$$S_{TP} = \pi \cdot 0,038 \cdot 4,5835 \cdot 976 \qquad [5.180]$$
$$S_{TP} = \underline{534,0483 \quad m^2}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \alpha_s \cdot \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_{k_2}} \right)}$$
$$k = \frac{71,71}{1 + 71,71 \cdot \left(0,003 + \frac{1}{2794,56} \right)} \qquad [5.181]$$
$$k = \underline{57,79 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \xi \cdot \left(\alpha_{k_1} + \alpha_{sal} \right)$$
$$\alpha_s = 0,85 \cdot \left(66,45 + 17,91 \right) \qquad [5.182]$$
$$\alpha_s = \underline{71,71 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde ξ $[-]$ - součinitel využití plochy přehříváku, bráno $\xi = 0,95$ [1]

Teplo předané deskovému přehříváku PIV

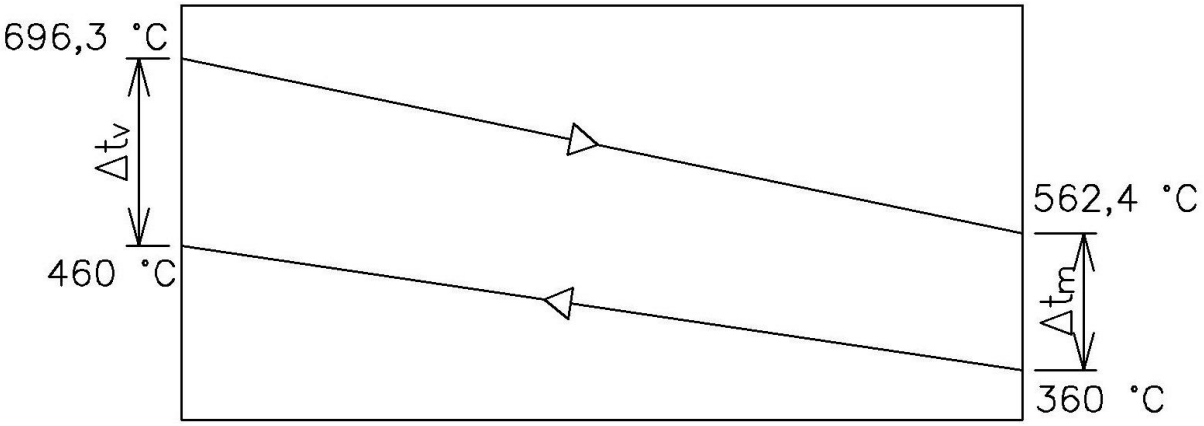
$$Q_{PII}^{skut} = k \cdot \Delta t \cdot S_{TP}$$
$$Q_{PII}^{skut} = 57,79 \cdot 218,91 \cdot 534,0483 \qquad [5.183]$$
$$Q_{PII}^{skut} = \underline{6756,34 \quad kW}$$

Logaritmický teplotní spád (protiproud)

$$\Delta t_v = t_{pII-in}^{s} - t_{pII-out}^{m} = 696,3 - 460 = 236,3 \ °C \qquad [5.184]$$

$$\Delta t_m = t_{pII-out}^{s} - t_{pII-in}^{m} = 562,4 - 360 = 202,4 \ °C \qquad [5.185]$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{236,3 - 202,4}{\ln \frac{236,3}{202,4}} = \underline{218,91 \ °C} \qquad [5.186]$$



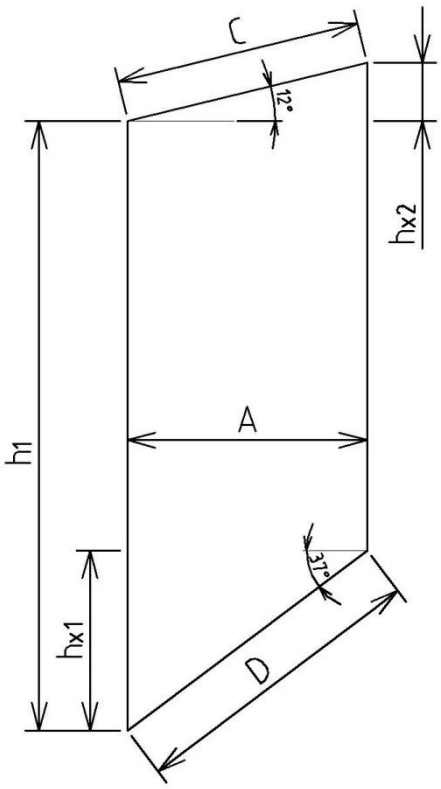
Obr. 5-14 Teplotní spád přehříváku PII

Odchylka skutečného předaného tepla od navrhovaného pro přehřívák PII

$$p = \frac{Q_{PII} - Q_{PII}^{skut}}{Q_{PII}} = \frac{6757{,}108 - 6756{,}34}{6757{,}108} \cdot 100 = \underline{0{,}0312\ \ \%} \qquad [5.187]$$

5.4.4 Výpočet paralelních ploch v prostoru přehříváku PII

Šířka boční stěny	A	= 2150	mm = 2,15	m
Výška boční stěny 1	h_1	= 5483	mm = 5,483	m
	h_{x1}	= 410	mm = 0,41	m
	h_{x2}	= 1412	mm = 1,412	m
Šikmá délka	C	= 2189	mm = 2,189	m
Hloubka kanálu	B	= 5375	mm = 5,375	m



Obr. 5-15 Paralelní plocha PII

Velikost paralelních ploch v prostoru přehříváku

$$S_{par\,II} = 2 \cdot \left(h_1 - h_{x_1}\right) \cdot A + \frac{A \cdot h_{x_2}}{2} + \frac{A \cdot h_{x_1}}{2}$$

$$S_{par\,II} = 2 \cdot \left(5{,}483 - 0{,}41\right) \cdot 2{,}15 + \frac{2{,}15 \cdot 1{,}412}{2} + \frac{2{,}15 \cdot 0{,}41}{2}$$

$$S_{par\,II} = \underline{23{,}7726\ \ m^2}$$

[5.188]

Tepelný tok v prostoru přehříváku

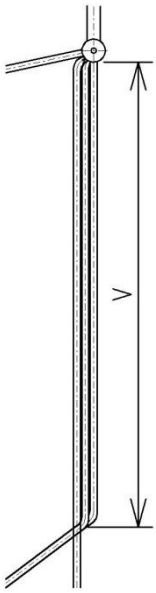
$$q_{PII} = \frac{Q_{PII}^{skut}}{S_{TP} + S_{parII}} = \frac{6756{,}34}{534{,}0483 + 23{,}7726} = \underline{12{,}11\ \ kW/m^2}$$

[5.189]

Tepelný výkon paralelních ploch v prostoru přehříváku

$$Q_{parII}^{skut} = q_{PII} \cdot S_{parII} = 12{,}11 \cdot 23{,}7726 = \underline{287{,}934 \;\; kW} \qquad [5.190]$$

5.5 Kotlová mříž



Průměr trubky	D	= 60	mm = 0,06	m
Vnitřní průměr trubky	d	= 50	mm = 0,05	m
Tloušťka stěny	tl	= 5	mm = 0,005	m
Rozteč (příčná)	s_1	= 170	mm = 0,17	m
Rozteč (podélná)	s_2	= 75	mm = 0,075	m
Počet trubek	n_{tr}	= 22		
Počet řad	$n_{řad}$	= 3		
Celkový počet trubek	n_{celk}	= 66		

Rozměry kanálu

Šířka	b	= 5375	mm = 5,375	m
Délka	l	= 150	mm = 0,15	m
Výška vstup/výstup	v	= 4190	mm = 4,190	m

5.5.1 Proudění ze strany spalin (příčné)

Střední teplota spalin

$$\bar{t}_s = \frac{t_{KM-in}^s + t_{KM-out}^s}{2} = \frac{562{,}4 + 558}{2} = \underline{560{,}2 \;\; °C} \qquad [5.191]$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{V_s}{F_s} \cdot \frac{273{,}15 + \bar{t}_s}{273{,}15}$$

$$w_s = \frac{33{,}89498}{16{,}9905} \cdot \frac{273{,}15 + 560{,}2}{273{,}15} \qquad [5.192]$$

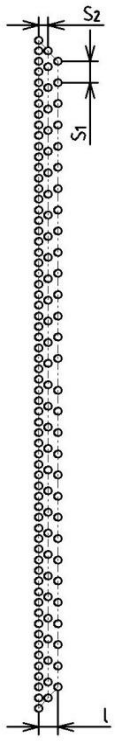
$$w_s = \underline{6{,}09 \quad m/s}$$

Objemový průtok spalin pro střední hodnotu přebytku vzduchu

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sv\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}]$$

$$V_s = 6{,}97 \cdot [3{,}81104 + (1{,}354 - 1) \cdot 2{,}96694] \qquad [5.193]$$

$$V_s = \underline{33{,}89498 \quad Nm^3/kg}$$



Obr. 5-16 Kotlová mříž ze spalovací komory

Světlý průřez pro spaliny

$$F_s = b \cdot v - n_{tr} \cdot D \cdot v$$
$$F_s = 5,375 \cdot 4,19 - 22 \cdot 0,06 \cdot 4,19 \qquad [5.194]$$
$$F_s = \underline{16,9905 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro hladké trubky, uspořádání za sebou

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \mathrm{Pr}^{0,33}$$
$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,7686 \cdot \frac{0,070777}{0,038} \cdot \left(\frac{6,08 \cdot 0,06}{0,0000829} \right)^{0,65} \cdot 0,61398^{0,33} \qquad [5.195]$$
$$\alpha_{k_1} = \underline{36,08 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

Pro $n_{tr} \geq 10$ je $C_z = 1$ [1]

Korekční součinitel na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči trubek

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^2}$$
$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,8333 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,25}{2} \right)^3 \right]^2} \qquad [5.196]$$
$$C_s = \underline{0,7686}$$

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,17}{0,06} = \underline{2,8333} \qquad [5.197]$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,075}{0,06} = \underline{1,25} \qquad [5.198]$$

Hodnoty pro střední teplotu spalin získané interpolací

Kinematická viskozita	$\nu = 0,0000829 \quad m^2 / s$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,070777 \quad W / mK$
Prandtlovo číslo	$\mathrm{Pr} = 0,61398$

5.5.2 Proudění ze strany páry (podélné)

Teplota syté páry pro tlak v bubnu 11,3 MPa

$$t_p^{KM} = \underline{319,44 \ °C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

Uvažujeme sálání tříatomových plynů a i sálání tuhých částic v úletu (popílku) [1]

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st}+1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)^4}{1-\frac{T_z}{T_s}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8+1}{2} \cdot 0,162507 \cdot (560,2+273,15)^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{399,44+273,15}{560,2+273,5}\right)^4}{1-\frac{399,44+273,15}{560,2+273,15}} \qquad [5.199]$$

$$\alpha_{sal} = \underline{14,4 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde a_{st} $[-]$ - stupeň černosti povrchu stěn, uvažuje se $a_{st} = 0,8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,177342} \qquad [5.200]$$

$$a = \underline{0,162507}$$

Příslušná optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = \left(k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}\right) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = (9,119565 + 0,23851) \cdot 0,1 \cdot 0,189507 \qquad [5.201]$$

$$k \cdot p \cdot s = \underline{0,177342}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

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

$$s = 0,9 \cdot 0,06 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,075}{0,06^2} - 1\right) \qquad [5.202]$$

$$s = \underline{0,1895 \quad m}$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,180472}{3,16 \cdot \sqrt{0,0301605 \cdot 0,189507}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{560,2 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,301605 \qquad [5.203]$$

$$k_s \cdot r_s = \underline{9,119565 \quad 1/mMPa}$$

Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O^s_{H_2O} + (\chi - 1) \cdot (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VS\,\min}}{O_{SV\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,87734 + (1,000000025 - 1) \cdot (1,355 - 1) \cdot 2,966944105}{3,811038 + (1,354 - 1) \cdot 2,966944} \qquad [5.204]$$

$$r_{H_2O} = \underline{0,180472}$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

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

$$r_s = 0,180472 + 0,121133 \qquad [5.205]$$

$$r_s = \underline{0,301605}$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SV\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,588806 + 0,00006145}{3,811038 + (1,354 - 1) \cdot 2,966944} \qquad [5.206]$$

$$r_{RO_2} = \underline{0,121133}$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$p_s = r_s \cdot p$$

$$p_s = 0,301605 \cdot 0,1 \qquad [5.207]$$

$$p_s = \underline{0,0301605 \quad MPa}$$

Kde p - je tlak spalin, bere se $p = 0,1 \quad MPa$ [1]

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{\left(\overline{t_s} + 273,15\right)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,00273}{\sqrt[3]{\left(560,2 + 273,15\right)^2 \cdot 20^2}} \qquad [5.208]$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \underline{0,23851 \quad 1/mMPa}$$

Kde d_{pk} $[\mu m]$ - je střední průměr popílkových částic, volím 20 μm [1]

Koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{ú} + 1)}{2 \cdot G_s} = \frac{0,02 \cdot (0,7 + 1)}{2 \cdot 6,226519} = \underline{0,00273 \quad kg/kg} \qquad [5.209]$$

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{1,2\,stř} \cdot O_{VV\,\min}$$

$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,354 \cdot 2,96694 \qquad [5.210]$$

$$G_s = \underline{6,226519 \quad kg/kg}$$

Střední povrchová teplota nánosu na zevnějšku trubek

$$t_z = t_p^{KM} + \Delta t = 319,44 + 80 = \underline{399,44 \quad °C} \qquad [5.211]$$

Kde Δt $[°C]$ - zvýšení teploty pro mříž na výstupu $\Delta t = 80 \quad °C$ [1]

Součinitel zanesení

Po odborné konzultaci na základě zkušeností bereme $\varepsilon = 0,002$

Výhřevná plocha kotlové mříže

$$S_{KM} = \pi \cdot D \cdot v \cdot n_{celk}$$

$$S_{KM} = \pi \cdot 0,06 \cdot 4,19 \cdot 66 \qquad [5.212]$$

$$S_{KM} = \underline{52,1266 \quad m^2}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s}$$

$$k = \frac{47,95}{1 + 0,002 \cdot 47,95} \qquad [5.213]$$

$$k = \underline{43,76 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \xi \cdot \left(\alpha_{k_1} + \alpha_{sal}\right)$$
$$\alpha_s = 0,95 \cdot \left(36,08 + 14,4\right) \qquad [5.214]$$
$$\alpha_s = \underline{47,95 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde ξ $[-]$ - součinitel využití plochy přehříváku, bráno $\xi = 0,95$ [1]

Teplo předané kotlové mříži

$$Q_{KM}^{skut} = k \cdot \Delta t \cdot S_{KM}$$
$$Q_{KM}^{skut} = 43,76 \cdot 240,76 \cdot 52,1266 \qquad [5.215]$$
$$Q_{KM}^{skut} = \underline{549,133 \quad kW}$$

Logaritmický teplotní spád (protiproud)

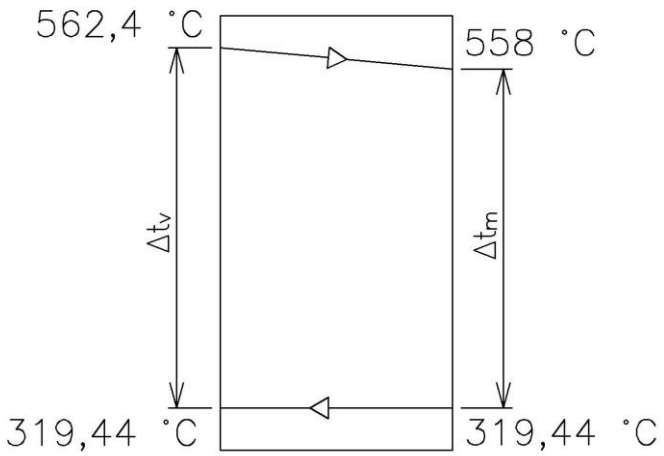
$$\Delta t_v = t_{KM-in}^{s} - t_{KM-out}^{m} = 562,4 - 319,44 = 242,96 \ °C \qquad [5.216]$$

$$\Delta t_m = t_{KM-out}^{s} - t_{KM-in}^{m} = 558 - 319,44 = 238,56 \ °C \qquad [5.217]$$

$$\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} = 1,02 \qquad [5.218]$$

$1,02 \leq 1,7 \quad \Rightarrow$ teplotní spád lze počítat jako střední aritmetický průměr

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v + \Delta t_m}{2} = \frac{242,96 - 238,56}{2} = \underline{240,76 \ °C} \qquad [5.219]$$



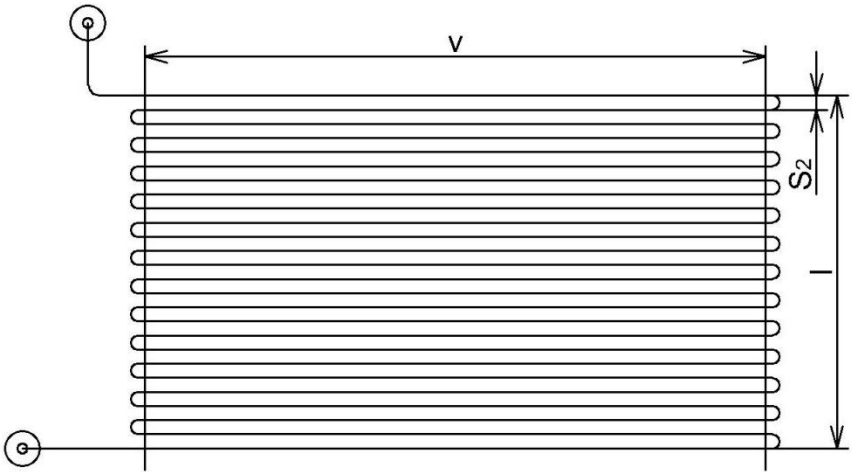
Obr. 5-17 Teplotní spád kotlové mříže

5.6 Přehřívák I (PI)

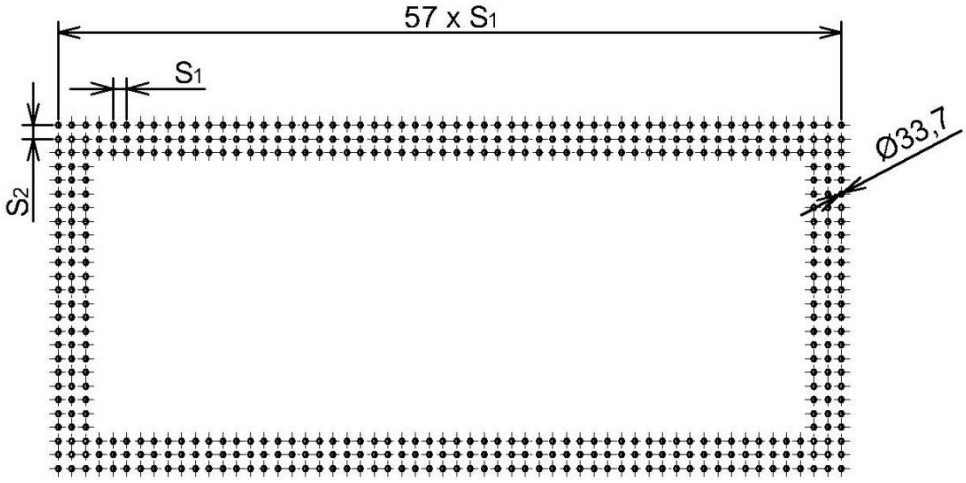
Průměr trubky	D	= 33,7	mm = 0,0337	m
Vnitřní průměr trubky	d	= 25,7	mm = 0,0257	m
Tloušťka stěny	tl	= 4	mm = 0,004	m
Rozteč (příčná)	s_1	= 80	mm = 0,08	m
Rozteč (podélná)	s_2	= 80	mm = 0,08	m
Počet trubek	n_{tr}	= 58		
Počet řad	$n_{řad}$	= 26		

Rozměry kanálu

Šířka	b	= 5375	mm = 5,375	m
Délka	l	= 2000	mm = 2	m
Střední výška	v	= 3700	mm = 3,7	m



Obr. 5-18 Přehřívák páry PI



Obr. 5-19 Uspořádání svazku trubek přehříváku páry PI

5.6.1 Proudění ze strany spalin (příčné)

Střední teplota spalin

$$\bar{t}_s = \frac{t^s_{PI-in} + t^s_{PI-out}}{2} = \frac{558 + 413,4}{2} = \underline{485,7 \ °C} \qquad [5.220]$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{V_s}{F_s} \cdot \frac{273,15 + \bar{t}_s}{273,15}$$

$$w_s = \frac{33,998415}{12,6555} \cdot \frac{273,15 + 485,7}{273,15} \qquad [5.221]$$

$$w_s = \underline{7,46 \quad m/s}$$

Střední hodnota přebytku vzduchu

$$\alpha_1 = 1,354$$

$$\alpha_2 = 1,364 \qquad [5.222]$$

$$\alpha_{1,2\,stř} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \frac{1,54 + 1,364}{2} = \underline{1,359}$$

Objemový průtok spalin pro střední hodnotu přebytku vzduchu

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sv\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}]$$

$$V_s = 6,95 \cdot [3,81104 + (1,359 - 1) \cdot 2,96694] \qquad [5.223]$$

$$V_s = \underline{33,998415 \quad Nm^3/kg}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_s = b \cdot v - D \cdot v \cdot n_{tr}$$

$$F_s = 5,375 \cdot 3,7 - 0,0337 \cdot 3,7 \cdot 58 \qquad [5.224]$$

$$F_s = \underline{12,6555 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro hladké trubky, uspořádání za sebou

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu}\right)^{0,65} \cdot \mathrm{Pr}^{0,33}$$

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,023235 \cdot \frac{0,0643702}{0,0337} \cdot \left(\frac{7,46 \cdot 0,0337}{0,0000708264}\right)^{0,65} \cdot 0,62286^{0,33} \qquad [5.225]$$

$$\alpha_{k_1} = \underline{67,91 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

Pro $n_{tr} \geq 10$ je $C_z = 1$ [1]

Korekční součinitel na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči trubek

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

$$C_s = \frac{1}{\left[1+(2\cdot 2,374-3)\cdot\left(1-\frac{2,374}{2}\right)^3\right]^2} \qquad [5.226]$$

$$C_s = \underline{1,023235}$$

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,08}{0,0337} = \underline{2,374} \qquad [5.227]$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,0337} = \underline{2,374} \qquad [5.228]$$

Hodnoty pro střední teplotu spalin získané interpolací

Kinematická viskozita	$\nu = 0,0000708264 \quad m^2/s$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,0643702 \quad W/mK$
Prandtlovo číslo	$\mathrm{Pr} = 0,62286$

5.6.2 Proudění ze strany páry (podélné)

Střední hodnota teploty páry

$$\overline{t_p} = \frac{t^m_{PI-in} + t^m_{PI-out}}{2} = \frac{319,44+360}{2} = \underline{339,72 \ °C} \qquad [5.229]$$

Střední hodnota tlaku páry

$$\overline{p_p} = \frac{p^m_{PI-in} + p^m_{PI-out}}{2} = \frac{11,2+10,8}{2} = \underline{11 \ MPa} \qquad [5.230]$$

Množství páry

$$M^{pIV}_{pp} = M_{pp} - M_{VSII} - M_{VSI}$$

$$M^{pIV}_{pp} = 24,44 - 1,9558 - 1,7863 = \underline{20,702 \quad kg/s} \qquad [5.231]$$

Hodnoty pro střední teplotu páry získané interpolací

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0{,}158581572 \quad W/mK$

Součinitel dynamické viskozity $\eta = 0{,}0000318653 \quad Pa \cdot s$

Měrná tepelná kapacita $c_p = 5{,}20450528 \quad kJ/kg \cdot K$

Prandtlovo číslo

$$\mathrm{Pr} = \frac{\eta \cdot c_p \cdot 10^3}{\lambda}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{0{,}0000318653 \cdot 5{,}20450528 \cdot 10^3}{0{,}158581572} \qquad [5.232]$$

$$\mathrm{Pr} = \underline{1{,}045790761}$$

Součinitel kinematické viskozity

$$\nu = \eta \cdot v''$$

$$\nu = 0{,}0000318653 \cdot 0{,}018 \qquad [5.233]$$

$$\nu = \underline{5{,}73575 \cdot 10^{-7} \quad m^2/s}$$

Kde v'' - měrný objem páry $v'' = f(\overline{t_p}, \overline{p_p}) = 0{,}018 \quad m^3/kg$ [2]

Rychlost páry

$$w_p = \frac{M_{pp}^{PI} \cdot v''}{F_p}$$

$$w_p = \frac{20{,}702 \cdot 0{,}018}{0{,}0301} \qquad [5.234]$$

$$w_p = \underline{12{,}39 \quad m/s}$$

Průtočný průřez pro páru

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr}$$

$$F_p = \frac{\pi \cdot 0{,}00257^2}{4} \cdot 58 \qquad [5.235]$$

$$F_p = 0{,}0301 \quad m^2$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_{k_2} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \mathrm{Pr}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_m$$

$$\alpha_{k_2} = 0,023 \cdot \frac{0,158581572}{0,0257} \cdot \left(\frac{12,39 \cdot 0,0257}{5,73575 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,045790761^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \qquad [5.236]$$

$$\alpha_{k_2} = \underline{5691,39 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde C_t $[-]$ - opravný koeficient, při ochlazování spalin $C_t = 1$ [1]

C_m $[-]$ - opravný koeficient, při dvoustranném ohřevu $C_m = 1$ [1]

Ekvivalentní průměr d_e

Ekvivalentní průměr je při proudění uvnitř trubek roven vnitřnímu průměru trubky $d_e = d = 0,0257 \quad m$ [1]

Součinitel přestupu tepla sáláním

Uvažujeme sálání tříatomových plynů a i sálání tuhých částic v úletu (popílku) [1]

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_s} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_s}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,167236 \cdot (485,7 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{357,62 + 273,15}{485,7 + 273,5} \right)^4}{1 - \frac{357,62 + 273,15}{485,7 + 273,15}} \qquad [5.237]$$

$$\alpha_{sal} = \underline{11,61 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde a_{st} $[-]$ - stupeň černosti povrchu stěn, uvažuje se $a_{st} = 0,8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,183005} \qquad [5.238]$$

$$a = \underline{0,167236}$$

Příslušná optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = \left(k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}\right) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = \left(9,51803 + 0,253088\right) \cdot 0,1 \cdot 0,1873 \qquad [5.239]$$

$$k \cdot p \cdot s = \underline{0,183005}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

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

$$s = 0,9 \cdot 0,0337 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,08}{0,0337^2} - 1\right) \qquad [5.240]$$

$$s = \underline{0,1873 \quad m}$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,179923}{3,16 \cdot \sqrt{0,0300687 \cdot 0,1873}} - 1,02\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{485,7 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,300687 \qquad [5.241]$$

$$k_s \cdot r_s = \underline{9,51803 \quad 1/mMPa}$$

Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O^s_{H_2O} + \left(\chi - 1\right) \cdot \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VS\,\min}}{O_{SV\,\min} + \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,87734 + \left(1,000000025 - 1\right) \cdot \left(1,359 - 1\right) \cdot 2,966944105}{3,811038 + \left(1,359 - 1\right) \cdot 2,966944} \qquad [5.242]$$

$$r_{H_2O} = \underline{0,179923}$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

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

$$r_s = 0,179923 + 0,120764 \qquad [5.243]$$

$$r_s = \underline{0,300687}$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SV\,\min} + \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,588806 + 0,00006145}{3,811038 + \left(1,359 - 1\right) \cdot 2,966944} \qquad [5.244]$$

$$r_{RO_2} = \underline{0,120764}$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$p_s = r_s \cdot p$$
$$p_s = 0,300687 \cdot 0,1 \qquad [5.245]$$
$$p_s = \underline{0,0300687 \quad MPa}$$

Kde p - je tlak spalin, bere se $p = 0,1 \quad MPa$ [1]

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{\left(\overline{t_s} + 273,15\right)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$
$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002722}{\sqrt[3]{\left(485,7 + 273,15\right)^2 \cdot 20^2}} \qquad [5.246]$$
$$k_p \cdot \mu_{pk} = \underline{0,253088 \quad 1/mMPa}$$

Kde $d_{pk} \quad [\mu m]$ - je střední průměr popílkových částic, volím 20 μm [1]

Koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{ú} + 1)}{2 \cdot G_s} = \frac{0,02 \cdot (0,7 + 1)}{2 \cdot 6,245893} = \underline{0,002722 \quad kg/kg} \qquad [5.247]$$

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{1,2\,stř} \cdot O_{VV\,\min}$$
$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,359 \cdot 2,96694 \qquad [5.248]$$
$$G_s = \underline{6,245893 \quad kg/kg}$$

Střední povrchová teplota nánosu na zevnějšku trubek

$$t_z = \overline{t_p} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_{k_2}}\right) \cdot \frac{Q_{pI}}{S_{TP}} \cdot 10^3$$
$$t_z = 339,72 + \left(0,002 + \frac{1}{5691,39}\right) \cdot \frac{4858,741}{590,7216} \cdot 10^3 \qquad [5.249]$$
$$t_z = \underline{357,62 \quad °C}$$

Součinitel zanesení

Po odborné konzultaci na základě zkušeností bereme $\varepsilon = 0,002$

Výhřevná plocha přehříváku

$$S_{TP} = \pi \cdot D \cdot v \cdot n_{celk}$$
$$S_{TP} = \pi \cdot 0,0337 \cdot 3,7 \cdot 1508 \qquad [5.250]$$
$$S_{TP} = \underline{590,7216 \quad m^2}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_s}{1+\alpha_s \cdot \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_{k_2}}\right)}$$

$$k = \frac{67,59}{1+67,59 \cdot \left(0,002 + \frac{1}{5691,39}\right)} \qquad [5.251]$$

$$k = \underline{58,93 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \xi \cdot \left(\alpha_{k_1} + \alpha_{sal}\right)$$

$$\alpha_s = 0,85 \cdot \left(67,91 + 11,61\right) \qquad [5.252]$$

$$\alpha_s = \underline{67,59 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde ξ $[-]$ - součinitel využití plochy přehříváku, bráno $\xi = 0,85$ [1]

Teplo předané deskovému přehříváku PIV

$$Q_{PIV}^{skut} = k \cdot \Delta t \cdot S_{TP}$$

$$Q_{PIV}^{skut} = 58,93 \cdot 139,58 \cdot 590,7216 \qquad [5.253]$$

$$Q_{PIV}^{skut} = \underline{4858,57 \quad kW}$$

Logaritmický teplotní spád (protiproud)

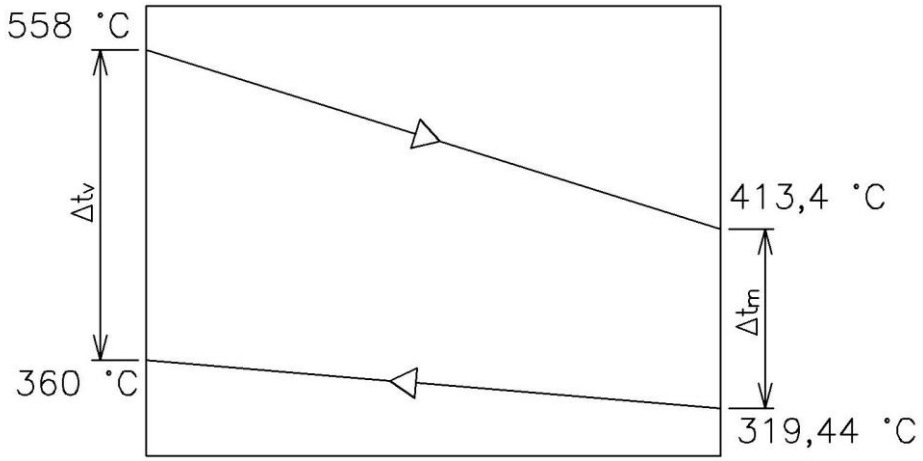
$$\Delta t_v = t_{PI-in}^{s} - t_{PI-out}^{m} = 558 - 360 = 198 \ °C \qquad [5.254]$$

$$\Delta t_m = t_{pI-out}^{s} - t_{pI-in}^{m} = 413,4 - 319,44 = 93,96 \ °C \qquad [5.255]$$

$$\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} = 2,11 \qquad [5.256]$$

$2,11 \leq 1,7$ *neplatí* $\Rightarrow$ teplotní spád nutno počítat jako logaritmický

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{198 - 93,96}{\ln \frac{198}{93,96}} = \underline{139,58 \ °C} \qquad [5.257]$$



Obr. 5-20 Teplotní spád přehříváku PI

Odchylka skutečného předaného tepla od navrhovaného pro přehřívák PIV

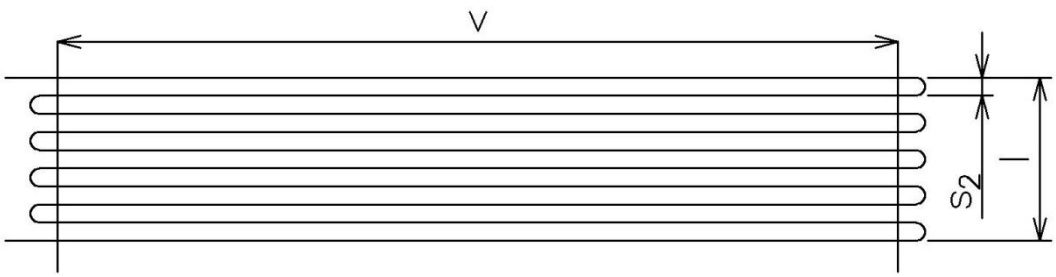
$$p = \frac{Q_{PI} - Q_{PI}^{skut}}{Q_{PI}} = \frac{4858,741 - 4858,57}{4858,741} \cdot 100 = \underline{0,0035\ \%} \qquad [5.258]$$

5.7 Ohřívák vody III (EKOIII)

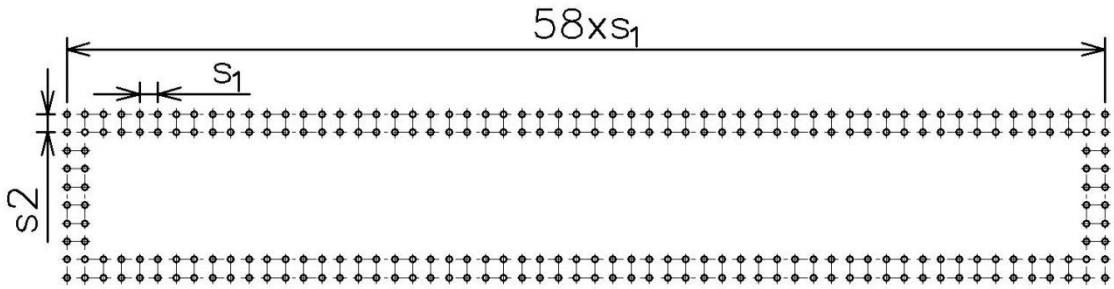
Průměr trubky	D	= 32	mm = 0,032	m
Vnitřní průměr trubky	d	= 24,8	mm = 0,0248	m
Tloušťka stěny	tl	= 3,6	mm = 0,0036	m
Rozteč (příčná)	s_1	= 80	mm = 0,08	m
Rozteč (podélná)	s_2	= 80	mm = 0,08	m
Počet trubek	n_{tr}	= 58		
Počet řad	$n_{řad}$	= 10		

Rozměry kanálu

Šířka	b	= 5375	mm = 5,375	m
Délka	l	= 720	mm = 0,72	m
Výška	v	= 3700	= 3,7	m



Obr. 5-21 Ohřívák vody EKOIII



Obr. 5-22 Uspořádání svazku trubek ohříváku vody EKOIII

5.7.1 Proudění ze strany spalin (příčné)

Střední teplota spalin

$$\bar{t}_s = \frac{t^s_{EKOIII-in} + t^s_{EKOIII-out}}{2} = \frac{413,4+354,5}{2} = \underline{383,95\ °C} \qquad [5.259]$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{V_s}{F_s} \cdot \frac{273,15+\bar{t}_s}{273,15}$$

$$w_s = \frac{34,205282}{13,0203} \cdot \frac{273,15+383,95}{273,15} \qquad [5.260]$$

$$w_s = \underline{6,32 \quad m/s}$$

Střední hodnota přebytku vzduchu

$$\alpha_1 = 1,364$$

$$\alpha_2 = 1,374 \qquad [5.261]$$

$$\alpha_{1,2\,str} = \frac{\alpha_1+\alpha_2}{2} = \frac{1,64+1,374}{2} = \underline{1,369}$$

Objemový průtok spalin pro střední hodnotu přebytku vzduchu

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sv\,\min} + (\alpha_{1,2\,str} - 1) \cdot O_{VV\,\min}]$$

$$V_s = 6,97 \cdot [3,81104 + (1,369-1) \cdot 2,96694] \qquad [5.262]$$

$$V_s = \underline{34,205282 \quad Nm^3/kg}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_s = b \cdot v - D \cdot v \cdot n_{tr}$$

$$F_s = 5,375 \cdot 3,7 - 0,032 \cdot 3,7 \cdot 58 \qquad [5.263]$$

$$F_s = \underline{13,0203 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro hladké trubky, uspořádání za sebou

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \mathrm{Pr}^{0,33}$$

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,065557 \cdot \frac{0,0556197}{0,032} \cdot \left(\frac{6,31 \cdot 0,032}{0,00005536} \right)^{0,65} \cdot 0,64321^{0,33} \qquad [5.264]$$

$$\alpha_{k_1} = \underline{66,25 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

Pro $n_{tr} \geq 10$ je $C_z = 1$ [1]

Korekční součinitel na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči trubek

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

$$C_s = \frac{1}{\left[1 + (2 \cdot 2,5 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,5}{2} \right)^3 \right]^2} \qquad [5.265]$$

$$C_s = \underline{1,065557}$$

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,08}{0,032} = \underline{2,5} \qquad [5.266]$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,032} = \underline{2,5} \qquad [5.267]$$

Hodnoty pro střední teplotu spalin získané interpolací

Kinematická viskozita	$\nu = 0,00005536 \quad m^2 / s$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,0556197 \quad W / mK$
Prandtlovo číslo	$\mathrm{Pr} = 0,64321$

5.7.2 Proudění ze strany vody (podélné)

Střední hodnota teploty vody

$$\overline{t_p} = \frac{t^m_{EKOIII-in} + t^m_{EKOIII-in}}{2} = \frac{204 + 229,44}{2} = \underline{216,72 \ °C} \qquad [5.268]$$

Střední hodnota tlaku vody

$$\overline{p_p} = \frac{p^m_{EKOIII-in} + p^m_{EKOIII-out}}{2} = \frac{11,39+11,2}{2} = \underline{11,295 \quad MPa} \qquad [5.269]$$

Množství vody

$$M^{EKOIII}_{pp} = M_{pp} - M_{VSII} - M_{VSI}$$
$$M^{EKOIII}_{pp} = 24,44 - 1,9558 - 1,7863 = \underline{20,702 \quad kg/s} \qquad [5.270]$$

Průřez pro vodu

$$F_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr}$$
$$F_p = \frac{\pi \cdot 0,00248^2}{4} \cdot 58$$
$$F_p = 0,028 \quad m^2$$

Rychlost vody

$$w_p = \frac{M^{EKOIII}_{pp} \cdot v''}{F_p}$$
$$w_p = \frac{20,702 \cdot 0,0017}{0,028}$$
$$w_p = \underline{1,26 \quad m/s}$$

Voda je natolik kompaktní a hutné médium, že přebere většinu tepla ze spalin a proto je jeho vliv na přestup tepla zanedbatelný a tudíž se dále ve výpočtu EKOIII součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění neuvažuje.

Součinitel přestupu tepla sáláním

Uvažujeme sálání tříatomových plynů a i sálání tuhých částic v úletu (popílku) [1]

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st}+1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{T_z}{T_s}\right)^4}{1-\frac{T_z}{T_s}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8+1}{2} \cdot 0,180072 \cdot (383,95+273,15)^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{276,72+273,15}{383,95+273,5}\right)^4}{1-\frac{276,72+273,15}{383,95+273,15}} \qquad [5.271]$$

$$\alpha_{sal} = \underline{8,19 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde a_{st} $[-]$ - stupeň černosti povrchu stěn, uvažuje se $a_{st} = 0,8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$
$$a = 1 - e^{-0,198539} \qquad [5.272]$$
$$a = \underline{0,180072}$$

Příslušná optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = \left(k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}\right) \cdot p \cdot s$$
$$k \cdot p \cdot s = \left(9,631119 + 0,276866\right) \cdot 0,1 \cdot 0,200383 \qquad [5.273]$$
$$k \cdot p \cdot s = \underline{0,198539}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1\right)$$
$$s = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,08}{0,032^2} - 1\right) \qquad [5.274]$$
$$s = \underline{0,200383 \quad m}$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{\overline{t_s} + 273,15}{1000}\right) \cdot r_s$$
$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,178835}{3,16 \cdot \sqrt{0,029887 \cdot 0,200383}} - 1,02\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{383,95 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,298869 \qquad [5.275]$$
$$k_s \cdot r_s = \underline{9,631119 \quad 1/mMPa}$$

Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O^s_{H_2O} + \left(\chi - 1\right) \cdot \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VS\,\min}}{O_{SV\,\min} + \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VV\,\min}}$$
$$r_{H_2O} = \frac{0,87734 + \left(1,000000025 - 1\right) \cdot \left(1,369 - 1\right) \cdot 2,966944105}{3,811038 + \left(1,369 - 1\right) \cdot 2,966944} \qquad [5.276]$$
$$r_{H_2O} = \underline{0,178835}$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2}$$
$$r_s = 0,178835 + 0,120034 \qquad [5.277]$$
$$r_s = \underline{0,298869}$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SV\,\min} + \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,588806 + 0,00006145}{3,811038 + (1,369 - 1) \cdot 2,966944} \qquad [5.278]$$

$$r_{RO_2} = \underline{0,120034}$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$p_s = r_s \cdot p$$

$$p_s = 0,298869 \cdot 0,1 \qquad [5.279]$$

$$p_s = \underline{0,0298869 \quad MPa}$$

Kde p - je tlak spalin, bere se $p = 0,1 \quad MPa$ [1]

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{\left(\overline{t_s} + 273,15\right)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002705}{\sqrt[3]{(383,95 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \qquad [5.280]$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \underline{0,276866 \quad 1/mMPa}$$

Kde $d_{pk} \quad [\mu m]$ - je střední průměr popílkových částic, volím 20 μm [1]

Koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{ú} + 1)}{2 \cdot G_s} = \frac{0,02 \cdot (0,7 + 1)}{2 \cdot 6,284641} = \underline{0,002705 \quad kg/kg} \qquad [5.281]$$

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{1,2\,stř} \cdot O_{VV\,\min}$$

$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,369 \cdot 2,96694 \qquad [5.282]$$

$$G_s = \underline{6,284641 \quad kg/kg}$$

Střední povrchová teplota nánosu na zevnějšku trubek

$$t_z = \overline{t_p} + \Delta t$$

$$t_z = 216,72 + 60 \qquad [5.283]$$

$$t_z = \underline{276,72 \quad °C}$$

Kde $\Delta t \quad [°C]$ - zvýšení teploty pro mříž na výstupu $\Delta t = 60 \quad °C$ [1]

Součinitel zanesení

Po odborné konzultaci na základě zkušeností bereme $\varepsilon = 0,001$

Výhřevná plocha ekonomizéru

$$S_{TP} = \pi \cdot D \cdot v \cdot n_{tr} \cdot n_{řad}$$
$$S_{TP} = \pi \cdot 0,032 \cdot 3,7 \cdot 58 \cdot 10 \qquad [5.284]$$
$$S_{TP} = \underline{215,739 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \xi \cdot \left(\alpha_{k_1} + \alpha_{sal}\right)$$
$$\alpha_s = 0,95 \cdot \left(66,25 + 8,19\right) \qquad [5.285]$$
$$\alpha_s = \underline{70,71 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_s}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_s}$$
$$k = \frac{70,71}{1 + 0,001 \cdot 70,71} \qquad [5.286]$$
$$k = \underline{66,04 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde ξ $[-]$ - součinitel využití plochy ekonomizéru,
po odborné konzultaci bráno $\xi = 0,95$

Teplo předané ohříváku vody EKOIII

$$Q_{EKOIII}^{skut} = k \cdot \Delta t \cdot S_{TP}$$
$$Q_{EKOIII}^{skut} = 66,04 \cdot 167,23 \cdot 215,7395 \qquad [5.287]$$
$$Q_{EKOIII}^{skut} = \underline{2382,633 \quad kW}$$

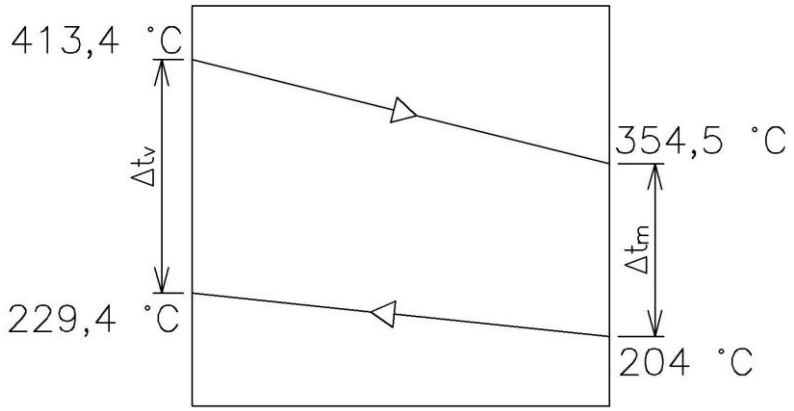
Logaritmický teplotní spád (protiproud)

$$\Delta t_v = t_{EKOIII-out}^{s} - t_{EKOIII-in}^{m} = 413,4 - 229,44 = 183,96 \ °C \qquad [5.288]$$
$$\Delta t_m = t_{EKOIII-in}^{s} - t_{EKOIII-out}^{m} = 354,5 - 204 = 150,5 \ °C \qquad [5.289]$$

$$\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} = 1,2 \qquad [5.290]$$

$1,2 \leq 1,7 \quad \Rightarrow$ teplotní spád možno počítat jako střední aritmetický součet

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v + \Delta t_m}{2} = \frac{183,96 + 150,5}{2} = \underline{167,23 \ °C} \qquad [5.291]$$



Obr. 5-23 Teplotní spád ohříváku vody EKOIII

Odchylka skutečného předaného tepla od navrhovaného pro ekonomizér EKOIII

$$p = \frac{Q_{EKOIII} - Q_{EKOIII}^{skut}}{Q_{EKOIII}} = \frac{2383,205 - 2382,6326}{2383,205} \cdot 100 = \underline{0,024\,\%} \qquad [5.292]$$

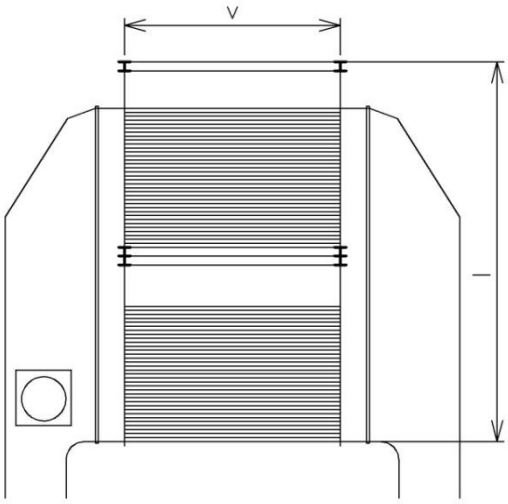
5.8 Ohřívák vzduchu IV (OVZIV)

Řešen jako dva paralelně řazené bloky s hladkými trubkami řazenými za sebou.

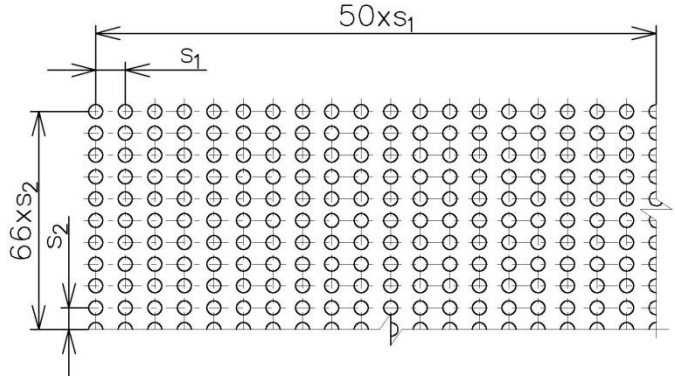
Průměr trubky	D	= 44,5	mm = 0,0445	m
Vnitřní průměr trubky	d	= 39,5	mm = 0,0395	m
Tloušťka stěny	tl	= 2,5	mm = 0,0025	m
Rozteč (příčná)	s_1	= 92	mm = 0,092	m
Rozteč (podélná)	s_2	= 68	mm = 0,068	m
Počet trubek	n_{tr}	= 51		
Počet řad	$n_{řad}$	= 68		

Rozměry kanálu

Šířka	b	= 5375	mm = 5,375	m
Délka	l	= 6428	mm = 6,428	m
Střední výška	v	= 3700	= 3,7	m



Obr. 5-24 Ohřívák vzduchu OVZIII



Obr. 5-25 Uspořádání svazku trubek ohříváku vzduchu OVZIII

5.8.1 Proudění ze strany spalin (příčné)

Střední teplota spalin

$$\overline{t_s} = \frac{t^s_{OVZIV-in} + t^s_{OVZIV-out}}{2} = \frac{354,5+324,8}{2} = \underline{339,65\ °C} \qquad [5.293]$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{V_s}{F_s} \cdot \frac{273,15+\overline{t_s}}{273,15}$$

$$w_s = \frac{34,412148}{11,4904} \cdot \frac{273,15+339,65}{273,15} \qquad [5.294]$$

$$w_s = \underline{6,72 \quad m/s}$$

Střední hodnota přebytku vzduchu

$$\alpha_1 = 1,374$$

$$\alpha_2 = 1,384 \qquad [5.295]$$

$$\alpha_{1,2\,stř} = \frac{\alpha_1+\alpha_2}{2} = \frac{1,374+1,384}{2} = \underline{1,379}$$

Objemový průtok spalin pro střední hodnotu přebytku vzduchu

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sv\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}]$$

$$V_s = 6,97 \cdot [3,81104 + (1,379-1) \cdot 2,96694] \qquad [5.296]$$

$$V_s = \underline{34,412148 \quad Nm^3/kg}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_s = b \cdot v - D \cdot v \cdot n_{tr}$$

$$F_s = 5,375 \cdot 3,7 - 0,0445 \cdot 3,7 \cdot 51 \qquad [5.297]$$

$$F_s = \underline{11,4904 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro hladké trubky, uspořádání za sebou

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu}\right)^{0,65} \cdot \mathrm{Pr}^{0,33}$$

$$\alpha_{k_1} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,970838 \cdot \frac{0,0518099}{0,0445} \cdot \left(\frac{6,72 \cdot 0,0445}{0,0000494114}\right)^{0,65} \cdot 0,646035^{0,33} \qquad [5.298]$$

$$\alpha_{k_1} = \underline{56,21 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

Pro $n_{tr} \geq 10$ je $C_z = 1$ [1]

Korekční součinitel na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči trubek

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

$$C_s = \frac{1}{\left[1+\left(2\cdot 2,0674-3\right)\cdot\left(1-\frac{1,5281}{2}\right)^3\right]^2} \qquad [5.299]$$

$$C_s = \underline{0,970838}$$

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,092}{0,0445} = \underline{2,0674} \qquad [5.300]$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,068}{0,0445} = \underline{1,5281} \qquad [5.301]$$

Hodnoty pro střední teplotu spalin získané interpolací

Kinematická viskozita	$\nu = 0,0000494114 \quad m^2/s$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,0518099 \quad W/mK$
Prandtlovo číslo	$\mathrm{Pr} = 0,646035$

5.8.2 Proudění ze strany vzduchu (podélné)

Střední hodnota teploty vzduchu

$$\bar{t}_v = \frac{t^m_{OVZIV-in} + t^m_{OVZIV-out}}{2} = \frac{170+348,4338,2}{2} = \underline{254,1\ °C} \qquad [5.302]$$

Hodnoty pro střední teplotu vzduchu získané interpolací

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,0421378 \quad W/mK$
Kinematická viskozita	$\nu = 0,0000420494 \quad m^2/s$
Prandtlovo číslo	$\mathrm{Pr} = 0,69541$

Rychlost vzduchu

$$w_v = \frac{V_v}{F_v} \cdot \frac{273{,}15 + \overline{t_V}}{273{,}15}$$

$$w_v = \frac{26{,}354729}{4{,}2497} \cdot \frac{273{,}15 + 254{,}1}{273{,}15} \qquad [5.303]$$

$$w_v = \underline{11{,}97 \quad m/s}$$

Objemový průtok spalin

$$V_V = M_{pv} \cdot \beta \cdot O_{VV\,\min}$$

$$V_V = 6{,}97 \cdot 1{,}274 \cdot 2{,}966944 \qquad [5.304]$$

$$V_V = \underline{26{,}354729 \quad Nm^3/kg}$$

Průřez pro vzduch

$$F_V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{řad}$$

$$F_V = \frac{\pi \cdot 0{,}0395^2}{4} \cdot 51 \cdot 68 \qquad [5.305]$$

$$F_V = \underline{4{,}2497 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_V = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_V \cdot d_e}{\nu}\right)^{0{,}8} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}4} \cdot C_t \cdot C_m$$

$$\alpha_V = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}0421378}{0{,}0395} \cdot \left(\frac{11{,}97 \cdot 0{,}0395}{0{,}0000420494}\right)^{0{,}8} \cdot 0{,}69541^{0{,}4} \cdot 0{,}962067 \cdot 1 \qquad [5.306]$$

$$\alpha_V = \underline{35{,}54 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde C_m $[-]$ - opravný koeficient, při dvoustranném ohřevu $C_m = 1$ [1]

Ekvivalentní průměr d_e

Ekvivalentní průměr je při proudění uvnitř trubek roven vnitřnímu průměru trubky $d_e = d = 0{,}0395 \quad m$ [1]

Opravný koeficient

$$C_t = \left(\frac{\overline{T_{vz}}}{T_{st}}\right)^{0,5}$$

$$C_t = \left(\frac{254,1+273,15}{570,03}\right)^{0,5} \qquad [5.307]$$

$$C_t = \underline{0,962067}$$

Kde T_{st} $[K]$ - teplota stěny

$\overline{T_{vz}}$ $[K]$ - teplota vzduchu

Teplota stěny

$$T_{st} = \frac{\overline{t_{vz}} + \overline{t_s}}{2} + 273,15$$

$$T_{st} = \frac{254,1+339,65}{2} + 273,15 \qquad [5.308]$$

$$T_{st} = \underline{570,03 \ K}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

Uvažujeme sálání tříatomových plynů a i sálání tuhých částic v úletu (popílku) [1]

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st}+1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{T_{st}}{T_s}\right)^4}{1-\frac{T_{st}}{T_s}}$$

$$\alpha_{sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8+1}{2} \cdot 0,145164 \cdot (339,65+273,15)^3 \cdot \frac{1-\left(\frac{570,03}{339,65+273,5}\right)^4}{1-\frac{570,03}{339,65+273,15}} \qquad [5.309]$$

$$\alpha_{sal} = \underline{6,17 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde a_{st} $[-]$ - stupeň černosti povrchu stěn, uvažuje se $a_{st} = 0,8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0,156846} \qquad [5.310]$$

$$a = \underline{0,145164}$$

Příslušná optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = \left(k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}\right) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = \left(12,669111 + 0,288276\right) \cdot 0,1 \cdot 0,121048 \qquad [5.311]$$

$$k \cdot p \cdot s = \underline{0,156846}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

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

$$s = 0,9 \cdot 0,0445 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,092 \cdot 0,068}{0,0445^2} - 1\right) \qquad [5.312]$$

$$s = \underline{0,12105 \quad m}$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,17776}{3,16 \cdot \sqrt{0,0297072 \cdot 0,12105}} - 1,02\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{339,65 + 273,15}{1000}\right) \cdot 0,297072 \qquad [5.313]$$

$$k_s \cdot r_s = \underline{12,669111 \quad 1/mMPa}$$

Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O^s_{H_2O} + \left(\chi - 1\right) \cdot \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VS\,\min}}{O_{SV\,\min} + \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,87734 + \left(1,000000025 - 1\right) \cdot \left(1,379 - 1\right) \cdot 2,966944105}{3,811038 + \left(1,379 - 1\right) \cdot 2,966944} \qquad [5.314]$$

$$r_{H_2O} = \underline{0,17776}$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

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

$$r_s = 0,17776 + 0,119312 \qquad [5.315]$$

$$r_s = \underline{0,297072}$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SV\,\min} + \left(\alpha_{1,2\,stř} - 1\right) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,588806 + 0,00006145}{3,811038 + \left(1,379 - 1\right) \cdot 2,966944} \qquad [5.316]$$

$$r_{RO_2} = \underline{0,119312}$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$p_s = r_s \cdot p$$
$$p_s = 0,297072 \cdot 0,1 \qquad [5.317]$$
$$p_s = \underline{0,0297072 \quad MPa}$$

Kde p - je tlak spalin, bere se $p = 0,1 \quad MPa$ [1]

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{\left(\overline{t_s} + 273,15\right)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$
$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002688}{\sqrt[3]{\left(339,65 + 273,15\right)^2 \cdot 20^2}} \qquad [5.318]$$
$$k_p \cdot \mu_{pk} = \underline{0,288276 \quad 1/mMPa}$$

Kde d_{pk} $[\mu m]$ - je střední průměr popílkových částic, volím 20 μm [1]
μ_{pk} $[kg/kg]$ - koncentrace popílku ve spalinách

Koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_ú + 1)}{2 \cdot G_s} = \frac{0,02 \cdot (0,7 + 1)}{2 \cdot 6,323389} = \underline{0,002688 \quad kg/kg} \qquad [5.319]$$

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{1,2\,stř} \cdot O_{VV\,\min}$$
$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,379 \cdot 2,96694 \qquad [5.320]$$
$$G_s = \underline{6,323389 \quad kg/kg}$$

Výhřevná plocha ohříváku vzduchu

$$S_{TP} = \pi \cdot D \cdot v \cdot n_{tr} \cdot n_{řad}$$
$$S_{TP} = \pi \cdot 0,0445 \cdot 3,7 \cdot 51 \cdot 68 \qquad [5.321]$$
$$S_{TP} = \underline{1793,8689 \quad m^2}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_s \cdot \alpha_v}{\alpha_s + \alpha_v}$$
$$k = 0,65 \cdot \frac{40,55 \cdot 35,54}{40,55 + 35,54} \qquad [5.322]$$
$$k = \underline{12,31 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \xi \cdot \left(\alpha_{k_1} + \alpha_{sal}\right)$$

$$\alpha_s = 0,65 \cdot \left(56,21 + 6,17\right) \qquad [5.323]$$

$$\alpha_s = \underline{40,55 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde ξ $[-]$ - součinitel využití plochy, bráno $\xi = 0,65$ [1]

Teplo předané ohříváku vzduchu OVZIV

$$Q_{OVZIV}^{skut} = k \cdot \Delta t \cdot S_{TP}$$

$$Q_{OVZIV}^{skut} = 12,31 \cdot 61,53 \cdot 1793,869 \qquad [5.324]$$

$$Q_{OVZIV}^{skut} = \underline{1358,677 \quad kW}$$

Logaritmický teplotní spád (protiproud)

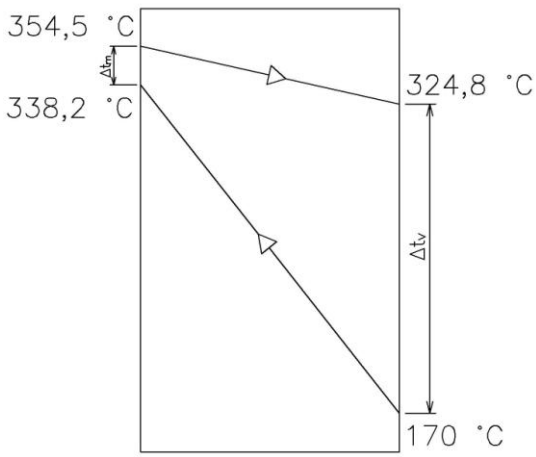
$$\Delta t_m = t_{OVZIV-in}^{s} - t_{OVZIV-out}^{m} = 354,5 - 338,2 = 16,3 \ °C \qquad [5.325]$$

$$\Delta t_v = t_{OVZIV-out}^{s} - t_{OVZIV-in}^{m} = 324,8 - 170 = 154,8 \ °C \qquad [5.326]$$

$$\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} = 9,5 \qquad [5.327]$$

$9,5 \leq 1,7$ *neplatí* $\Rightarrow$ teplotní spád nutno počítat jako logaritmický

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{154,8 - 16,3}{\ln \frac{154,8}{16,3}} = \underline{61,53 \ °C} \qquad [5.328]$$



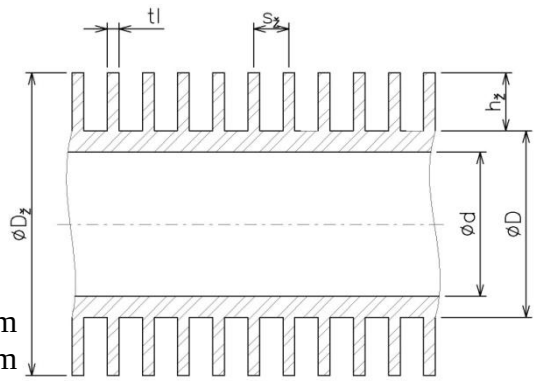
Obr. 5-26 Teplotní spád pro ohřívák vzduchu OVZIV

Odchylka předaného tepla od navrhovaného pro ohřívák vzduchu OVZIII

$$p = \frac{Q_{OVZIII} - Q_{OVZIII}^{skut}}{Q_{OVZIII}} = \frac{1356,165 - 1358,677}{1356,165} \cdot 100 = \underline{-0,18 \ \%} \qquad [5.329]$$

5.9 Ohřívák vody II,I (EKO-II,I)

Průměr trubky	D	= 32	mm	= 0,032	m
Vnitřní průměr trubky	d	= 24,8	mm	= 0,0248	m
Tloušťka stěny	tl	= 3,6	mm	= 0,0036	m
Rozteč (příčná)	s_1	= 82	mm	= 0,082	m
Rozteč (podélná)	s_2	= 80	mm	= 0,08	m
Počet trubek	n_{tr}	= 44			
Počet řad	$n_{řad}$	= 32			



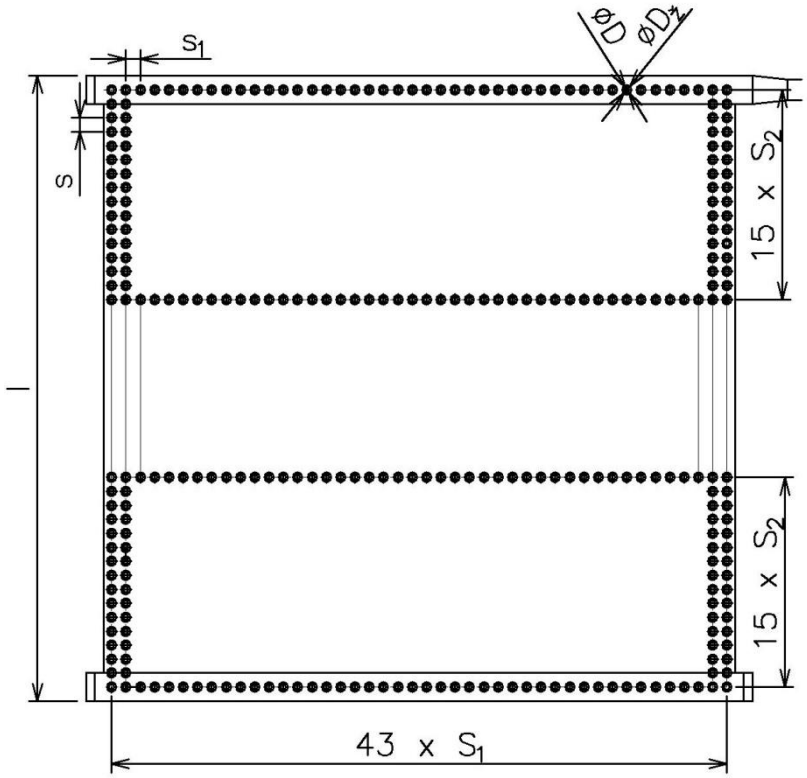
Obr. 5-27 Řez žebrovanou trubkou

Parametry žeber

Výška žeber	$h_ž$	= 10	mm	= 0,01	m
Tloušťka žeber	$tl_ž$	= 0,8	mm	= 0,0008	m
Vzdálenost mezi žebry	$s_ž$	= 6,394	mm	= 0,006394	m
Počet žeber na 1 metr	$n_ž$	= 140			

Rozměry kanálu

Šířka	b	= 5375	mm	= 5,375	m
Délka	l	= 3420	mm	= 3,420	m
Výška	v	= 3700	mm	= 3,7	m



Obr. 5-28 Uspořádání svazku trubek ohříváku vody EKO-II,I

5.9.1 Proudění ze strany spalin (příčné)

Střední teplota spalin

$$\bar{t}_s = \frac{t^s_{EKO-II,I-in} + t^s_{EKO-II,I-out}}{2} = \frac{324,8+234,4}{2} = \underline{279,6\ °C} \qquad [5.330]$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{V_s}{F_s} \cdot \frac{273,15+\bar{t}_s}{273,15}$$

$$w_s = \frac{34,619014}{7,4995} \cdot \frac{273,15+279,6}{273,15} \qquad [5.331]$$

$$w_s = \underline{9,34 \quad m/s}$$

Střední hodnota přebytku vzduchu

$$\alpha_1 = 1,384$$

$$\alpha_2 = 1,394 \qquad [5.332]$$

$$\alpha_{1,2\,str} = \frac{\alpha_1+\alpha_2}{2} = \frac{1,384+1,394}{2} = \underline{1,389}$$

Objemový průtok spalin pro střední hodnotu přebytku vzduchu

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sv\,\min} + (\alpha_{1,2\,str} - 1) \cdot O_{VV\,\min}]$$

$$V_s = 6,97 \cdot [3,81104 + (1,389-1) \cdot 2,96694] \qquad [5.333]$$

$$V_s = \underline{34,619014 \quad Nm^3/kg}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_s = b \cdot v - D \cdot v \cdot n_{tr} - 2 \cdot h_{ž} \cdot tl_{ž} \cdot n_{ž} \cdot n_{tr} \cdot v$$

$$F_s = 3,526 \cdot 3,7 - 0,032 \cdot 3,7 \cdot 44 - 2 \cdot 10 \cdot 0,0008 \cdot 140 \cdot 44 \cdot 3,7 \qquad [5.334]$$

$$F_s = \underline{7,4995 \quad m^2}$$

Redukovaný součinitel přestupu tepla ze strany spalin

$$\alpha_{Sr} = \left[\frac{S_{ž}}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S}\right] \cdot \frac{\psi_{ž} \cdot \alpha_k}{1+\varepsilon \cdot \psi_{ž} \cdot \alpha_k}$$

$$\alpha_{Sr} = [0,8243 \cdot 0,93 \cdot 1 + 0,1757] \cdot \frac{0,85 \cdot 56,84}{1+0,00018 \cdot 0,85 \cdot 56,84} \qquad [5.335]$$

$$\alpha_{Sr} = \underline{45,13 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Podíl výhřevných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalin

$$\frac{S_ž}{S}=\frac{\left(\frac{D_ž}{D}\right)^2-1}{\left(\frac{D_ž}{D}\right)^2-1+2\cdot\left(\frac{s_ž}{D}-\frac{tl_ž}{D}\right)}$$

$$\frac{S_ž}{S}=\frac{\left(\frac{0,052}{0,032}\right)^2-1}{\left(\frac{0,052}{0,032}\right)^2-1+2\cdot\left(\frac{0,006394}{0,032}-\frac{0,0008}{0,032}\right)} \qquad [5.336]$$

$$\frac{S_ž}{S}=\underline{0,8243}$$

Vzdálenost mezi žebry

$$s_ž=\frac{1}{139}-tl_ž=\frac{1}{139}-0,0008=\underline{0,006394\quad m} \qquad [5.337]$$

Podíl volných částí trubky (kde nejsou žebra a celkové plochy

$$\frac{S_h}{S}=1-\frac{S_ž}{S}=1-0,8243=\underline{0,1757} \qquad [5.338]$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí (uspořádání za sebou s kruhovými žebry)

$$\alpha_{k_1}=0,105\cdot C_z\cdot C_s\cdot\frac{\lambda}{s_ž}\cdot\left(\frac{D}{s_ž}\right)^{-0,54}\cdot\left(\frac{h_ž}{s_ž}\right)^{-0,14}\cdot\left(\frac{w_s\cdot s_ž}{\nu}\right)^{0,72}$$

$$\alpha_{k_1}=0,105\cdot1\cdot1\cdot\frac{0,0467068}{0,006394}\cdot\left(\frac{0,032}{0,006394}\right)^{-0,54}\cdot\left(\frac{0,01}{0,006394}\right)^{-0,14}\cdot\left(\frac{9,94\cdot0,006394}{0,0000413908}\right)^{0,72} \qquad [5.339]$$

$$\alpha_{k_1}=\underline{56,84\quad W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}}$$

Opravný koeficient na počet příčných řad

Pro počet příčných řad $z\geq4$ je $C_z=1$

Opravný koeficient na uspořádání trubek

$$\sigma_2=\frac{s_2}{D}=\frac{0,08}{0,032}=\underline{2,5} \qquad [5.340]$$

Pro $\sigma_2>2$ je $C_s=1$

Hodnoty pro střední teplotu spalin získané interpolací

Kinematická viskozita	$\nu = 0,0000413908 \quad m^2/s$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,0467068 \quad W/mK$
Prandtlovo číslo	$\mathrm{Pr} = 0,65408$

Součinitel β

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_{ž} \cdot \alpha_{k_1}}{tl_{ž} \cdot \lambda_{ž} \cdot \left(1 + \varepsilon \cdot \psi_{ž} \cdot \alpha_{k_1}\right)}}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 56,84}{0,0008 \cdot 40 \cdot \left(1 + 0,00018 \cdot 0,85 \cdot 56,84\right)}} \qquad [5.341]$$

$$\beta = \underline{54,71}$$

Kde $\psi_{ž}$ - koeficient nerovnoměrnosti povrchu žebra, pro kruhová žebra $\psi_{ž} = 0,85$ [1]

$\lambda_{ž}$ - součinitel tepelné vodivosti žeber, $\lambda_{ž} = 40 \quad W/mK$ [1]

Součinitel efektivnosti žebra

$$\beta \cdot h_{ž} = 54,71 \cdot 0,01 = \underline{0,5471} \qquad [5.342]$$

$$\frac{D_{ž}}{D} = \frac{0,052}{0,032} = \underline{1,625} \qquad [5.343]$$

$$E = \underline{0,93} \qquad [1]$$

5.9.2 Proudění ze strany vody (podélné)

Střední teplota vody

$$\overline{t_v} = \frac{t^m_{EKO-II,I-in} + t^m_{EKO-II,I-out}}{2} = \frac{154 + 204}{2} = \underline{179 \ °C} \qquad [5.344]$$

Střední tlak vody

$$\overline{p_v} = \frac{p^m_{EKO-II,I-in} + p^m_{EKO-II,I-out}}{2} = \frac{11,55 + 11,39}{2} = \underline{11,47 \quad MPa} \qquad [5.345]$$

Množství vody

$$M_{pp}^{EKOII-I} = M_{pp} - M_{VSII} - M_{VSI}$$

$$M_{pp}^{EKOII-I} = 24,444 - 1,9558 - 1,7863 \qquad [5.346]$$

$$M_{pp}^{EKOII-I} = \underline{20,7019 \quad kg/s}$$

Rychlost vody

$$w_v = \frac{M_{pp}^{EKO-II,I} \cdot v''}{F_v}$$

$$w_v = \frac{20,7019 \cdot 0,00111}{0,0213} \qquad [5.347]$$

$$w_v = \underline{1,08 \quad m/s}$$

Kde v'' - měrný objem páry $v'' = f\left(\overline{p_v}, \overline{t_v}\right) = 0,00114 \quad m^3/kg$ [2]

Světlý průřez pro vodu

$$F_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr}$$

$$F_v = \frac{\pi \cdot 0,0248^2}{4} \cdot 44 \qquad [5.348]$$

$$F_v = \underline{0,0213 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_{Vr} = C_t \cdot \alpha_N = 1,12 \cdot 8,9 \cdot 10^3 = \underline{9968 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}} \qquad [5.349]$$

$C_t = 1,12$ [1]

$\alpha_N = \underline{8,9 \cdot 10^3 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$ [3]

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sr}} + \frac{1}{\alpha_{Vr}} \cdot \frac{S_S}{S_V}}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{45,13} + \frac{1}{9968} \cdot \frac{1018,6473}{405,8877}} \qquad [5.350]$$

$$k = \underline{44,62 \quad W \cdot m^2 \cdot K^{-1}}$$

Plocha jednoho žebra

$$S_{1ž} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_ž - D}{2}\right)^2 + \pi \cdot D_ž \cdot tl_ž$$

$$S_{1ž} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,052 - 0,032}{2}\right)^2 + \pi \cdot 0,052 \cdot 0,0008 \qquad [5.351]$$

$$S_{1ž} = \underline{0,000759 \quad m^2}$$

Celková vnější plocha trubek i se žebry

$$S_S = (S_{1ž} \cdot 140 \cdot v + \pi \cdot D \cdot v - \pi \cdot D \cdot tl_ž \cdot 140 \cdot v) \cdot n_{tr} \cdot n_{řad}$$

$$S_S = (0,000759 \cdot 140 \cdot 3,7 + \pi \cdot 0,032 \cdot 3,7 - \pi \cdot 0,032 \cdot 0,0008 \cdot 140 \cdot 3,7) \cdot 44 \cdot 32 \qquad [5.352]$$

$$S_S = \underline{1018,6473 \quad m^2}$$

Celková vnitřní plocha trubek

$$S_V = \pi \cdot d \cdot v \cdot n_{tr} \cdot n_{řad}$$

$$S_V = \pi \cdot 0,0248 \cdot 3,7 \cdot 44 \cdot 32 \qquad [5.353]$$

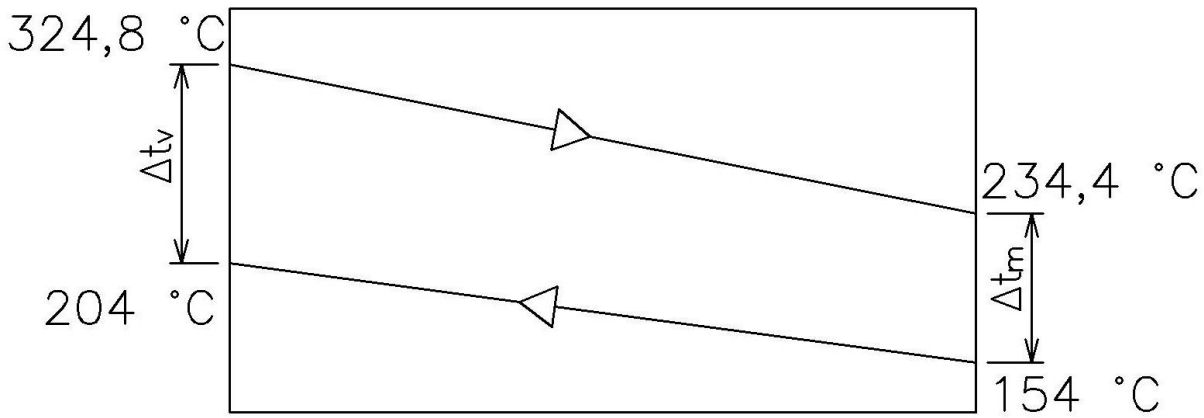
$$S_V = \underline{405,8877 \quad m^2}$$

Logaritmický teplotní spád (protiproud)

$$\Delta t_v = t^s_{EKO-II,I-in} - t^m_{EKO-II,I-out} = 324,8 - 204 = 120,8 \ °C \qquad [5.354]$$

$$\Delta t_m = t^s_{EKO-II,I-out} - t^m_{EKO-II,I-in} = 234,4 - 154 = 80,4 \ °C \qquad [5.355]$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{120,8 - 80,4}{\ln \frac{120,8}{80,4}} = \underline{99,23 \ °C} \qquad [5.356]$$



Obr. 5-29 Teplotní spád pro ohřívák vody EKO-II,I

Odchylka skutečného předaného tepla od navrhovaného pro přehřívák PIV

$$p = \frac{Q_{EKO-III,II,I} - Q^{skut}_{EKO-III,II,I}}{Q_{EKO-III,II,I}} = \frac{4513,847 - 4510,668}{4513,847} \cdot 100 = 0,0704\,\% \qquad [5.357]$$

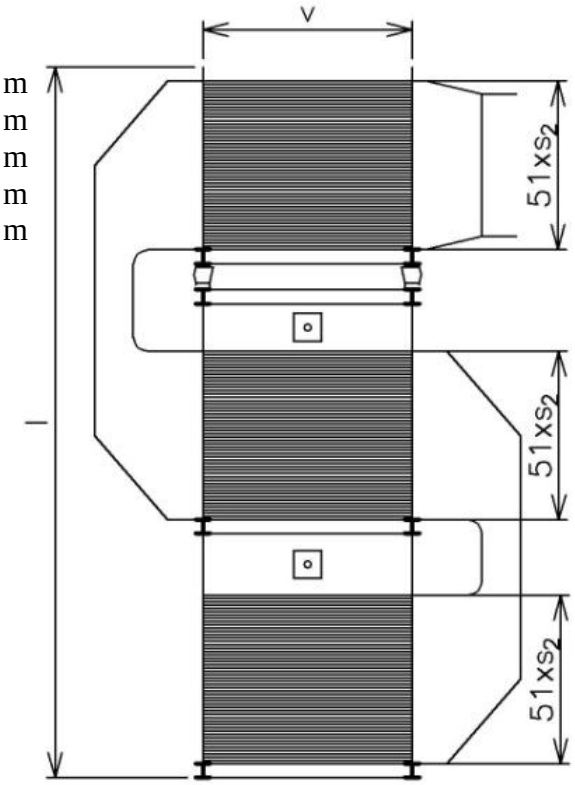
5.10 Ohřívák vzduchu III,II,I (OVZ-III,II,I)

Tvořen třemi za sebou řazenými balíky hladkým trubek uspořádaných vystřídaně. Protiproudé zapojení

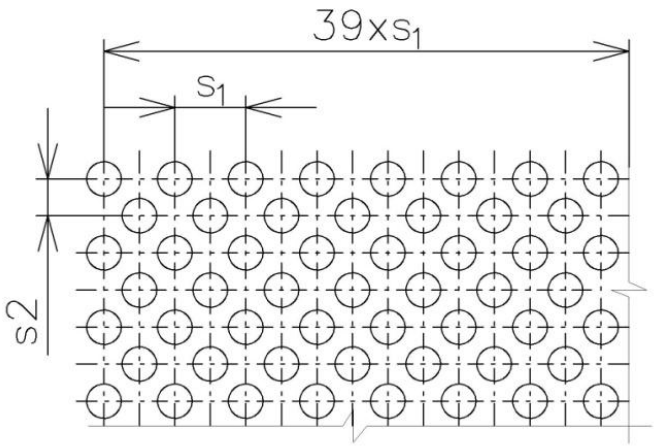
Průměr trubky	D	= 44,5	mm = 0,0445	m
Vnitřní průměr trubky	d	= 39,5	mm = 0,0395	m
Tloušťka stěny	tl	= 2,5	mm = 0,0025	m
Rozteč (příčná)	s_1	= 91	mm = 0,091	m
Rozteč (podélná)	s_2	= 47,5	mm = 0,0475	m
Počet trubek	n_{tr}	= 40		
Počet řad	$n_{řad}$	= 156		

Rozměry kanálu

Šířka	b	= 3558	mm = 3,558	m
Délka	l	= 10500	mm = 10,5	m
Výška	v	= 3000	= 3	m



Obr. 5-30 Ohřívák vzduchu OVZ-III,II,I



Obr. 5-31 Uspořádání trubkového svazku ohříváku vzduchu OVZ-III,II,I

5.10.1 Proudění ze strany spalin (příčné)

Střední teplota spalin

$$\bar{t}_s = \frac{t^s_{OVZ-III,II,I-in} + t^s_{OVZ-III,II,I-out}}{2} = \frac{234,4+1181}{2} = \underline{207,7\ °C} \qquad [5.358]$$

Rychlost proudění spalin

$$w_s = \frac{V_s}{F_s} \cdot \frac{273{,}15 + \overline{t_s}}{273{,}15}$$

$$w_s = \frac{34{,}82588}{5{,}3233} \cdot \frac{273{,}15 + 207{,}7}{273{,}15} \qquad [5.359]$$

$$w_s = \underline{11{,}52 \quad m/s}$$

Střední hodnota přebytku vzduchu

$$\alpha_1 = 1{,}394$$

$$\alpha_2 = 1{,}404 \qquad [5.360]$$

$$\alpha_{1,2\,str} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \frac{1{,}394 + 1{,}404}{2} = \underline{1{,}399}$$

Objemový průtok spalin pro střední hodnotu přebytku vzduchu

$$V_s = M_{pv} \cdot [O_{sv\,\min} + (\alpha_{1,2\,str} - 1) \cdot O_{VV\,\min}]$$

$$V_s = 6{,}97 \cdot [3{,}81104 + (1{,}399 - 1) \cdot 2{,}96694] \qquad [5.361]$$

$$V_s = \underline{34{,}82588 \quad Nm^3/kg}$$

Světlý průřez pro spaliny

$$F_s = b \cdot v - D \cdot v \cdot n_{tr}$$

$$F_s = 3{,}558 \cdot 3 - 0{,}0445 \cdot 3 \cdot 40 \qquad [5.362]$$

$$F_s = \underline{5{,}3233 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro hladké trubky, uspořádání za sebou

$$\alpha_{k_1} = 0{,}2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_s \cdot D}{\nu}\right)^{0{,}65} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33}$$

$$\alpha_{k_1} = 0{,}2 \cdot 1 \cdot 0{,}810894 \cdot \frac{0{,}040739}{0{,}0445} \cdot \left(\frac{11{,}52 \cdot 0{,}0445}{0{,}0000325}\right)^{0{,}65} \cdot 0{,}66846^{0{,}33} \qquad [5.363]$$

$$\alpha_{k_1} = \underline{107{,}48 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Korekční součinitel na počet řad svazku

Pro $n_{tr} \geq 10$ je $C_z = 1$ [1]

Korekční součinitel na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné a podélné rozteči trubek

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

$$C_s = \frac{1}{\left[1+\left(2\cdot 2,0449-3\right)\cdot\left(1-\frac{1,0674}{2}\right)^3\right]^2} \qquad [5.364]$$

$$C_s = \underline{0,810894}$$

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,091}{0,0445} = \underline{2,0449} \qquad [5.365]$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,0475}{0,0445} = \underline{1,0674} \qquad [5.366]$$

Hodnoty pro střední teplotu spalin získané interpolací

Kinematická viskozita	$\nu = 0,0000325 \quad m^2/s$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,040739 \quad W/mK$
Prandtlovo číslo	$\mathrm{Pr} = 0,66846$

5.10.2 Proudění ze strany vzduchu (podélné)

Střední hodnota teploty vzduchu

$$\bar{t}_v = \frac{t^m_{OVZ-III,II,I-in} + t^m_{OVZ-III,II,I}}{2} = \frac{40+227}{2} = \underline{133,5\ °C} \qquad [5.367]$$

Hodnoty pro střední teplotu vzduchu získané interpolací

Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,034279 \quad W/mK$
Kinematická viskozita	$\nu = 0,0000271 \quad m^2/s$
Prandtlovo číslo	$\mathrm{Pr} = 0,69$

Rychlost vzduchu

$$w_v = \frac{V_v}{F_{vz}} \cdot \frac{273{,}15 + \overline{t_V}}{273{,}15}$$

$$w_v = \frac{26{,}35473}{2{,}52} \cdot \frac{273{,}15 + 133{,}5}{273{,}15} \qquad [5.368]$$

$$w_v = \underline{15{,}55 \quad m/s}$$

Objemový průtok vzduchu

$$V_V = M_{pv} \cdot \beta \cdot O_{VV\,\min}$$

$$V_V = 6{,}97 \cdot 1{,}274 \cdot 2{,}966944 \qquad [5.369]$$

$$V_V = \underline{26{,}35473 \quad Nm^3/kg}$$

Průřez pro vzduch

$$F_{vz} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot 52$$

$$F_{vz} = \frac{\pi \cdot 0{,}0395^2}{4} \cdot 40 \cdot 52 \qquad [5.370]$$

$$F_{vz} = \underline{2{,}5231 \quad m^2}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění

$$\alpha_V = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_V \cdot d_e}{\nu}\right)^{0{,}8} \cdot \Pr^{0{,}4} \cdot C_t \cdot C_m$$

$$\alpha_V = 0{,}023 \cdot \frac{0{,}034279}{0{,}0395} \cdot \left(\frac{15{,}55 \cdot 0{,}0395}{0{,}0000271}\right)^{0{,}8} \cdot 0{,}69^{0{,}4} \cdot 0{,}957697 \cdot 1 \qquad [5.371]$$

$$\alpha_V = \underline{50{,}33 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde C_m $[-]$ - opravný koeficient, při dvoustranném ohřevu $C_m = 1$ [1]

Ekvivalentní průměr d_e

Ekvivalentní průměr je při proudění uvnitř trubek roven vnitřnímu průměru trubky $d_e = d = 0{,}0393 \quad m$ [1]

Opravný koeficient

$$C_t = \left(\frac{\overline{T_{vz}}}{T_{st}}\right)^{0{,}5}$$

$$C_t = \left(\frac{133{,}5 + 273{,}15}{443{,}75}\right)^{0{,}5} \qquad [5.372]$$

$$C_t = \underline{0{,}957697}$$

Teplota stěny

$$T_{st} = \frac{\overline{t_{vz}} + \overline{t_s}}{2} + 273{,}15$$

$$T_{st} = \frac{133{,}5 + 207{,}7}{2} + 273{,}15 \qquad [5.373]$$

$$T_{st} = \underline{443{,}75 \;\; K}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

Uvažujeme sálání tříatomových plynů a i sálání tuhých částic v úletu (popílku) [1]

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_s^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_{st}}{T_s}\right)^4}{1 - \frac{T_{st}}{T_s}}$$

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0{,}8 + 1}{2} \cdot 0{,}119157 \cdot (207{,}7 + 273{,}15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{443{,}75}{207{,}7 + 273{,}5}\right)^4}{1 - \frac{443{,}75}{207{,}7 + 273{,}15}} \qquad [5.374]$$

$$\alpha_{sal} = \underline{2{,}42 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde a_{st} $[-]$ - stupeň černosti povrchu stěn, uvažuje se $a_{st} = 0{,}8$ [1]

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}$$

$$a = 1 - e^{-0{,}126876} \qquad [5.375]$$

$$a = \underline{0{,}119157}$$

Příslušná optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = \left(k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk}\right) \cdot p \cdot s$$

$$k \cdot p \cdot s = \left(17{,}47038 + 0{,}334753\right) \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}071258 \qquad [5.376]$$

$$k \cdot p \cdot s = \underline{0{,}126876}$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

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

$$s = 0{,}9 \cdot 0{,}0445 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}091 \cdot 0{,}0475}{0{,}0445^2} - 1\right) \qquad [5.377]$$

$$s = \underline{0{,}071258 \quad m}$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

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

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,175648}{3,16 \cdot \sqrt{0,029354 \cdot 0,071258}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{207,7 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,293543 \qquad [5.378]$$

$$k_s \cdot r_s = \underline{17,47038 \quad 1/mMPa}$$

Objemová koncentrace vodní páry ve spalinách

$$r_{H_2O} = \frac{O^s_{H_2O} + (\chi - 1) \cdot (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VS\,\min}}{O_{SV\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,87734 + (1,000000025 - 1) \cdot (1,399 - 1) \cdot 2,966944105}{3,811038 + (1,399 - 1) \cdot 2,966944} \qquad [5.379]$$

$$r_{H_2O} = \underline{0,175648}$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalinách

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

$$r_s = 0,175648 + 0,117895 \qquad [5.380]$$

$$r_s = \underline{0,293543}$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SV\,\min} + (\alpha_{1,2\,stř} - 1) \cdot O_{VV\,\min}}$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,588806 + 0,00006145}{3,811038 + (1,399 - 1) \cdot 2,966944} \qquad [5.381]$$

$$r_{RO_2} = \underline{0,117895}$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách

$$p_s = r_s \cdot p$$

$$p_s = 0,293543 \cdot 0,1 \qquad [5.382]$$

$$p_s = \underline{0,0293543 \quad MPa}$$

Kde p - je tlak spalin, bere se $p = 0,1 \quad MPa$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{\left(\overline{t_s} + 273,15\right)^2 \cdot d_{pk}^2}}$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,002656}{\sqrt[3]{\left(207,7 + 273,15\right)^2 \cdot 20^2}} \qquad [5.383]$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \underline{0,334753 \quad 1/mMPa}$$

Kde d_{pk} $[\mu m]$ - je střední průměr popílkových částic, volím 20 μm [1]

Koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu_{pk} = \frac{A^r \cdot (X_{ú} + 1)}{2 \cdot G_s} = \frac{0,02 \cdot (0,7 + 1)}{2 \cdot 6,400886} = \underline{0,002656 \quad kg/kg} \qquad [5.384]$$

$$G_s = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha_{1,2\,stř} \cdot O_{VV\,\min}$$

$$G_s = 1 - 0,02 + 1,306 \cdot 1,399 \cdot 2,96694 \qquad [5.385]$$

$$G_s = \underline{6,400886 \quad kg/kg}$$

Výhřevná plocha ohříváku vzduchu

$$S_{TP} = \pi \cdot D \cdot v \cdot n_{tr} \cdot n_{řad}$$

$$S_{TP} = \pi \cdot 0,0445 \cdot 2,994 \cdot 40 \cdot 156 \qquad [5.386]$$

$$S_{TP} = \underline{2611,838 \quad m^2}$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_s \cdot \alpha_v}{\alpha_s + \alpha_v}$$

$$k = 0,65 \cdot \frac{71,44 \cdot 50,33}{71,44 + 50,33} \qquad [5.387]$$

$$k = \underline{19,19 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_s = \xi \cdot \left(\alpha_{k_1} + \alpha_{sal}\right)$$

$$\alpha_s = 0,65 \cdot \left(107,484 + 2,42\right) \qquad [5.388]$$

$$\alpha_s = \underline{71,44 \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Kde ξ $[-]$ - součinitel využití plochy, bráno $\xi = 0,65$ [1]

Teplo předané ohříváku vzduchu OVZ-III,II,I

$$Q^{skut}_{OVZ-III,II,I} = k \cdot \Delta t \cdot S_{TP}$$

$$Q^{skut}_{OVZ-III,II,I} = 19{,}19 \cdot 44{,}42 \cdot 2611{,}838 \qquad [5.389]$$

$$Q^{skut}_{OVZ-III,II,I} = \underline{2226{,}881 \quad kW}$$

Logaritmický teplotní spád (protiproud)

$$\Delta t_m = t^s_{OVZ-III,II,I-in} - t^m_{OVZ-III,II,I-out} = 234{,}4 - 227 = 7{,}4 \ °C \qquad [5.390]$$

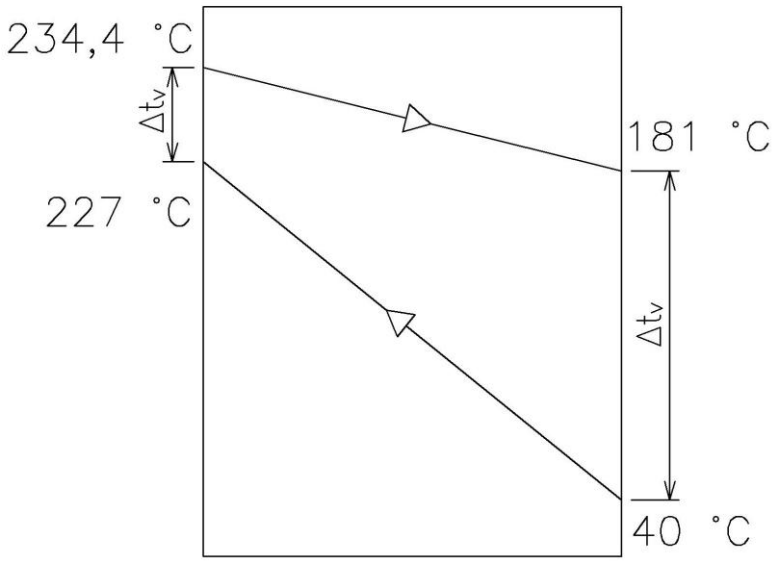
$$\Delta t_v = t^s_{OVZ-III,II,I-out} - t^m_{OVZ-III,II,I-in} = 181 - 40 = 141 \ °C \qquad [5.391]$$

$$\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} = 19{,}05 \qquad [5.392]$$

$19{,}05 \leq 1{,}7$ *neplatí* $\Rightarrow$ teplotní spád nutno počítat jako logaritmický

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} \cdot \psi = \frac{141 - 7{,}4}{\ln \frac{141}{7{,}4}} \cdot 0{,}98 = \underline{44{,}42 \ °C} \qquad [5.393]$$

Kde ψ $[-]$ - součinitel pro křížové proudění, bráno $\psi = 0{,}98$ [1]

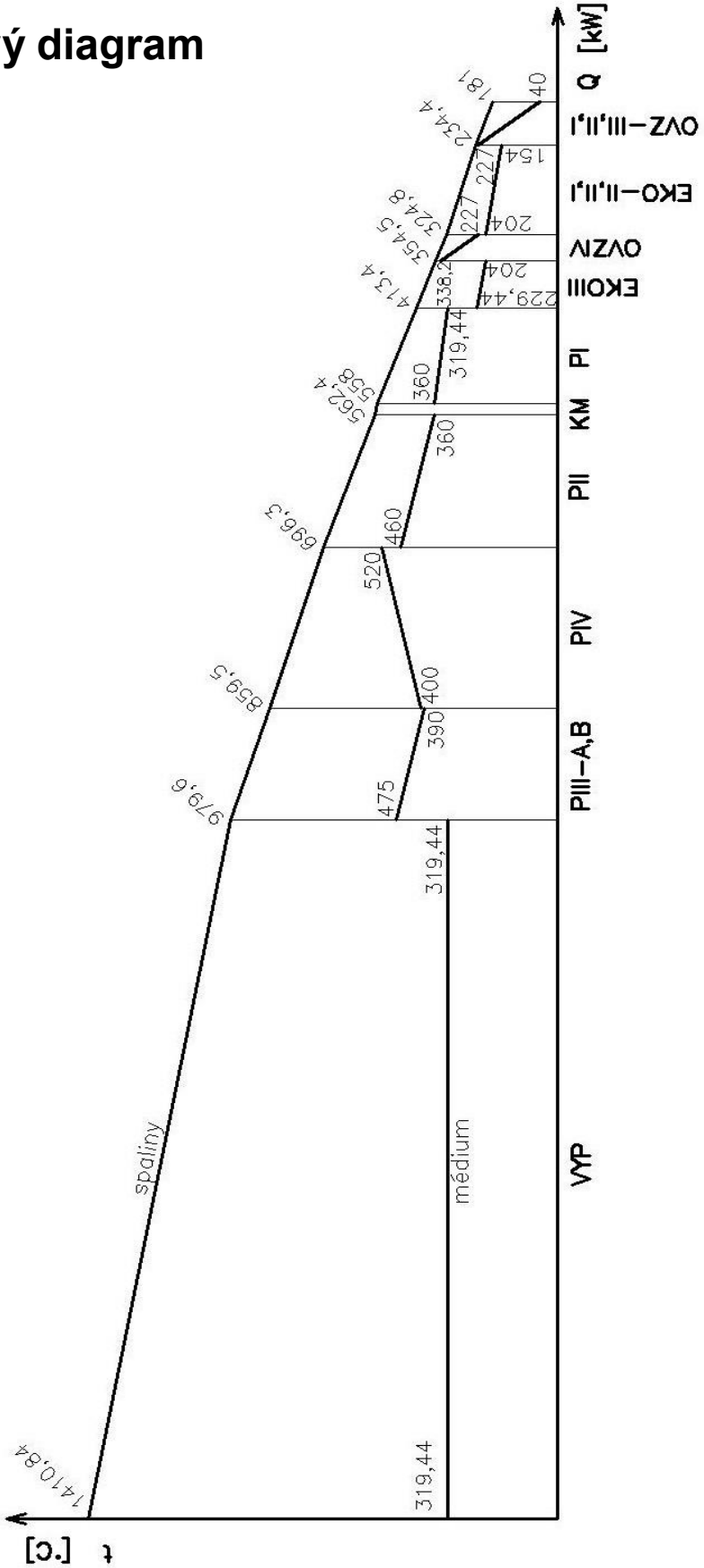


Obr. 5-32 Teplotní spád pro ohřívák vzduchu OVZ-III,II,I

Odchylka předaného tepla od navrhovaného pro ohřívák vzduchu OVZIII

$$p = \frac{Q_{OVZ-III,II,I} - Q^{skut}_{OVZ-III,II,I}}{Q_{OVZ-III,II,I}} = \frac{2225{,}005 - 2226{,}881}{2225{,}005} \cdot 100 = \underline{-0{,}0843 \ \%} \qquad [5.394]$$

6 Pilový diagram



Obr. 6-1 Pilový diagram

7 Kontrola tepelné bilance

Kontrola výkonu

$$Q_1 = Q_{i\,red} \cdot \frac{\eta_k}{100} \cdot M_{pv} = 10927,972 \cdot \frac{85,073}{100} \cdot 6,97 = \underline{64798,373 \quad kW} \qquad [5.395]$$

$$Q_2 = \Sigma Q_i \cdot \frac{100 - z_c}{100} = 67747,507 \cdot \frac{100 - 4,427}{100} = \underline{64748,325 \quad kW} \qquad [5.396]$$

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 = \underline{72,682 \quad kW} \qquad [5.397]$$

Součet skutečných výkonů jednotlivých ploch

$$\Sigma Q_i = Q_{VYP}^{skut} + Q_{PIIIA}^{skut} + Q_{PIIIB}^{skut} + Q_{parIII}^{skut} + Q_{PIV}^{skut} + Q_{parIV}^{skut} + Q_{PII}^{skut} + Q_{parII}^{skut} + Q_{KM}^{skut} + Q_{PI}^{skut} + Q_{EKOIII}^{skut} + Q_{EKO-III,II,I}^{skut}$$

$$\Sigma Q_i = 32313,354 + 3424,813 + 2271,254 + 1838,092 + 8148,566 + 406,149 + 6756,34 + 287,934 + 549,133 + 4858,57 + 2382,633 + 4510,668 \qquad [5.398]$$

$$\Sigma Q_i = \underline{67747,507 \quad kW}$$

Odchylka tepelné bilance

$$\frac{\Delta Q}{Q_{i\,red} \cdot \frac{\eta}{100} \cdot M_{pv}} \cdot 100 = \frac{72,682}{10927,972 \cdot \frac{85,073}{100} \cdot 6,75} \cdot 100 = \underline{\underline{0,112 \quad \%}} \qquad [5.399]$$

Tepelný výpočet a konstrukční provedení odpovídá zadaným parametrům, protože odchylka je malá, a to $\underline{\underline{0,112 \quad \%}}$

TEPLOSMĚNNÁ PLOCHA		Teplota spalin [°C]	Teplota média [°C]	Navrhovaný výkon [kW]	Výpočtový výkon [kW]	Odchylka [kW]
Přehřívák páry IV	**výstup**	696,3	520	8149,630	8148,566	1,063
	vstup	859,5	400			
Přehřívák páry III	**výstup**	859,5	475	5696,271	5696,067	0,204
	vstup	979,6	390			
Přehřívák páry II	**výstup**	562,4	460	6757,108	6756,340	0,767
	vstup	696,3	360			
Přehřívák páry I	**výstup**	413,4	360	4858,741	4858,570	0,171
	vstup	558	319,44			
Výparník + paralelní plochy	**výstup**	979,6	319,44	35461,566	35394,662	66,904
	vstup	1410,844	229,44			
Ohřívák vody III	**výstup**	354,5	229,44	2383,205	2382,633	0,573
	vstup	413,4	204			
Ohřívák vody II,I	**výstup**	234,8	204	4513,847	4510,668	3,179
	vstup	324,8	154			
Celkem				**67820,368**	**67747,507**	**72,861**

Tab. 7-1 Celkový přehled pro jednotlivé teplosměnné plochy

8 Závěr

Na základě zvolených přebytků vzduchu v kotli a stechiometrických výpočtů byly stanoveny entalpie produktů spalování a spalovacích vzduchů.

Z tepelné bilance kotle byla vypočtena redukovaná výhřevnost $Q_{i\,red} = 10927{,}972 \quad kJ/kg$, jednotlivé ztráty kotle (celková ztráta $14{,}927\ \%$), výpočtové množství paliva $M_{pv} = 6{,}97 \quad kg/s$, a účinnost kotle $\eta = 85{,}073\ \%$. Dále se navrhlo rozmístění teplosměnných ploch po kotli a jejich tepelný výkon ze strany pracovního média.

Dále byl proveden tepelný výpočet spalovací komory. Podstava spalovací komory a umístění sekundárního vzduchu ve spalovací komoře je dáno dodavatelem roštu. Spalovací komoru tvoří membránové stěny a výstupní teplota z ohniště je $979{,}6\ °C$. Na výstupu nad ohništěm jsou umístěni 2 deskové přehříváky PIII a za nimi je vstřik napájecí vody pro regulaci teploty páry. Následuje souproudý přehřívák páry PIV s hladkými trubkami uspořádanými za sebou. Za ním je umístěn protiproudý přehřívák páry PII tvořen hladkými trubkami uspořádanými za sebou. Druhý vstřik napájecí vody je mezi přehřívákem PII a deskovým přehřívákem. Začíná druhý tah (plechový kanál), který je oddělen kotlovou mříží. V plechovém kanálu je umístěn protiproudý přehřívák páry PI tvořen z hladkých trubek uspořádaných za sebou a za ním následuje protiproudý ohřívák vody III tvořený hladkými trubkami uspořádanými za sebou, protiproudý ohřívák vzduchu řešen jako dva paralelně řazené bloky s hladkými trubkami řazenými za sebou a protiproudé ohříváky vody II a I tvořené žebrovanými trubkami uspořádanými za sebou. Následuje třetí tah, ve kterém jsou protiproudé ohříváky vzduchu III, II a I řazené za sebou s trubkami uspořádanými vystřídaně.

Teplota spalin na konci třetího tahu kotle je 181 °C, což stačí, abychom nepodkročili teplotu rosného bodu síry. Rosný bod síry je nízký, protože je velmi malý obsah spalitelné síry v palivu 0,009 %. Celkový výkon kotle je 67 747,507 kW.

SEZNAM PUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2591-8.

[2] RUE AMBROISE PARÉ, Steam Property, android aplikace, verze 3.2.1, Francie

[3] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet*. 4. přeprac. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0426-4.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a, b, c	$[m]$	rozměry spalovací komory
a	$[-]$	stupeň černosti proudu spalin
A	$[m]$	šířka boční stěny
A, B, C	$[m]$	je výška, šířka a hloubka volného prostoru mezi deskami
a_o	$[-]$	stupeň černosti ohniště
a_{pl}	$[-]$	stupeň černosti plamene
a_{st}	$[-]$	stupeň černosti povrchu stěn
A^r	$[\%]$	podíl popela v palivu
Bo	$[-]$	Boltzmannovo číslo
C	$[\%]$	podíl hořlaviny
C_m	$[-]$	opravný koeficient, při dvoustranném ohřevu
c_p	$[kJ / kg \cdot K]$	měrná tepelná kapacita
c_{pv}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	je výhřevnost paliva
C^r	$[-]$	obsah uhlíku v hořlavině surového paliva
C_s	$[-]$	korekční součinitel na uspořádání svazku
C_t	$[-]$	opravný koeficient, při ochlazování spalin
C_z	$[-]$	korekční součinitel na počet řad svazku
d	$[m]$	vnitřní průměr trubky
D	$[m]$	vnější průměr trubky
d_e	$[m]$	ekvivalentní průměr
d, e, f	$[m]$	rozměry spalovací komory
d_{pk}	$[\mu m]$	střední efektivní průměr částic popílku
$D_{ž}$	$[m]$	průměr žebra
F_p	$[m^2]$	průtočný průřez pro páru
F_s	$[m^2]$	světlý průřez pro spaliny
F_v	$[m^2]$	světlý průřez pro vodu
F_{vz}	$[m^2]$	průřez pro vzduch
F_1	$[m^2]$	světlý průřez na vstupu teplosměnné plochy
F_2	$[m^2]$	světlý průřez na výstupu teplosměnné plochy
h	$[m]$	výška kanálu
H^r	$[-]$	obsah vodíku v hořlavině surového paliva

$h_ž$	$[m]$	výška žebra
i	$[kJ/kg]$	entalpie
i_{pv}	$[kJ/kg]$	fyzické teplo paliva
k	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel prostupu tepla
$k \cdot p \cdot s$	$[-]$	optická hustota plamene
$k_p \cdot \mu_{pk}$	$[1/mMPa]$	součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi
$k_s \cdot r_s$	$[1/mMPa]$	součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
l	$[m]$	délka
m	$[-]$	zachycený podíl tepla vysálaného z ohniště
M	$[kg/s]$	množství
M	$[-]$	součinitel respektující průběh teplot v ohništi
$mgCO$	$[mg/Nm^3]$	emisní limit CO
n_{celk}	$[-]$	celkový počet trubek
n_d	$[-]$	počet desek deskového přehříváku
$n_{řad}$	$[-]$	počet řad
n_{tr}	$[-]$	počet trubek
$n_ž$	$[-]$	počet žeber na 1 metr délky
O^r	$[-]$	obsah kyslíku v hořlavině surového paliva
$\overline{O_{sp} \cdot c_s}$	$[kJ/kg°C]$	střední tepelná jímavost spalin
$O_{2\,ref}$	$[\%]$	obsah kyslíku pro referenční stav spalin
p	$[MPa]$	tlak
p	$[-]$	odchylka skutečného tepla od navrhovaného
Pr	$[-]$	Prandtlovo číslo
p_s	$[MPa]$	parciální tlak tříatomových molekul
p_{in}^m	$[MPa]$	tlak média na vstupu do teplosměnné plochy
p_{out}^m	$[MPa]$	tlak média na výstupu z teplosměnné plochy
q	$[kW/m^2]$	tepelný tok
Q	$[kW]$	teplo předané dané teplosměnné ploše
$\bar{q}$	$[kW/m^2]$	střední tepelný tok do stěn ohniště
Q_c	$[kJ/kg]$	výhřevnost hořlaviny
Q_{cz}	$[kJ/kg]$	teplo přivedené cizím zdrojem
$Q_{i\,red}$	$[kJ/kg]$	redukovaná výhřevnost paliva
Q_{ods}	$[kW]$	odsálané teplo výstupním otvorem spalovací komory

Q_{par}	$[kW]$	tepelný výkon paralelní plochy
q_s	$[kW/m^2]$	tepelné zatížení ohniště
Q_s	$[kJ/kg]$	teplo odevzdané v ohništi
$Q_{s,A}$	$[kW]$	tepelný příkon odevzdaný sáláním z ohniště
$Q_{s,dp}$	$[kW]$	sálavé teplo z ohniště
q_{sv}	$[kW/m^2]$	hustota tepelného toku
Q_u	$[kJ/kg]$	teplo uvolněné v ohništi
Q_v	$[kJ/kg]$	teplo přivedené ve vzduchu
Q_V	$[kW]$	výrobní teplo páry
ΣQ_i	$[kW]$	součet skutečných výkonů jednotlivých ploch
Q_i^r	$[kJ/kg]$	je výhřevnost paliva
Q_{VYP}^{SK}	$[kW]$	teplo předané výparníku v ohništi
R	$[m^2]$	plocha hořící vrstvy paliva na roštu
r_s	$[-]$	objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách
s	$[m]$	účinná tloušťka sálavé vrstvy
s_d	$[m]$	šířka desky
S_0	$[m^2]$	plocha ohniště
S_{par}	$[m^2]$	povrch paralelní plochy
S^r	$[-]$	obsah dusíku v hořlavině surového paliva
S_S	$[m^2]$	celková vnější plocha i se žebry
S_{sv}	$[m^2]$	výstupní průřez šotového prostoru
$s_š$	$[m]$	šířka šotů
S_{TP}	$[m^2]$	výhřevná plocha dané teplosměnné plochy
$S_{ús}$	$[m^2]$	účinná sálavá plocha stěn ohniště
S_V	$[m^2]$	celková vnitřní plocha
S_{vo}	$[m^2]$	plocha výstupního otvoru
$s_ž$	$[m]$	vzdálenost mezi žebry
s_1	$[m]$	příčná rozteč
s_2	$[m]$	podélná rozteč
$S_{1ž}$	$[m^2]$	plocha jednoho žebra
t	$[°C]$	teplota
tl	$[m]$	tloušťka trubky

$tl_ž$	$[m]$	tloušťka žebra
$\overline{t_p}$	$[°C]$	střední teplota páry
t_{pv}	$[°C]$	teplota paliva
$\overline{t_s}$	$[°C]$	střední teplota spalin
T_S	$[K]$	teplota proudu spalin
T_{st}	$[K]$	teplota stěny
$\overline{t_V}$	$[°C]$	střední teplota vzduchu
$\overline{T_{vz}}$	$[K]$	teplota vzduchu
T_z	$[K]$	absolutní teplota zaneseného povrchu plochy
t_{in}^m	$[°C]$	teplota média na vstupu do teplosměnné plochy
t_{out}^m	$[°C]$	teplota média na výstupu z teplosměnné plochy
V	$[Nm^3/kg]$	objemový průtok vzduchu
V_o	$[m^3]$	aktivní objem ohniště
V_s	$[Nm^3/s]$	objemový průtok spalin
v_s	$[m]$	střední výška teplosměnné plochy
v_1	$[m]$	vstupní výška teplosměnné plochy
v_2	$[m]$	výstupní výška teplosměnné plochy
w_m	$[m/s]$	rychlost proudění média
w_s	$[m/s]$	rychlost proudění spalin
w_v	$[m/s]$	rychlost vzduchu
W_t^r	$[-]$	obsah vody v původním vzorku
x	$[-]$	úhlový součinitel
X	$[\%]$	podíl popela
x_{pl}	$[-]$	poloha maximální teploty plamene
y_h	$[-]$	součinitel tepelné nerovnoměrnosti po výšce ohniště
Z_{CO}	$[\%]$	ztráta chemickým nedopalem
Z_{cp}	$[\%]$	ztráta mechanickým nedopalem v popílku
Z_{cr}	$[\%]$	ztráta mechanickým nedopalem v roštovém propadu
Z_{cs}	$[\%]$	ztráta mechanickým nedopalem ve škváře a strusce
$Z_{cú}$	$[\%]$	ztráta mechanickým nedopalem v úletu
Z_{fp}	$[\%]$	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v popílku
Z_{fr}	$[\%]$	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v propadu
Z_{fs}	$[\%]$	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků ve škváře či strusce

$Z_{fú}$	$[\%]$	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v úletu
Z_k	$[\%]$	komínová ztráta
Z_{sv}	$[\%]$	ztráta sáláním a vedením do okolí
α	$[-]$	součinitel přebytku vzduchu
α_{k_1}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla konvekcí
α_{k_2}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla pro podélné proudění
α_s	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla na straně spalin
α_{sal}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla sáláním
α_{Sr}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	redukovaný součinitel přestupu tepla ze strany spalin
α_V	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	souč. přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění pro vzduch
α_{Vr}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla konvekcí pro podélné proudění
α_1	$[-]$	přebytek vzduchu před teplosměnnou plochou
α_2	$[-]$	přebytek vzduchu za teplosměnnou plochou
$\alpha_{1,2\,stř}$	$[-]$	střední hodnota přebytku vzduchu
β	$[-]$	součinitel přebytku vzduchu ohříváku vzduchu
Δt	$[°C]$	teplotní spád
Δt_m	$[°C]$	menší teplotní rozdíl
Δt_v	$[°C]$	větší teplotní rozdíl
ε	$[m^2 \cdot K / W]$	součinitel zanesení teplosměnné plochy
ξ	$[-]$	součinitel využití plochy
ζ	$[-]$	součinitel zanesení stěn
η	$[Pa \cdot s]$	dynamická viskozita
η_k	$[\%]$	účinnost kotle
λ	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
$\lambda_ž$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti žeber
μ_{pk}	$[kg / kg]$	koncentrace popela ve spalinách
ν	$[m^2 / s]$	kinematická viskozita
v''	$[m^3 / kg]$	měrný objem
σ_1	$[-]$	poměrná příčná rozteč trubek
σ_2	$[-]$	poměrná podélná rozteč trubek
φ	$[-]$	součinitel tepelné efektivnosti
φ_{o-sv}	$[-]$	úhlový součinitel ohniště

ψ	$[-]$	součinitel tepelné efektivnosti
ψ_{sv}	$[-]$	součinitel tepelné efektivnosti následujícího svazku,
$\psi_{ž}$	$[-]$	koeficient nerovnoměrnosti po povrchu žebra

Horní indexy

in	vstup
out	výstup
s	spaliny
skut	skutečný
t	při dané teplotě
v	voda

Dolní index

EKOIII	ohřívák vody III
$EKO-II,I$	ohřívák vody II,I
KM	kotlová mříž
m	médium
min	minimální
nv	napájecí voda
np	nechlazeného plamene
OVZIV	ohřívák vzduchu IV
$OVZ-III,II,I$	ohřívák vzduchu III, II, I
ok	na výstupu z ohniště
pv	paliva výpočtové
pal	paliva
pp	přehřátá pára
PIV	přehřívák páry IV
PIIIA	přehřívák páry III, část A
PIIIB	přehřívák páry III, část B
PII	přehřívák páry II
PI	přehřívák páry I
s	spaliny
SV	vlhké spaliny
SS	suché spaliny
skut	skutečný
VS	suchý vzduch
VYP	výparník
VV	vlhký vzduch
VSII	vstřik II
VSI	vstřik I

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3-1 Schéma vstřiku napájecí vody II 22
Obr. 3-2 Schéma vstřiku napájecí vody I 23
Obr. 4-1 Spalovací komora 28
Obr. 5-1 Rozložení částí A a B šotového přehříváku III 33
Obr. 5-2 Deskový přehřívák – část A 34
Obr. 5-3 Teplotní spád přehříváku III – části A 44
Obr. 5-4 Rozložení částí A a B šotového přehříváku III 45
Obr. 5-5 Deskový přehřívák – část B 45
Obr. 5-6 Teplotní spád přehříváku III – části B 56
Obr. 5-7 Paralelní plocha PIII-A,B 57
Obr. 5-8 Přehřívák PIV 58
Obr. 5-9 Uspořádání svazku trubek přehříváku PIV 58
Obr. 5-10 Teplotní spád přehříváku IV 66
Obr. 5-11 Paralelní plocha 66
Obr. 5-12 Přehřívák PII 67
Obr. 5-13 Uspořádání svazku trubek PII 67
Obr. 5-14 Teplotní spád přehříváku PII 75
Obr. 5-15 Paralelní plocha PII 75
Obr. 5-16 Kotlová mříž ze spalovací komory 76
Obr. 5-17 Teplotní spád kotlové mříže 81
Obr. 5-19 Uspořádání svazku trubek přehříváku páry PI 82
Obr. 5-18 Přehřívák páry PI 82
Obr. 5-20 Teplotní spád přehříváku PI 90
Obr. 5-21 Ohřívák vody EKOIII 90
Obr. 5-22 Uspořádání svazku trubek ohříváku vody EKOIII 91
Obr. 5-23 Teplotní spád ohříváku vody EKOIII 97
Obr. 5-25 Uspořádání svazku trubek ohříváku vzduchu OVZIII 97
Obr. 5-24 Ohřívák vzduchu OVZIII 97
Obr. 5-26 Teplotní spád pro ohřívák vzduchu OVZIV 104
Obr. 5-28 Uspořádání svazku trubek ohříváku vody EKO-II,I 105
Obr. 5-27 Řez žebrovanou trubkou 105
Obr. 5-29 Teplotní spád pro ohřívák vody EKO-II,I 110
Obr. 5-31 Uspořádání trubkového svazku 111
Obr. 5-30 Ohřívák vzduchu OVZ-III,II,I 111
Obr. 5-32 Teplotní spád pro ohřívák vzduchu OVZ-III,II,I 118
Obr. 6-1 Pilový diagram 119

SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Objemové složení suchého vzduchu 11
Tab. 2-2 Závislost parciálního tlaku páry na teplotě vzduchu 12
Tab. 2-3 Měrná entalpie vybraných složek spalin v závislosti na teplotě 14
Tab. 2-4 I-t tabulka spalin 16
Tab. 3-1 Jednotlivé ztráty kotle 20
Tab. 3-2 Shrnutí tepelných bilancí na straně páry a vody 27
Tab. 7-1 Celkový přehled pro jednotlivé teplosměnné plochy 121

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 Výkresová dokumentace