



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ UHLÍ A DŘEVNÍ BIOMASY

GRATE BOILER FOR BIOMASS AND COAL CO-COMBUSTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Baláži

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Martin Baláži**
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 uhlí a dřevní biomasy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracujte tepelný výpočet a rozměrový návrh kotle na spalování dřevní biomasy, který bude respektovat rosný bod spalin. Biomasa je spalována na pásovém roštu moderní konstrukce. Množství vzduchu a umístění sekundárního vzduchu ve spalovací komoře je dáno dodavatelem roštu. Popište způsob regulování teploty a množství vzduchu na vstupech do spalovací komory kotle.

Bližší specifikace zadání dle údajů výrobce bude upřesněno v práci.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je zpracovat tepelný výpočet a rozměrový návrh kotle na spoluspalování dřevní biomasy a uhlí, který bude respektovat rosný bod spalin.

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

Tato diplomová práce řeší návrh roštového kotle na spalování dřevní štěpky nebo hnědé uhlí o tepelném výkonu 160 MW. Stechiometrie spalin je vypočtena dle zadaného složení jednotlivých paliv. Rozměry jednotlivých výhřevných ploch jsou primárně vypočteny pro spalování dřevní štěpky a následně překontrolovány pro spalování hnědé uhlí. Návrh kotle je zakončen kontrolou celkového tepelného výkonu. Návrh kotle je doplněn výkresovou dokumentací.

Klíčová slova

roštový kotel, přehřívák, výparník, ekonomizér, ohřívák vzduchu, hnědé uhlí, dřevní štěpka

Abstract

This thesis solves a design of a grate boiler burning wood chips or brown coal with a heat output of 160 MW. Stoichiometry flue gas is calculated according to the specified composition of each fuel. The dimensions of the individual heating surfaces are primarily calculated for burning wood chips and subsequently checked for the combustion of brown coal. Design of the boiler is completed by checking the overall heat output. Boiler design is accompanied by drawing documentation.

Key Words

stoker-fired boiler, superheater, evaporator, economizer, air heater, brown coal, woodchip

Bibliografická citace

BALÁŽI, M. *Roštový kotel na spalování uhlí a dřevní biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 188 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušil autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně dne 24.5.2016

.....

podpis studenta

Obsah

1	Úvod.....	15
1.1	Cíle diplomové práce.....	15
1.2	Charakteristika kotle.....	15
2	Stechiometrie spalin	16
2.1	Dřevní štěpka.....	16
2.1.1	Objemy vzduchu	16
2.1.2	Objemy spalin	17
2.1.3	Skutečné množství vzduchu a spalin.....	18
2.1.4	Entalpie vzduchu a produktů spalování	19
2.2	Hnědé uhlí.....	22
2.2.1	Objemy vzduchu	22
2.2.2	Objemy spalin	22
2.2.3	Skutečné množství vzduchu a spalin.....	23
2.2.4	Entalpie vzduchu a produktů spalování	24
3	Tepelná bilance kotle	27
3.1	Dřevní štěpka.....	27
3.1.1	Teplo přivedené do kotle.....	27
3.1.2	Ztráty kotle a tepelná účinnost	28
3.1.3	Výrobní teplo páry a množství paliva	30
3.2	Hnědé uhlí.....	31
3.2.1	Teplo přivedené do kotle.....	31
3.2.2	Ztráty kotle a tepelná účinnost	32
3.2.3	Výrobní teplo páry a množství paliva	34
4	Výpočet spalovací komory.....	35
4.1	Konstrukční rozměry spalovací komory.....	35
4.2	Porovnávací kritéria ohniště	36
4.2.1	Dřevní štěpka.....	36
4.2.2	Hnědé uhlí	36
4.3	Výpočet teploty spalin na výstupu z ohniště	37
4.3.1	Dřevní štěpka.....	37
4.3.2	Hnědé uhlí	40
5	Výpočet konvekčních ploch	43
5.1	Uspořádání jednotlivých stupňů konvekčních ploch.....	43
5.1.1	Přehřívák	43
5.1.2	Výparník.....	43
5.1.3	Ekonomizér	43

5.1.4	Ohřívák vzduchu.....	43
5.2	Návrhové teploty média pro konvekční plochy	44
5.2.1	Dřevní štěpka	44
5.2.2	Hnědé uhlí.....	44
5.3	Bilance vstříků	45
5.3.1	Vstřík 2	45
5.3.2	Vstřík 1	46
5.4	Návrhový tepelný výkon konvekčních ploch.....	47
5.4.1	Dřevní štěpka	47
5.4.2	Hnědé uhlí.....	49
5.5	Tepelná bilance na straně spalin	51
5.5.1	Dřevní štěpka	51
5.5.2	Hnědé uhlí.....	51
5.6	Návrhový pilový diagram – Dřevní štěpka	52
5.7	Návrhový pilový diagram – Hnědé uhlí.....	53
5.8	Výpočet konvekčních ploch – dřevní štěpka	54
5.8.1	Deskový přehřívák SH3.....	54
5.8.2	Doplňková plocha v prostoru SH3	62
5.8.3	Přehřívák SH4.....	66
5.8.4	Doplňková plocha v prostoru SH4	72
5.8.5	Přehřívák SH2.....	76
5.8.6	Doplňková plocha v prostoru SH2	82
5.8.7	Výparníková mříž	86
5.8.8	Přehřívák SH1	92
5.8.9	Ekonomizér (ohřívák vody) ECO2.....	99
5.8.10	Ohřívák vzduchu AH2.....	105
5.8.11	Ekonomizér (ohřívák vody) ECO1	110
5.8.12	Ohřívák vzduchu AH1	116
5.8.13	Výparník	121
5.8.14	Kontrola výpočtu	122
5.8.15	Skutečný pilový diagram – Dřevní štěpka.....	123
5.9	Výpočet konvekčních ploch – hnědé uhlí	124
5.9.1	Deskový přehřívák SH3.....	124
5.9.2	Doplňková plocha v prostoru SH3	131
5.9.3	Přehřívák SH4.....	135
5.9.4	Doplňková plocha v prostoru SH4	140
5.9.5	Přehřívák SH2.....	143

5.9.6 Doplnková plocha v prostoru SH2	147
5.9.7 Výparníková mříž.....	151
5.9.8 Přehřívák SH1	156
5.9.9 Ekonomizér (ohřívák vody) ECO2	161
5.9.10 Ohřívák vzduchu AH2	166
5.9.11 Ekonomizér (ohřívák vody) ECO1	170
5.9.12 Ohřívák vzduchu AH1	174
5.9.13 Výparník.....	178
5.9.14 Kontrola výpočtu.....	179
5.9.15 Skutečný pilový diagram – Hnědé uhlí	180
6 Závěr.....	181
Seznam použitých zdrojů.....	182
Seznam použitých zkratk a symbolů	183
Seznam příloh	188

1 Úvod

Zvyšování spotřeby elektrické energie ve světě klade důraz i na budování nových zdrojů. Ve více případech se i dnes pro investory jeví jako nejvhodnější druh zdroje tepelná elektrárna s kotlem na pevné palivo a parní turbínou.

Mezi výhody tepelné elektrárny lze brát možnost nepřetržitého provozu, nízkou cenu výroby elektrické energie či její kompaktnost v porovnání s fotovoltaickou či větrnou elektrárnou. Největší nevýhodou tepelných elektráren je produkce škodlivých látek při spalování. To lze ovlivnit použitím paliva s nízkým obsahem znečišťujících látek (síra, chlor, atd.) například biomasy, u které je i produkce oxidu uhličitého při spalování neutrální.

Dostupnost biomasy však nemusí být v některých oblastech dostačující pro celoroční provoz elektrárny. Proto je vhodné kotel navrhnout a zkonstruovat tak, aby v případě nedostatku biomasy bylo možné spalovat i jiné dostupné nejčastěji fosilní palivo. To zabezpečí nepřetržitý provoz elektrárny a tím i rychlejší návratnost investic.

1.1 Cíle diplomové práce

Vypracování tepelného výpočtu a rozměrového návrhu roštového kotle tak, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů a množství přehřáté páry dle požadavků zákazníka při teplotě odchozích spalin z kotle zohledňujících jejich rosný bod. Primárně je v kotli spalována dřevní štěpka, kotel však musí být navržen i pro možnost spalování hnědého uhlí. Pro výpočet kotle jsou použity vztahy z [1] a [2] s pomocí firemních podkladů.

1.2 Charakteristika kotle

Pásový rošt je moderní konstrukce a umístění primárního a sekundárního vzduchu je dáno dodavatelem roštu. Palivo je ze zásobníku do podavačů dopravováno šnekovým dopravníkem. Do spalovací komory je potom dřevní štěpka podávána mechanickým pohazovačem pomocí vzduchu, hnědé uhlí je podáváno bez pohazování. Rozměry spalovací komory kotle i uspořádání výhřevných ploch jsou dány firemními podklady. Pro ofukování ploch je použit parní ofukovač s funkčním poloměrem 1,8 m.

2 Stechiometrie spalín

2.1 Dřevní štěpka

Tab. 1 Parametry paliva - Dřevní štěpka

Výhřevnost Q_i^r	16 000 kJ/kg
Obsah celkové vody W_i^r	10,3 %
Obsah popela A^r	2 %
Složení hořlaviny surového paliva (hmotnostní)	
Obsah uhlíku C^r	44,85 %
Obsah vodíku H^r	4,96 %
Obsah dusíku N^r	0,33 %
Obsah chloru Cl^r	0,016 %
Obsah kyslíku O^r	37,43 %
Obsah síry S^r	0,12 %

2.1.1 Objemy vzduchu

2.1.1.1 Minimální množství kyslíku ke spálení 1 kg paliva

$$O_{O_2min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{S_{prch}^r}{32,06} - \frac{O_2^r}{32} \right) [m^3 \cdot kg_{paliva}^{-1}] \quad (2.1)$$

$$O_{O_2min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{44,85}{12,01} + \frac{4,96}{4,032} + \frac{0,12}{32,06} - \frac{37,43}{32} \right) = 0,851 m^3 \cdot kg_{paliva}^{-1}$$

Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg paliva

$$O_{vzmin}^S = \frac{100}{21} \cdot O_{O_2min} = \frac{100}{21} \cdot 0,8505 = 4,05 m^3 \cdot kg_{paliva}^{-1} \quad (2.2)$$

Minimální množství vlhkého vzduchu ke spálení 1 kg paliva

$$O_{vzmin} = f \cdot O_{vzmin}^S = 1,024 \cdot 4,05 = 4,147 m^3 \cdot kg_{paliva}^{-1} \quad (2.3)$$

kde:

$$f = 1 + \phi \cdot \frac{p''}{p_c - \phi \cdot p''} = 1 + 0,75 \cdot \frac{3166}{101325 - 0,75 \cdot 3166} = 1,024 [-] \quad (2.4)$$

kde: $\phi = 0,75$ - relativní vlhkost [-] dle firemních podkladů

$p'' = 3166$ Pa- absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při 25°C

$p_c = 101325$ Pa – celkový absolutní tlak vzduchu

2.1.2 Objemy spalin

Objem CO₂ ve spalinách

$$O_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{\text{vzmin}}^S [\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}] \quad (2.5)$$

$$O_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{44,85}{12,01} + 0,0003 \cdot 4,05 = 0,8325 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

Objem SO₂ ve spalinách

$$O_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S_{\text{prch}}^r}{32,06} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,12}{32,06} = 0,0008 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (2.6)$$

Objem N₂ ve spalinách

$$O_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{\text{vzmin}}^S [\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}] \quad (2.7)$$

$$O_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{0,33}{28,016} + 0,7805 \cdot 4,05 = 3,1637 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

Objem Ar (včetně vzácných plynů) ve spalinách

$$O_{\text{Ar}} = 0,0092 \cdot O_{\text{vzmin}}^S = 0,0092 \cdot 4,05 = 0,0373 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (2.8)$$

Minimální množství suchých spalin

$$O_{\text{spmin}}^S = O_{\text{CO}_2} + O_{\text{SO}_2} + O_{\text{N}_2} + O_{\text{Ar}} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}] \quad (2.9)$$

$$O_{\text{spmin}}^S = 0,8325 + 0,0008 + 3,1637 + 0,0373 = 4,034 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

Maximální množství CO₂ ve spalinách

$$(\text{CO}_2)_{\text{max}} = \frac{O_{\text{CO}_2}}{O_{\text{spmin}}^S} \cdot 100 = \frac{0,8325}{4,034} \cdot 100 = 20,636 \% \quad (2.10)$$

Minimální objem vodní páry

$$O_{\text{H}_2\text{Omin}} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W_t^r}{18,016} + (f - 1) \cdot O_{\text{vzmin}}^S [\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}] \quad (2.11)$$

$$O_{\text{H}_2\text{Omin}} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{4,96}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{10,3}{18,016} + (1,024 - 1) \cdot 4,05 = 0,776 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

Minimální množství vlhkých spalin

$$O_{\text{spmin}} = O_{\text{spmin}}^S + O_{\text{H}_2\text{Omin}} = 4,034 + 0,776 = 4,81 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (2.12)$$

2.1.3 Skutečné množství vzduchu a spalin

Skutečné množství vzduchu s přebytkem

$$O_{vz} = \beta \cdot O_{vzmin} = 1,3 \cdot 4,147 = 5,39 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (2.13)$$

kde:

$$\beta = \alpha_0 - \Delta\alpha_0 = 1,35 - 0,05 = 1,3 [-] - \text{přebytek vzduchu v ohříváku} \quad (2.14)$$

kde: α_0 – přebytek vzduchu za spalovací komorou = 1,35 [-]

$\Delta\alpha_0$ – přisávání vzduchu v ohništi = 0,05 [-]

Skutečné množství spalin s přebytkem vzduchu na konci ohniště ($\alpha_{\max}=1,35$)

$$O_{sp} = O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin} = 4,81 + (1,35 - 1) \cdot 4,147 = 6,26 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (2.15)$$

Objemové části tříatomových plynů

$$r_{\text{RO}_2} = \frac{O_{\text{SO}_2} + O_{\text{CO}_2}}{O_{sp}} = \frac{0,0008 + 0,8325}{6,26} = 0,133 [-] \quad (2.16)$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O}}}{O_{sp}} = \frac{0,813}{6,26} = 0,13 [-] \quad (2.17)$$

kde:

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = O_{\text{H}_2\text{Omin}} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}^S [\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}] \quad (2.18)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = 0,776 + (1,024 - 1) \cdot (1,38 - 1) \cdot 4,05 = 0,813 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

Koncentrace popílku ve spalinách na konci ohniště

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{sp}} \cdot \frac{X_p}{100} = \frac{10 \cdot 2}{6,26} \cdot \frac{65}{100} = 2,077 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.19)$$

kde: X_p [-] - procento popela v úletu (určeno z firemních podkladů)

A^r [-] - procento popelovin v původním stavu paliva

2.1.4 Entalpie vzduchu a produktů spalování

Tab. 2 Entalpie složek spalin [1]

Teplota [°C]	Entalpie složek spalin i_i [kJ·Nm ⁻³]							Měrná tepelná kapacita c_i [kJ·m ⁻³ ·K ⁻¹]	
	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	SO ₂	Ar	popílek	Vodní pára c _{H₂O}	Suchý vzduch c _s
100	132	170	130	150	189	93	80,8	1,505	1,3
200	267	357	260	304	392	186	169	1,522	1,307
300	407	559	392	463	610	278	264	1,542	1,317
400	551	772	527	626	836	372	360	1,565	1,329
500	699	994	666	795	1070	465	458	1,59	1,343
600	850	1225	804	969	1310	557	560	1,615	1,356
700	1004	1462	948	1149	1550	650	662	1,641	1,371
800	1160	1705	1094	1334	1800	743	767	1,688	1,384
900	1318	1952	1242	1526	2050	834	874	1,696	1,398
1000	1477	2204	1392	1723	2305	928	984	1,723	1,41
1100	1640,4	2464	1546,8	1934,2	2562	1020,4	1138,8	1,749	1,4215
1200	1803,8	2724	1701,6	2145,4	2819	1112,8	1293,6	1,775	1,433
1300	1967,2	2984	1856,4	2356,6	3076	1205,2	1448,4	1,801	1,443
1400	2130,6	3244	2011,2	2567,8	3333	1297,6	1603,2	1,827	1,453
1500	2294	3504	2166	2779	3590	1390	1758	1,853	1,463
2000	3138	4844	2965	3926	4890	1855	2512	1,963	1,5

Entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg paliva při $\alpha = 1$

$$I_{\text{spmin}} = O_{\text{CO}_2} \cdot i_{\text{CO}_2} + O_{\text{SO}_2} \cdot i_{\text{SO}_2} + O_{\text{N}_2} \cdot i_{\text{N}_2} + O_{\text{H}_2\text{Omin}} \cdot i_{\text{H}_2\text{O}} + O_{\text{Ar}} \cdot i_{\text{Ar}} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.20)$$

$$I_{\text{spmin}}^{100^\circ\text{C}} = 0,8325 \cdot 170 + 0,0008 \cdot 189 + 3,1637 \cdot 130 + 0,776 \cdot 150 + 0,0373 \cdot 93$$

$$I_{\text{spmin}}^{100^\circ\text{C}} = 672,88 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpie minimálního množství vzduchu ($\alpha = 1$)

$$I_{\text{vzmin}} = O_{\text{vzmin}}^s \cdot c_{\text{vz}} \cdot t_{\text{vz}} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (2.21)$$

$$I_{\text{vzmin}}^{100^\circ\text{C}} = O_{\text{vzmin}}^s \cdot c_{\text{vz}}^{100^\circ\text{C}} \cdot t_{\text{vz}}^{100^\circ\text{C}} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$\text{kde: } c_{\text{vz}}^{100^\circ\text{C}} = c_s^{100^\circ\text{C}} + 0,0016 \cdot d \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}^{100^\circ\text{C}} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (2.22)$$

$$\text{kde: } c_s^{100^\circ\text{C}} = 1,3 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} - \text{měrné teplo suchého vzd. pro } 100^\circ\text{C z [1]}$$

$$c_{\text{H}_2\text{O}}^{100^\circ\text{C}} = 1,505 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} - \text{měrné teplo vodní páry pro } 100^\circ\text{C z [1]}$$

$$d_{\text{vz}} = (f - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = (1,024 - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = 14,92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2.23)$$

$$c_{\text{vz}}^{100^\circ\text{C}} = 1,3 + 0,0016 \cdot 14,92 \cdot 1,505 = 1,336 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$I_{\text{vzmin}}^{100^\circ\text{C}} = 4,05 \cdot 1,336 \cdot 100 = 541,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpie popílku ve spalínách

- uvažuje se, jen pokud procento popelovin v palivu splňuje nerovnost

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_i^r}{41,8 \cdot X_p} \quad (2.24)$$

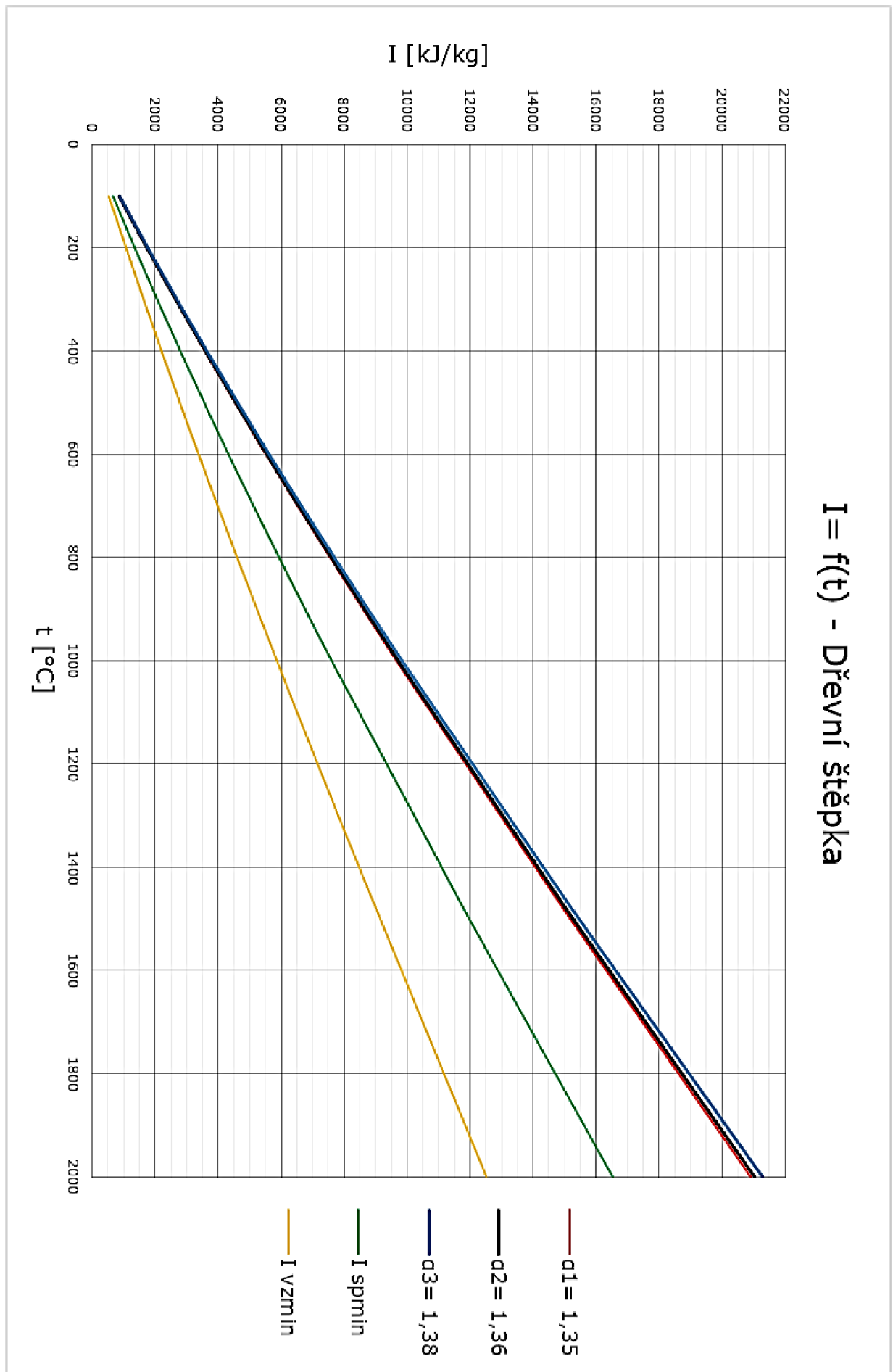
$$A^r > \frac{6 \cdot 16000}{41,8 \cdot 33}$$

2 > 69,6 => entalpie popílku se ve výpočtu nebude uvažovat

Tabulka entalpie vzduchu a produktů spalování

Tab. 3 I-t Entalpie vzduchu a produktů spalování

t [°C]	I _{spmin} [kJ/kg]	I _{vzmin} [kJ/kg]	I _{sp} = I _{spmin} + (α-1) · I _{vzmin} [kJ/kg]		
			α ₁ =1,35	α ₂ =1,36	α ₃ =1,38
100	672,88	541,06	862,25	867,66	878,48
200	1363,02	1088,11	1743,86	1754,74	1776,51
300	2075,84	1644,90	2651,56	2668,01	2700,90
400	2810,50	2213,53	3585,23	3607,37	3651,64
500	3569,92	2796,47	4548,69	4576,65	4632,58
600	4337,53	3388,80	5523,61	5557,50	5625,27
700	5133,81	3997,89	6533,07	6573,05	6653,01
800	5945,30	4614,77	7560,47	7606,62	7698,91
900	6771,81	5243,34	8606,98	8659,41	8764,28
1000	7612,80	5877,15	9669,80	9728,58	9846,12
1100	8486,61	6518,86	10768,21	10833,40	10963,78
1200	9360,42	7170,39	11870,06	11941,76	12085,17
1300	10234,23	7823,84	12972,57	13050,81	13207,29
1400	11108,03	8485,90	14078,10	14162,96	14332,68
1500	11981,84	9156,55	15186,64	15278,20	15461,33
2000	16534,05	12529,71	20919,45	21044,74	21295,34



Graf 2. $I = f(t)$ - Dřevní štěpka

2.2 Hnědé uhlí

Tab. 4 Parametry paliva – Hnědé uhlí

Výhřevnost Q_i^r	23 000 kJ/kg
Obsah celkové vody W_t^r	10 %
Obsah popela A^r	15 %
Složení hořlaviny surového paliva (hmotnostní)	
Obsah uhlíku C^r	61,84 %
Obsah vodíku H^r	2,66 %
Obsah dusíku N^r	1,34 %
Obsah chlóru Cl^r	0,178 %
Obsah kyslíku O^r	7,55 %
Obsah síry S^r	1,43 %

2.2.1 Objemy vzduchu

Minimální množství kyslíku ke spálení 1 kg paliva

$$O_{O_2\min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{S_{prch}^r}{32,06} - \frac{O_2^r}{32} \right) [m^3 \cdot kg_{paliva}^{-1}] \quad (2.25)$$

$$O_{O_2\min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{61,84}{12,01} + \frac{2,66}{4,032} + \frac{1,43}{32,06} - \frac{7,55}{32} \right) = 1,258 m^3 \cdot kg_{paliva}^{-1}$$

Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 kg paliva

$$O_{vz\min}^S = \frac{100}{21} \cdot O_{O_2\min} = \frac{100}{21} \cdot 1,258 = 5,99 m^3 \cdot kg_{paliva}^{-1} \quad (2.26)$$

Minimální množství vlhkého vzduchu ke spálení 1 kg paliva

$$O_{vz\min} = f \cdot O_{vz\min}^S = 1,024 \cdot 5,99 = 6,13 m^3 \cdot kg_{paliva}^{-1} \quad (2.27)$$

2.2.2 Objemy spalin

Objem CO₂ ve spalinách

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{vz\min}^S [m^3 \cdot kg_{paliva}^{-1}] \quad (2.28)$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{61,84}{12,01} + 0,0003 \cdot 5,99 = 1,148 m^3 \cdot kg_{paliva}^{-1}$$

Objem SO₂ ve spalinách

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S_{prch}^r}{32,06} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{1,43}{32,06} = 0,0098 m^3 \cdot kg_{paliva}^{-1} \quad (2.29)$$

Objem N₂ ve spalinách

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{vzmin}^S \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}] \quad (2.30)$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{1,34}{28,016} + 0,7805 \cdot 5,99 = 4,69 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

Objem Ar (včetně vzácných plynů) ve spalinách

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{vzmin}^S = 0,0092 \cdot 5,99 = 0,055 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (2.31)$$

Minimální množství suchých spalin

$$O_{spmin}^S = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}] \quad (2.32)$$

$$O_{spmin}^S = 1,148 + 0,0098 + 4,69 + 0,055 = 5,9 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

Maximální množství CO₂ ve spalinách

$$(CO_2)_{\max} = \frac{O_{CO_2}}{O_{spmin}^S} \cdot 100 = \frac{1,148}{5,9} \cdot 100 = 19,46 \% \quad (2.33)$$

Minimální objem vodní páry

$$O_{H_2Omin} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W_t^r}{18,016} + (f - 1) \cdot O_{vzmin}^S \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}] \quad (2.34)$$

$$O_{H_2Omin} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{2,66}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{10}{18,016} + (1,024 - 1) \cdot 5,99 = 0,56 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

Minimální množství vlhkých spalin

$$O_{spmin} = O_{spmin}^S + O_{H_2Omin} = 5,9 + 0,56 = 6,46 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (2.35)$$

2.2.3 Skutečné množství vzduchu a spalinSkutečné množství vzduchu s přebytkem

$$O_{vz} = \beta \cdot O_{vzmin} = 1,3 \cdot 6,13 = 7,97 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (2.36)$$

Skutečné množství spalin s přebytkem vzduchu ($\alpha_{\max}=1,35$)

$$O_{sp} = O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin} = 6,46 + (1,35 - 1) \cdot 6,13 = 8,61 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (2.37)$$

Objemové části tříatomových plynů

$$r_{\text{RO}_2} = \frac{O_{\text{SO}_2} + O_{\text{CO}_2}}{O_{\text{sp}}} = \frac{0,0098 + 1,148}{8,61} = 0,134 [-] \quad (2.38)$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O}}}{O_{\text{sp}}} = \frac{0,61}{8,61} = 0,071 [-] \quad (2.39)$$

kde:

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = O_{\text{H}_2\text{Omin}} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{\text{vzmin}}^{\text{S}} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}] \quad (2.40)$$

$$O_{\text{H}_2\text{O}} = 0,56 + (1,024 - 1) \cdot (1,38 - 1) \cdot 5,99 = 0,61 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

Koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{\text{sp}}} \cdot \frac{X_p}{100} = \frac{10 \cdot 15}{8,61} \cdot \frac{26}{100} = 4,53 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad (2.41)$$

kde: $X_p [-]$ - procento popela v úletu (určeno z firemních podkladů)

$A^r [-]$ - procento popelovin v původním stavu paliva

2.2.4 Entalpie vzduchu a produktů spalováníEntalpie minimálního množství spalin

$$I_{\text{spmin}} = O_{\text{CO}_2} \cdot i_{\text{CO}_2} + O_{\text{SO}_2} \cdot i_{\text{SO}_2} + O_{\text{N}_2} \cdot i_{\text{N}_2} + O_{\text{H}_2\text{Omin}} \cdot i_{\text{H}_2\text{O}} + O_{\text{Ar}} \cdot i_{\text{Ar}} [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (2.42)$$

$$I_{\text{spmin}}^{100^\circ\text{C}} = 0,8325 \cdot 170 + 0,0008 \cdot 189 + 3,1637 \cdot 130 + 0,776 \cdot 150 + 0,0373 \cdot 93$$

$$I_{\text{spmin}}^{100^\circ\text{C}} = 672,88 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- hodnoty entalpií složek spalin jsou odečteny z *Tab. 2*

Entalpie minimálního množství vzduchu ($\alpha=1$)

$$I_{\text{vzmin}} = O_{\text{vzmin}}^{\text{S}} \cdot c_{\text{vz}} \cdot t_{\text{vz}} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.43)$$

$$I_{\text{vzmin}}^{100^\circ\text{C}} = O_{\text{vzmin}}^{\text{S}} \cdot c_{\text{vz}}^{100^\circ\text{C}} \cdot t_{\text{vz}}^{100^\circ\text{C}} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$\text{kde: } c_{\text{vz}}^{100^\circ\text{C}} = c_{\text{S}}^{100^\circ\text{C}} + 0,0016 \cdot d_{\text{vz}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}^{100^\circ\text{C}} [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (2.44)$$

$$c_{\text{vz}}^{100^\circ\text{C}} = 1,3 + 0,0016 \cdot 14,92 \cdot 1,505 = 1,336 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$I_{\text{vzmin}}^{100^\circ\text{C}} = 5,99 \cdot 1,336 \cdot 100 = 800,12 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Entalpie popílku ve spalinách

- uvažuje se, jen pokud procento popelovin v palivu splňuje nerovnost

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_i^f}{41,8 \cdot X_p} \quad (2.45)$$

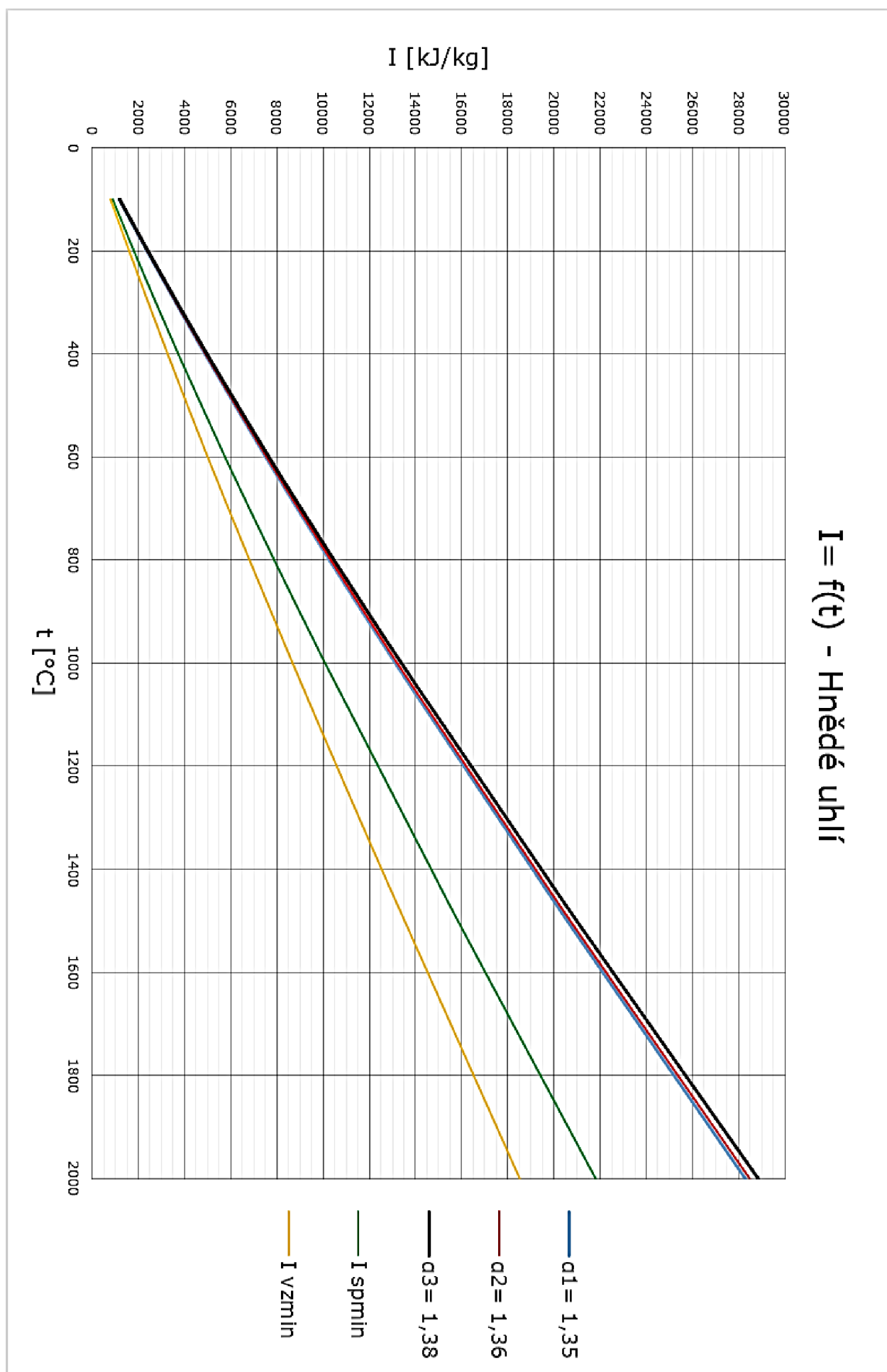
$$A^r > \frac{6 \cdot 23000}{41,8 \cdot 28}$$

15 > 117,9 => entalpie popílku se ve výpočtu nebude uvažovat

Tabulka vzduchu a produktů spalování

Tab. 5 I-t Entalpie vzduchu a produktů spalování

t [°C]	I _{spmin} [kJ·kg ⁻¹]	I _{vzmin} [kJ·kg ⁻¹]	I _{sp} = I _{spmin} + (α-1) · I _{vzmin} [kJ·kg ⁻¹]		
			α ₁ =1,35	α ₂ =1,36	α ₃ =1,38
100	895,76	800,12	1175,80	1183,80	1199,81
200	1813,43	1609,12	2376,62	2392,71	2424,89
300	2760,59	2432,50	3611,97	3636,29	3684,94
400	3736,88	3273,40	4882,57	4915,31	4980,77
500	4745,65	4135,46	6193,06	6234,42	6317,13
600	5762,89	5011,41	7516,89	7567,00	7667,23
700	6818,57	5912,14	8887,81	8946,93	9065,18
800	7893,41	6824,39	10281,95	10350,20	10486,68
900	8986,06	7753,94	11699,94	11777,48	11932,56
1000	10096,85	8691,22	13138,78	13225,69	13399,51
1100	11247,25	9640,19	14621,31	14717,72	14910,52
1200	12397,64	10603,68	16108,93	16214,97	16427,04
1300	13548,04	11570,02	17597,55	17713,25	17944,65
1400	14698,44	12549,07	19090,61	19216,10	19467,09
1500	15848,83	13540,85	20588,13	20723,54	20994,36

Graf 3. $I = f(t)$ - Hnědé uhlí

3 Tepelná bilance kotle

3.1 Dřevní štěpka

3.1.1 Teplo přivedené do kotle

Fyzické teplo paliva

- jelikož palivo není předehříváno cizím zdrojem, fyzické teplo se uvažuje pouze, když platí rovnost:

$$W_t^r \geq \frac{Q_r^i}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \quad (3.1)$$

$$10,3 \geq \frac{16000}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$

$10,3 \geq 25,46 \Rightarrow$ neplatí, s fyzickým teplem paliva tudíž nebude při výpočtu uvažováno

Teplo přivedené ohřátím vzduchu vnějším zdrojem mimo kotel

$$Q_{vzv} = \beta \cdot \Delta I_{vzmin} [\text{kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}] \quad (3.2)$$

kde: ΔI_{vzmin} – přírůstek entalpie min. množství vzduchu od teploty studeného vzduchu

Předpokládám ohřátí vzduchu před vstupem do ohříváku vzduchu na teplotu 75 °C, entalpie jsou odečtené z Graf 1

$$\Delta I_{vzmin} = (I_{vzmin}^{75^\circ} - I_{vzmin}^{25^\circ}) = 405,46 - 135,04 = 270,42 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.3)$$

$$Q_{vzv} = 1,3 \cdot 270,42 = 351,55 \text{ kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

Teplo přivedené do kotle

$$Q_p^p = Q_i^r + Q_{vzv} = 16000 + 351,55 = 16351,55 \text{ kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (3.4)$$

3.1.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (ztráta mechanickým nedopalem)

$$z_c = z_{cs} + z_{cú} [\%] \quad (3.5)$$

kde: z_{cs} - ztráta mechanickým nedopalem ve škváře nebo v strusce [%]

$$z_{cs} = \frac{C_s}{100 - C_s} \cdot \frac{X_s}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{cs} [\%] \quad (3.6)$$

kde: C_s - procento hořlaviny ve škváře

$C_s = 8 \%$ - dáno firemními podklady

X_s – procento popela škváry, vztaženo k celkovému množství popela

$X_s = 35 \%$ - dáno firemními podklady

Q_{cs} – výhřevnost uhlíku = $32\,600 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$z_{cs} = \frac{8}{100 - 8} \cdot \frac{35}{100} \cdot \frac{2}{16351,55} \cdot 32600 = 0,121 \%$$

$z_{cú}$ - ztráta mechanickým nedopalem v úletu [%]

$$z_{cú} = \frac{C_{ú}}{100 - C_{ú}} \cdot \frac{X_{ú}}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{cú} [\%] \quad (3.7)$$

kde: $C_{ú}$ - procento hořlaviny v úletu

$C_{ú} = 25 \%$ - odečteno z firemních podkladů

$X_{ú}$ – procento úletu, vztaženo k celkovému množství popela

$X_{ú} = 65 \%$ - odečteno z firemních podkladů

$Q_{cú}$ – výhřevnost uhlíku = $32\,600 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$z_{cú} = \frac{25}{100 - 25} \cdot \frac{65}{100} \cdot \frac{2}{16351,55} \cdot 32600 = 0,864 \%$$

$$z_c = 0,121 + 0,864 = 0,985 \%$$

Ztráta hořlavinou ve spalinách (ztráta chemickým nedopalem)

$$z_{co} = \frac{100 - z_c}{100} \cdot \frac{O_{sp} \cdot \omega_{CO} \cdot Q_{iCO}}{Q_p^p} [\%] \quad (3.8)$$

kde: ω_{CO} – maximální objem CO ve spalinách zadán zákazníkem (nebo normou) [%]

$$\omega_{CO} = 450 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^3_{\text{spalin}} = 0,036 \%$$

$Q_{iCO} = 12\,610 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^3$ – výhřevnost oxidu uhelnatého

$$z_{co} = \frac{100 - 0,985}{100} \cdot \frac{6,39 \cdot 0,036 \cdot 12610}{16351,55} = 0,176 \%$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování

$$z_f = z_{fs} + z_{fú} [\%] \quad (3.9)$$

kde: z_{fs} - ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků ve škváře nebo v strusce [%]

$$z_{fs} = \frac{X_s}{100 - C_s} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_f \cdot t_f [\%] \quad (3.10)$$

kde: t_f – teplota tuhých zbytků pod roštem

$t_f = 260^\circ\text{C}$ – odečteno z firemních podkladů

$c_f = 0,866 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ měrná tep. kapacita zbytků pro teplotu t_f

$$z_{fs} = \frac{35}{100 - 8} \cdot \frac{2}{16351,55} \cdot 260 \cdot 0,866 = 0,0105 [\%]$$

$z_{fú}$ - ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v úletu [%]

$$z_{fú} = \frac{X_u}{100 - C_u} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_u \cdot t_u [\%] \quad (3.11)$$

kde: t_u – teplota tuhých zbytků v úletu

$t_u = t_s = 160^\circ\text{C}$ – odečteno ze zadání

$c_u = 0,831 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ měrná tep. kap. tuhých zbytků pro teplotu

$$z_{fú} = \frac{65}{100 - 25} \cdot \frac{2}{16351,55} \cdot 160 \cdot 0,831 = 0,0141 [\%]$$

$$z_f = 0,0105 + 0,0141 = 0,025 \%$$

Ztráta citelným teplem spalín (komínová ztráta)

$$z_k = (100 - z_c) \cdot \frac{O_{sp} \cdot c_{sp} (t_s - t_{vz})}{Q_p^p} [\%] \quad (3.12)$$

kde: c_{sp} - měrná tepelná kapacita spalín za kotlem

$$c_{sp} = \frac{I_{sp}^{160^\circ\text{C}}}{O_{sp} \cdot t_s} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3.13)$$

kde: $I_{sp}^{160^\circ\text{C}} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$ – entalpie spalín na konci kotle (předpoklad 160°C)

$$I_{sp}^{160^\circ\text{C}} = I_{sp\text{min}}^{160^\circ\text{C}} + (\alpha - 1) \cdot I_{vz\text{min}}^{160^\circ\text{C}} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3.14)$$

$$I_{sp}^{160^\circ\text{C}} = 1086,96 + (1,39 - 1) \cdot 869,29 = 1417,29 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde: $I_{sp\text{min}}^{160^\circ\text{C}}, I_{vz\text{min}}^{160^\circ\text{C}}$ - entalpie odečtené z Graf 1.

$$c_{sp} = \frac{1417,29}{6,39 \cdot 160} = 1,386 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$z_k = (100 - 0,985) \cdot \frac{6,39 \cdot 1,386 \cdot (160 - 25)}{16351,55} = 7,24 \%$$

Ztráta sdílením tepla do okolí

- hodnota odečtena z grafu [1] ze závislosti na parním výkonu a náteru

$$z_{so} = 0,48 \%$$

Tepelná účinnost kotle při spalování dřevní štěpky

$$\eta_k = 100 - \Sigma z = 100 - (z_c + z_{co} + z_f + z_{so} + z_k) [\%] \quad (3.15)$$

$$\eta_k = 100 - (0,985 + 0,176 + 0,025 + 0,48 + 7,24) = 91,09 \%$$

3.1.3 Výrobní teplo páry a množství palivaVýrobní teplo páry

$$Q_V = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_o \cdot (i_o - i_{nv}) [kJ \cdot s^{-1}] \quad (3.16)$$

kde: $i_{pp} = 3434,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ - z i-s diagramu pro $t_p = 520^\circ\text{C}$ a $p_p = 9,3 \text{ MPa}$

$i_{nv} = 553 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ - z i-s diagramu při $t_{nv} = 130^\circ\text{C}$ a $p_{nv} = 10 \text{ MPa}$

$M_o = 1 \% \cdot M_{pp} = 0,56 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ - množství odluhu (dáno firemními podklady)

$i_o = 1395 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ - entalpie syté vody bubnu z i-s diagramu pro $p_b = 9,8 \text{ MPa}$

$$Q_V = 55,56 \cdot (3434,2 - 553) + 0,56 \cdot (1395 - 553) = 160551 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

Množství paliva

$$M_p = \frac{Q_V}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_k}{100}} = \frac{160551}{16351,55 \cdot \frac{91,09}{100}} = 10,78 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.17)$$

Skutečně spálené palivo (výpočtové)

$$M_{pv} = M_p \cdot \left(1 - \frac{z_c}{100}\right) = 10,78 \cdot \left(1 - \frac{0,985}{100}\right) = 10,68 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.18)$$

3.2 Hnědé uhlí

3.2.1 Teplo přivedené do kotle

Fyzické teplo paliva

- jelikož palivo není přehříváno cizím zdrojem, fyzické teplo se uvažuje pouze, když platí rovnost:

$$W_t^r \geq \frac{Q_r^i}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \quad (3.19)$$

$$10 \geq \frac{23000}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$

$10 \geq 36,6 \Rightarrow$ neplatí, s fyzickým teplem paliva tudíž nebude při výpočtu uvažováno

Teplo přivedené ohřátím vzduchu vnějším zdrojem mimo kotel

$$Q_{vzv} = \beta \cdot \Delta I_{vzmin} [\text{kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}] \quad (3.20)$$

kde: ΔI_{vzmin} – přírůstek entalpie min. množství vzduchu od teploty studeného vzduchu.

Předpokládám ohřátí vzduchu před vstupem do ohříváku vzduchu na teplotu 75 °C, entalpie jsou odečtené z *Graf 1*

$$\Delta I_{vzmin} = (I_{vzmin}^{75^\circ} - I_{vzmin}^{25^\circ}) = 599,75 - 199,73 = 400,02 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.21)$$

$$Q_{vzv} = 1,3 \cdot 400,02 = 520,03 \text{ kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

Teplo přivedené do kotle

$$Q_p^p = Q_i^r + Q_{vzv} = 23000 + 520,03 = 23520,03 \text{ kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (3.22)$$

3.2.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (ztráta mechanickým nedopalem)

$$z_c = z_{cs} + z_{cú} [\%] \quad (3.23)$$

kde: z_{cs} - ztráta mechanickým nedopalem ve škváře nebo v strusce [%]

$$z_{cs} = \frac{C_s}{100 - C_s} \cdot \frac{X_s}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{cs} [\%] \quad (3.24)$$

kde: C_s - procento hořlaviny ve škváře

$C_s = 8 \%$ - odečteno z firemních podkladů

X_s – procento popela škváry, vztaženo k celkovému množství popela

$X_s = 74 \%$ - odečteno z firemních podkladů

Q_{cs} – výhřevnost uhlíku = $32\,600 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$z_{cs} = \frac{8}{100 - 8} \cdot \frac{74}{100} \cdot \frac{15}{23520,03} \cdot 32600 = 1,34 \%$$

$z_{cú}$ - ztráta mechanickým nedopalem v úletu [%]

$$z_{cú} = \frac{C_ú}{100 - C_ú} \cdot \frac{X_ú}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{cú} [\%] \quad (3.25)$$

kde: $C_ú$ - procento hořlaviny v úletu

$C_ú = 25 \%$ - odečteno z firemních podkladů

$X_ú$ – procento úletu, vztaženo k celkovému množství popela

$X_ú = 26 \%$ - odečteno z firemních podkladů

$Q_{cú}$ – výhřevnost uhlíku = $32\,600 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$z_{cú} = \frac{25}{100 - 25} \cdot \frac{26}{100} \cdot \frac{15}{23520,03} \cdot 32600 = 1,8 \%$$

$$z_c = 1,34 + 1,8 = 3,14 \%$$

Ztráta hořlavinou ve spalínách (ztráta chemickým nedopalem)

$$z_{co} = \frac{100 - z_c}{100} \cdot \frac{O_{sp} \cdot \omega_{CO} \cdot Q_{iCO}}{Q_p^p} [\%] \quad (3.26)$$

kde: ω_{CO} – požadovaný maximální objem CO ve spalínách zadán zákazníkem [%]

$$\omega_{CO} = 450 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^3_{\text{spalin}} = 0,036 \%$$

$Q_{iCO} = 12\,610 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^3$ – výhřevnost oxidu uhelnatého

$$z_{co} = \frac{100 - 3,14}{100} \cdot \frac{7,97 \cdot 0,036 \cdot 12610}{23520,03} = 0,149 \%$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování

$$z_f = z_{fs} + z_{fú} [\%] \quad (3.27)$$

kde: z_{fs} - ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků ve škváře nebo v strusce [%]

$$z_{fs} = \frac{X_s}{100 - C_s} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_f \cdot t_f [\%] \quad (3.28)$$

kde: t_f – teplota tuhých zbytků pod roštem

$t_f = 260^\circ\text{C}$ – odečteno z firemních podkladů

$c_f = 0,866 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ měrné teplo tuhých zbytků pro teplotu t_f

$$z_{fs} = \frac{74}{100 - 8} \cdot \frac{15}{23520,03} \cdot 260 \cdot 0,866 = 0,116 [\%]$$

$z_{fú}$ - ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v úletu [%]

$$z_{fú} = \frac{X_u}{100 - C_u} \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_u \cdot t_u [\%] \quad (3.29)$$

kde: t_u – teplota tuhých zbytků v úletu

$t_u = t_s = 160^\circ\text{C}$ – odečteno ze zadání

$c_u = 0,831 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ měrné teplo tuhých zbytků pro teplotu t_u

$$z_{fú} = \frac{26}{100 - 25} \cdot \frac{15}{23520,03} \cdot 160 \cdot 0,831 = 0,029 [\%]$$

$$z_f = 0,116 + 0,029 = 0,145 \%$$

Ztráta sdílením tepla do okolí

- hodnota odečtena z grafu [1] ze závislosti na parním výkonu a nátěru

$$z_{so} = 0,48 \%$$

Ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta)

$$z_k = (100 - z_c) \cdot \frac{O_{sp} \cdot c_{sp}(t_s - t_{vz})}{Q_p^p} [\%] \quad (3.30)$$

kde: c_{sp} - měrná tepelná kapacita spalin za kotlem

$$c_{sp} = \frac{I_{sp}^{160^\circ C}}{O_{sp} \cdot t_s} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3.31)$$

kde: $I_{sp}^{160^\circ C}$ [kJ · kg⁻¹] – entalpie spalin za kotlem (předpoklad 160 °C)

$$I_{sp}^{160^\circ C} = I_{spmin}^{160^\circ C} + (\alpha - 1) \cdot I_{vzmin}^{160^\circ C} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3.32)$$

$$I_{sp}^{160^\circ C} = 1446,36 + (1,39 - 1) \cdot 1285,52 = 1947,71 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde: $I_{spmin}^{160^\circ C}$, $I_{vzmin}^{160^\circ C}$ - entalpie odečtené z Graf 3.

$$c_{sp} = \frac{1947,71}{7,97 \cdot 160} = 1,527 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$z_k = (100 - 3,14) \cdot \frac{7,97 \cdot 1,527 \cdot (160 - 25)}{23520,03} = 6,77 \%$$

Tepelná účinnost kotle při spalování hnědého uhlí

$$\eta_k = 100 - \Sigma z = 100 - (z_c + z_{co} + z_f + z_{so} + z_k) [\%] \quad (3.33)$$

$$\eta_k = 100 - (3,14 + 0,149 + 0,145 + 0,48 + 6,77) = 89,32 \%$$

3.2.3 Výrobní teplo páry a množství palivaVýrobní teplo páry

$$Q_v = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_o \cdot (i_o - i_{nv}) [\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.34)$$

kde: $i_{pp} = 3434,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ - z i-s diagramu pro $t_p = 520^\circ\text{C}$ a $p_p = 9,3 \text{ MPa}$

$i_{nv} = 553,11 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ - z i-s diagramu při $t_{nv} = 130^\circ\text{C}$ a $p_{nv} = 10 \text{ MPa}$

$M_o = 1 \% \cdot M_{pp} = 0,56 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ - množství odluhu (dle firemních podkladů)

$i_o = 1395 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ - entalpie syté vody v bubnu z i-s diagramu pro $p_b = 9,95 \text{ MPa}$

$$Q_v = 55,56 \cdot (3434,2 - 553,11) + 0,56 \cdot (1395 - 553,11) = 160551 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$$

Množství paliva

$$M_p = \frac{Q_v}{Q_p^p \cdot \frac{\eta_k}{100}} = \frac{160551}{23520,03 \cdot \frac{89,32}{100}} = 7,64 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.35)$$

Skutečně spálené palivo (výpočtové)

$$M_{pv} = M_p \cdot \left(1 - \frac{z_c}{100}\right) = 7,64 \cdot \left(1 - \frac{3,14}{100}\right) = 7,4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.36)$$

4 Výpočet spalovací komory

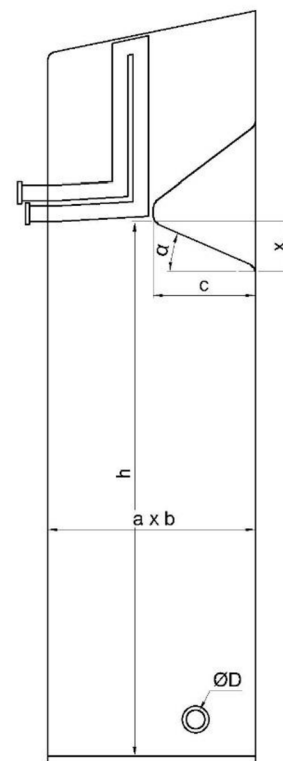
- výpočet spalovací komory bude probíhat kontrolním tepelným výpočtem, kde se pro zadané konstrukční rozměry firemními podklady vypočte teplota spalin na výstupu z ohniště

4.1 Konstrukční rozměry spalovací komory

- jsou dány firemními podklady

Tab. 6 Rozměry spalovací komory

	Značení	Rozměr	Jednotka
Šířka	a	7,055	[m]
Délka	b	13,005	[m]
Výška	h	19,12	[m]
Šířka zúžení	c	3,655	[m]
Výška zúžení	x	1,63	[m]
Úhel zúžení	α	24	[°]
Průměr vlezového otvoru	D	0,68	[m]



Obrázek 1. Náčrt spalovací komory

Aktivní objem ohniště

$$V_0 = a \cdot b \cdot h - \left(\frac{x \cdot c}{2} \cdot b \right) \quad [\text{m}^3] \quad (4.1)$$

$$V_0 = 7,055 \cdot 13,005 \cdot 19,12 - \left(\frac{1,63 \cdot 3,4}{2} \cdot 13,005 \right) = 1718,23 \text{ m}^3$$

Plocha roštu

$$S_R = a \cdot b = 7,055 \cdot 13,005 = 91,75 \text{ m}^2 \quad (4.2)$$

Plocha výstupního otvoru

$$S_2 = (a - c) \cdot b = (7,055 - 3,4) \cdot 13,005 = 47,53 \text{ m}^2 \quad (4.3)$$

Průřez vlezového otvoru

$$S_D = \pi \cdot D^2 = \pi \cdot 0,68^2 = 1,45 \text{ m}^2 \quad (4.4)$$

Povrch stěn ohniště

$$S_{ST} = S_R + S_2 + b \cdot (2 \cdot h - x) + 2 \cdot (a \cdot h) - x \cdot c + \frac{x}{\sin \alpha} \cdot b \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.5)$$

$$S_{ST} = 91,75 + 47,53 + 13,005 \cdot (2 \cdot 19,12 - 1,63) + 2 \cdot 7,055 \cdot 19,12 - 1,63 \cdot 3,655 + \\ + \frac{1,63}{\sin 24^\circ} \cdot 13,005 = 879,22 \text{ m}^2$$

Aktivní plocha pro převzetí tepla (účinná sálavá plocha stěn ohniště)

$$S_{\dot{U}S} = S_{ST} - S_R - S_D = 879,22 - 91,75 - 1,45 = 786,02 \text{ m}^2 \quad (4.6)$$

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{S_{st}} = 3,6 \cdot \frac{1718,23}{879,22} = 7,04 \text{ m} \quad (4.7)$$

4.2 Porovnávací kritéria ohniště**4.2.1 Dřevní štěpka**Objemové tepelné zatížení ohniště

$$q_V = \frac{M_{pv} \cdot Q_R^i}{V_0} = \frac{10,68 \cdot 16000}{1718,23} = 99,45 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.8)$$

Střední měrný tepelný tok roštu

$$q_R = \frac{M_{pv} \cdot Q_R^i}{S_R} = \frac{10,68 \cdot 16000}{91,75} = 1862,45 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \quad (4.9)$$

4.2.2 Hnědé uhlíObjemové tepelné zatížení ohniště

$$q_V = \frac{M_{pv} \cdot Q_R^i}{V_0} = \frac{7,4 \cdot 23000}{1718,23} = 99,06 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.10)$$

Střední měrný tepelný tok roštu

$$q_R = \frac{M_{pv} \cdot Q_R^i}{S_R} = \frac{7,4 \cdot 23000}{91,75} = 1855,04 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \quad (4.11)$$

4.3 Výpočet teploty spalin na výstupu z ohniště

Teplota spalin na konci ohniště se pro zadané rozměry spalovací komory určí metodou postupného přiblížení. Předem se zadá hodnota teploty spalin na výstupu z ohniště a pro ni se postupně určí všechny faktory obsažené ve vzorcích nebo v diagramech. V případě, že se vypočtená hodnota teploty spalin liší od předem o více než 50°C je nutné výpočet opakovat. Jako konečná hodnota teploty spalin se uvažuje vypočtená teplota z posledního přiblížení. [1]

4.3.1 Dřevní štěpka

- pro výpočet odhaduji teplotu spalin na konci ohniště $t_0 = 929 \text{ °C}$

Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{z_{SO}}{\eta_k + z_{SO}} = 1 - \frac{0,48}{91,09 + 0,48} = 0,995 [-] \quad (4.12)$$

Teplo přivezené do kotle se vzduchem

$$Q_{vz} = (\alpha_0 - \Delta\alpha_0) \cdot I_{vzmiin}^{190^\circ\text{C}} + \Delta\alpha_0 \cdot I_{vzmiin}^{25^\circ\text{C}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.13)$$

kde: $I_{vzmiin}^{170^\circ\text{C}}$ - entalpie minimálního množství vzduchu pro střední teplotu přiváděného horkého vzduchu $t_{vz}^{str} = 170 \text{ °C}$ z Graf 1

$$I_{vzmiin}^{170^\circ\text{C}} = 924 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q_{vz} = (1,35 - 0,05) \cdot 924 + 0,05 \cdot 135,04 = 1207,95 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - z_{CO} - z_C - z_f}{100 - z_C} + Q_{vz} - Q_{vzv} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.14)$$

$$I_u = 16351,55 \cdot \frac{100 - 0,176 - 0,985 - 0,025}{100 - 0,985} + 1207,95 - 351,55 = 17174,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Střední celkové měrné teplo spalin

$$\overline{O_{sp} \cdot c} = \frac{I_u - I_0'}{t_a - t_0} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4.15)$$

kde: I_0' - entalpie spalin při teplotě t_0 a přebytku vzduchu $\alpha=1,35$, odečteno z Graf 1

$$I_0' = 8915,197 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

t_a - adiabatická teplota plamene, odečtena z Graf 1 pro I_u a $\alpha=1,35$

$$t_a = 1673,4 \text{ °C}$$

$$\overline{O_{sp} \cdot c} = \frac{17174,82 - 8915,2}{1673,4 - 929} = 11,1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn

$$\bar{\Psi} = \frac{\sum x_i \cdot \varepsilon_i \cdot S_i}{S_{st}} = \frac{x_{st} \cdot \varepsilon \cdot S_{st}}{S_{st}} = x \cdot \xi = 1 \cdot 0,45 = 0,45 [-] \quad (4.16)$$

kde: $x_{st} = 1$ – úhlový součinitel pro membránové stěny (odečteno z [1])

$\varepsilon = 0,45$ – součinitel zanešení stěn ohniště (odečteno z [1])

Boltzmannovo číslo

$$B_0 = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp}} \cdot c}{k_b \cdot \bar{\Psi} \cdot S_{st} \cdot T_a^3} = \frac{0,995 \cdot 10,68 \cdot 11,1}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,45 \cdot 879,22 \cdot (1673,4 + 273,15)^3} = 0,712 [-] \quad (4.17)$$

kde: k_b – Boltzmannova konstanta [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$] odečtena z [1]

$$k_b = 5,7 \cdot 10^{-11} \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{sp} [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (4.18)$$

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

$$r_{sp} = r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{RO}_2} = 0,13 + 0,133 = 0,263 [-] \quad (4.19)$$

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

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,263 = 0,026 \text{ MPa} \quad (4.20)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,13}{3,16 \cdot \sqrt{0,026 \cdot 7,04}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1215,15}{1000} \right) \cdot 0,263 = 0,936 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_0^2 \cdot d_p^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1202,15^2 \cdot 20^2}} \cdot 2,077 = 0,107 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.21)$$

kde: d_p – střední průměr částecek popílku pro roštové ohniště [μm] (odečteno z [1])

μ – hmotová koncentrace popílku ve spalinách z rovnice (2.19)

Součinitel zeslabení sálání

$$k_{celk} = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 \quad (4.22)$$

kde: $k_k = 1$ – součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi [-] (odečteno z [1])

$\kappa_1 = 0,5$ – součinitel závislý na druhu paliva [-] (odečteno z [1])

$\kappa_2 = 0,03$ – součinitel závislý na způsobu spalování [-] (odečteno z [1])

$$k_{celk} = 0,936 + 0,107 + 10 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,03 = 1,194 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Efektivní stupeň černosti plamene v ohništi

$$a_{pl} = 1 - e^{-k_{celk} \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,194 \cdot 0,1 \cdot 7,04} = 0,557 [-] \quad (4.23)$$

kde: p – tlak v ohništi [MPa], u kotlů bez přetlaku se bere $p = 0,1$ MPa [1]

Stupeň černosti ohniště

$$a_0 = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{S_R}{S_{ST}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \bar{\Psi}) \cdot \left(1 - \frac{S_R}{S_{ST}}\right)} [-] \quad (4.24)$$

$$a_0 = \frac{0,557 + (1 - 0,557) \cdot \frac{91,75}{879,22}}{1 - (1 - 0,557) \cdot (1 - 0,45) \cdot \left(1 - \frac{91,75}{879,22}\right)} = 0,772 [-]$$

Výpočtová teplota spalin na konci ohniště

$$t_0 = \frac{t_a + 273}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273 = \frac{1673,4 + 273}{1 + 0,59 \cdot \left(\frac{0,771}{0,725}\right)^{0,6}} - 273 = \underline{928,77 \text{ °C}} \quad (4.25)$$

kde: $M = 0,59$ [-] - součinitel M určen dle firemních zkušeností

Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn

$$Q_{st} = \varphi \cdot (I_u - I_o) = 0,995 \cdot (17174,82 - 8915,2) = 8220,73 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (4.26)$$

kde: I_o – entalpie spalin na konci ohniště pro t_0 odečteno z Graf 1

$$I_o = 8915,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Střední tepelné zatížení stěn ohniště

$$\bar{q} = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot (I_u - I_o)}{S_{ús}} = \frac{0,995 \cdot 10,68 \cdot (17174,82 - 8915,2)}{786,02} = 111,7 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \quad (4.27)$$

4.3.2 Hnědé uhlí

- pro výpočet odhaduji teplotu spalin na konci ohniště $t'_0 = 931 \text{ °C}$

Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{z_{SO}}{\eta_k + z_{SO}} = 1 - \frac{0,48}{89,316 + 0,48} = 0,995 \text{ [-]} \quad (4.28)$$

Teplo přivedené do kotle se vzduchem

$$Q_{vz} = (\alpha_0 - \Delta\alpha_0) \cdot I_{vzmiin}^{145^\circ\text{C}} + \Delta\alpha_0 \cdot I_{vzmiin}^{25^\circ\text{C}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.29)$$

kde: $I_{vzmiin}^{145^\circ\text{C}}$ - entalpie minimálního množství vzduchu pro střední teplotu přiváděného horkého vzduchu $t_{vz}^{str} = 145 \text{ °C}$ z Graf 3

$$I_{vzmiin}^{145^\circ\text{C}} = 1164,17 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q_{vz} = (1,35 - 0,05) \cdot 1164,17 + 0,05 \cdot 199,73 = 1523,41 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - z_{CO} - z_C - z_f}{100 - z_C} + Q_{vz} - Q_{vzv} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.30)$$

$$I_u = 23597,13 \cdot \frac{100 - 0,149 - 3,14 - 0,145}{100 - 3,14} + 1523,41 - 520,03 = 24528,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Střední celkové měrné teplo spalin

$$\overline{O_{sp} \cdot c} = \frac{I_u - I'_0}{t_a - t_0} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4.31)$$

kde: I'_0 - entalpie spalin při teplotě t_0 a přebytku vzduchu $\alpha = 1,35$, odečteno z Graf 3

$$I'_0 = 12145,98 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

t_a - adiabatická teplota plamene, odečtena z Graf 3 pro I_u a $\alpha = 1,35$

$$t_a = 1755,48 \text{ °C}$$

$$\overline{O_{sp} \cdot c} = \frac{24528,9 - 12145,98}{1755,48 - 931} = 15,02 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn

$$\overline{\Psi} = \frac{\sum x_i \cdot \varepsilon_i \cdot S_i}{S_{st}} = \frac{x \cdot \varepsilon \cdot S_{st}}{S_{st}} = x \cdot \xi = 1 \cdot 0,45 = 0,45 \text{ [-]} \quad (4.32)$$

kde: $x = 1$ - úhlový součinitel pro membránové stěny (odečteno z [1])

$\varepsilon = 0,45$ - součinitel zanešení stěn ohniště (odečteno z [1])

Boltzmannovo číslo

$$B_0 = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp}} \cdot c}{k_b \cdot \bar{\Psi} \cdot S_{st} \cdot T_a^3} = \frac{0,995 \cdot 7,4 \cdot 15,02}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,45 \cdot 879,22 \cdot (1755,48 + 273,15)^3} = 0,59 [-] \quad (4.33)$$

kde: k_b - Boltzmannova konstanta [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]

$$k_b = 5,7 \cdot 10^{-11} \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{sp} [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}] \quad (4.34)$$

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

$$r_{sp} = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,07 + 0,134 = 0,205 [-] \quad (4.35)$$

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

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,202 = 0,0205 \text{ MPa} \quad (4.36)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,071}{3,16 \cdot \sqrt{0,0205 \cdot 7,04}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1207,24}{1000} \right) \cdot 0,202 = 0,734 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_0^2 \cdot d_p^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{1204,15^2 \cdot 20^2}} \cdot 4,53 = 0,234 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.37)$$

kde: d_p – střední průměr částicek popílku pro roštové ohniště [μm] (odečteno z [1])

μ – hmotová koncentrace popílku ve spalinách z rovnice (2.41)

Součinitel zeslabení sálání

$$k_{celk} = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 \quad (4.38)$$

kde: $k_k = 1$ – součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi [-] (odečteno z [1])

$\kappa_1 = 0,5$ – součinitel závislý na druhu paliva [-] (odečteno z [1])

$\kappa_2 = 0,03$ – součinitel závislý na způsobu spalování [-] (odečteno z [1])

$$k_{celk} = 0,734 + 0,234 + 10 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,03 = 1,194 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Efektivní stupeň černosti plamene v ohništi

$$a_{pl} = 1 - e^{-k_{celk} \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,194 \cdot 0,1 \cdot 7,04} = 0,557 [-] \quad (4.39)$$

kde: p – tlak v ohništi [MPa], u kotlů bez přetlaku se bere $p = 0,1 \text{ MPa}$ [1]

Stupeň černosti ohniště

$$a_0 = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{S_R}{S_{ST}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \bar{\Psi}) \cdot (1 - \frac{S_R}{S_{ST}})} \quad [-] \quad (4.40)$$

$$a_0 = \frac{0,557 + (1 - 0,557) \cdot \frac{91,75}{879,22}}{1 - (1 - 0,557) \cdot (1 - 0,45) \cdot (1 - \frac{91,75}{879,22})} = 0,756 \quad [-]$$

Výpočtová teplota spalin na konci ohniště

$$t_0 = \frac{t_a + 273}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273 = \frac{1755,48 + 273}{1 + 0,59 \cdot \left(\frac{0,756}{0,59}\right)^{0,6}} - 273 = \underline{930,76 \text{ °C}} \quad (4.41)$$

kde: $M = 0,59 \quad [-]$ - součinitel M určen dle firemních zkušeností

Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn

$$Q_{st} = \varphi \cdot (I_u - I_o) = 0,995 \cdot (24528,88 - 12142,51) = 12324,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (4.42)$$

kde: I_o – entalpie spalin na konci ohniště pro t_0 odečteno z Graf 3

$$I_o = 12142,51 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Střední tepelné zatížení stěn ohniště

$$\bar{q} = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot (I_u - I_o)}{S_{ús}} = \frac{0,995 \cdot 7,4 \cdot (24528,88 - 12142,51)}{786,02} = 116,03 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \quad (4.43)$$

5 Výpočet konvekčních ploch

5.1 Uspořádání jednotlivých stupňů konvekčních ploch

5.1.1 Přehřívák

Rozdělení přehříváku je provedeno na čtyři stupně. Třetí stupeň (ve směru proudění média) je tvořen deskovým, sálavým svazkem. Ostatní tři stupně jsou tvořeny konvekčními svazky z hladkých trubek uspořádanými za sebou. Mezi posledními třemi stupni jsou realizovány vstříky napájecí vody.

Tab. 7 Uspořádání stupňů přehříváku

Stupeň (ve směru proudění páry)	Název	Značení	Typ	Materiál
1.	Ohřívák 1/ Superheater 1	SH1	trubkový/jedno-had	13 CrMo 4-4
2.	Ohřívák 2/ Superheater 2	SH2	trubkový/jedno-had	13 CrMo 4-4
3.	Ohřívák 3/ Superheater 3	SH3	deskový	10 CrMo9 10
4.	Ohřívák 4/ Superheater 4	SH4	trubkový/dvoj-had	10 CrMo9 10

5.1.2 Výparník

Konstrukce výparníku je provedena jako membránová stěna. Cirkulační smyčka výparníku začíná i končí v bubnu, který je situován nad stropem kotle. Průchod spalinovým kanálem je tvořen mříží z hladkých, vystřídáných trubek.

Tab. 8 Uspořádání stupňů výparníku

Stupeň	Název	Značení	Typ	Materiál
1.	Výparník / Evaporator	EV	membránová stěna	15 Mo 3

5.1.3 Ekonomizér

Ohřívání napájecí vody v ekonomizéru je rozděleno na dva stupně. První stupeň je tvořen žebrovanými trubkami, druhý trubkami hladkými uspořádanými za sebou. Ekonomizér je navrhnut tak, aby v něm docházelo k ohřátí vody pod teplotu nasycení.

Tab. 9 Uspořádání stupňů ekonomizéru

Stupeň	Název	Značení	Typ	Materiál
1.	Ekonomizér 1/ Economiser 1	ECO1	trubkový (žebro)	15 Mo 3
2.	Ekonomizér 2/ Economiser 2	ECO2	trubkový	15 Mo 3

5.1.4 Ohřívák vzduchu

Ohřívání spalovacího vzduchu je realizováno dvoustupňovým ohřívákem. Stupně jsou tvořeny hladkými trubkami uspořádanými za sebou. Množství vzduchu ohřátého v druhém stupni je ovlivněno druhem spalovaného paliva (množstvím prchavé hořlaviny v palivu).

Tab. 10 Uspořádání stupňů ohříváku vzduchu

Stupeň	Název	Značení	Typ	Materiál
1.	Ohřívák vzduchu 1/ Air heater 1	AH1	trubkový	15 Mo 3
2.	Ohřívák vzduchu 2/ Air heater 2	AH2	trubkový	15 Mo 3

5.2 Návrhové teploty média pro konvekční plochy

Entalpie vody a páry pro navržené teploty jsou určeny pomocí softwaru XSteam. Tlakové ztráty jednotlivých svazků jsou dány firemními zkušenostmi. Teplota páry na výstupu z bubnu je dána teplotou nasycení při tlaku 9,95 MPa.

5.2.1 Dřevní štěpka

Tab. 11 Návrhové hodnoty teplot na straně vody/páry a tlakové ztráty konvekčních ploch (dřevní štěpka)

Konvekční plocha	Teplota média [°C]		Entalpie média [kJ.kg ⁻¹]		Tlaková ztráta [MPa]	Tlak [MPa]	
	Vstupní t_{in}	Výstupní t_{out}	Vstupní i_{in}	Výstupní i_{out}	Δp_z	Vstupní p_{in}	Výstupní p_{out}
SH4	452	520	3256,3	3434,2	0,15	9,45	9,3
SH3	400	462	3106	3283,1	0,15	9,6	9,45
SH2	418	478	3156,4	3323,1	0,15	9,75	9,6
SH1	310,63	418	2726,4	3156,4	0,2	9,95	9,75
EV	231	310,63	1005,6	2726,4	0	9,95	9,95
ECO2	183	233	780,95	1005,6	0,1	10,05	9,95
ECO1	130	183	553,11	780,95	0,2	10,25	10,05
AH2	115	200	623,1	1088,1	-	-	-
AH1	75	115	404,3	623,1	-	-	-

5.2.2 Hnědé uhlí

Tab. 12 Návrhové hodnoty teplot na straně vody/páry a tlakové ztráty konvekčních ploch (hnědé uhlí)

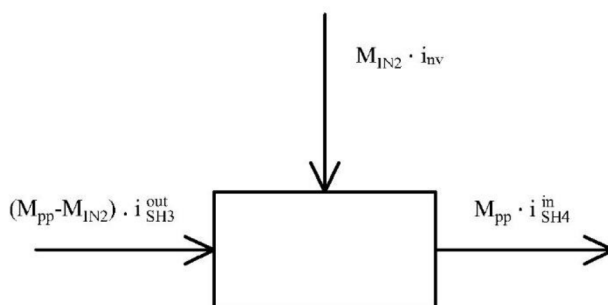
Konvekční plocha	Teplota média [°C]		Entalpie média [kJ.kg ⁻¹]		Tlaková ztráta [MPa]	Tlak [MPa]	
	Vstupní t_{in}	Výstupní t_{out}	Vstupní i_{in}	Výstupní i_{out}	Δp_z	Vstupní p_{in}	Výstupní p_{out}
SH4	452	520	3256,3	3434,2	0,15	9,45	9,3
SH3	400	462	3106	3283,1	0,15	9,6	9,45
SH2	408	467,5	3126,9	3295,5	0,15	9,75	9,6
SH1	310,63	408	2726,4	3126,9	0,2	9,95	9,75
EV	225	310,63	968,71	2726,4	0	9,95	9,95
ECO2	179	225	763,47	968,71	0,1	10,05	9,95
ECO1	130	179	553,11	763,47	0,2	10,25	10,05
AH2	115	220	921,5	1773,8			
AH1	75	115	597,9	921,5			

5.3 Bilance vstříků

Pro dodržení přesnosti výstupní teploty páry je nutno teplotu páry regulovat. Regulace teploty páry je prováděna pomocí vstříků napájecí vody mezi stupně přehříváku. Při změně provozních parametrů nebo při najíždění kotle lze množství vstříků upravovat dle požadavků.

5.3.1 Vstřík 2

Slouží přednostně pro regulaci teploty páry při najíždění kotle, kdy zabraňuje tepelnému poškození trubek posledního přehříváku SH4. Vstřík 2 je umístěn mezi stupni přehříváku SH4 a SH3. Při jmenovitém výkonu kotle je skoro uzavřen – reguluje teplotu páry pouze o 10 °C.



Obrázek 2. Bilance Vstříku 2

5.3.1.1 Dřevní štěpka

$$(M_{pp} - M_{IN2}) \cdot i_{SH3}^{out} + M_{IN2} \cdot i_{nv} = M_{pp} \cdot i_{SH4}^{in} \quad (5.1)$$

kde: M_{IN2} – množství napájecí vody ve Vstříku 2 [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

$$M_{IN2} = M_{pp} \cdot \frac{(i_{SH4}^{in} - i_{SH3}^{out})}{(i_{nv} - i_{SH3}^{out})} = 55,56 \cdot \frac{(3256,3 - 3283,1)}{(553,11 - 3283,1)} = 0,545 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

5.3.1.2 Hnědé uhlí

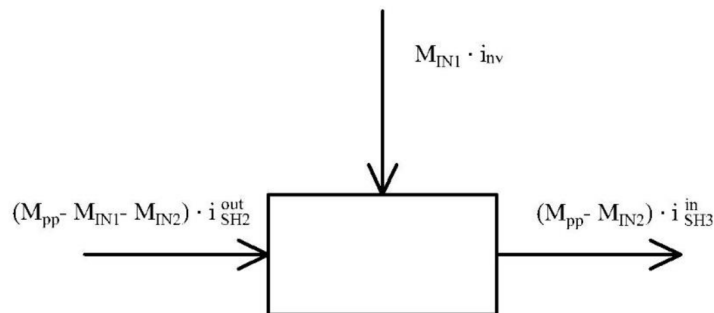
$$(M_{pp} - M_{IN2}) \cdot i_{SH3}^{out} + M_{IN2} \cdot i_{nv} = M_{pp} \cdot i_{SH4}^{in} \quad (5.2)$$

kde: M_{IN2} – množství napájecí vody ve Vstříku 2 [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

$$M_{IN2} = M_{pp} \cdot \frac{(i_{SH4}^{in} - i_{SH3}^{out})}{(i_{nv} - i_{SH3}^{out})} = 55,56 \cdot \frac{(3256,3 - 3283,1)}{(553,11 - 3283,1)} = 0,545 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

5.3.2 Vstřík 1

Hlavní regulace teploty páry je realizována Vstříkem 1 mezi stupni přehříváku SH2 a SH3. Zabezpečuje přesnost teploty výstupní páry a chrání materiál sálavého přehříváku SH3.



Obrázek 3. Bilance Vstříku 1

5.3.2.1 Dřevní štěpka

$$(M_{pp} - M_{IN1} - M_{IN2}) \cdot i_{SH2}^{out} + M_{IN1} \cdot i_{nv} = (M_{pp} - M_{IN2}) \cdot i_{SH3}^{in} \quad (5.3)$$

kde: M_{IN1} - množství napájecí vody ve Vstříku 1 [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

$$M_{IN1} = (M_{pp} - M_{IN2}) \cdot \frac{(i_{SH3}^{in} - i_{SH2}^{out})}{(i_{nv} - i_{SH2}^{out})} = (55,56 - 0,5454) \cdot \frac{(3106 - 3323,1)}{(553,11 - 3323,1)} = 4,31 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

5.3.2.2 Hnědé uhlí

$$(M_{pp} - M_{IN1} - M_{IN2}) \cdot i_{SH2}^{out} + M_{IN1} \cdot i_{nv} = (M_{pp} - M_{IN2}) \cdot i_{SH3}^{in} \quad (5.4)$$

kde: M_{IN1} - množství napájecí vody ve Vstříku 1 [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

$$M_{IN1} = (M_{pp} - M_{IN2}) \cdot \frac{(i_{SH3}^{in} - i_{SH2}^{out})}{(i_{nv} - i_{SH2}^{out})} = (55,56 - 0,5454) \cdot \frac{(3106 - 3295,5)}{(553,11 - 3295,5)} = 3,8 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

5.4 Návrhový tepelný výkon konvekčních ploch

5.4.1 Dřevní štěpka

5.4.1.1 Přehřívák

Návrhový tepelný výkon přehříváku SH4

$$Q_{SH4} = M_{pp} \cdot (i_{SH4}^{out} - i_{SH4}^{in}) = 55,56 \cdot (3434,2 - 3256,3) = 9884,12 \text{ kW} \quad (5.5)$$

Návrhový tepelný výkon přehříváku SH3

$$Q_{SH3} = (M_{pp} - M_{IN1}) \cdot (i_{SH3}^{out} - i_{SH3}^{in}) \text{ [kW]} \quad (5.6)$$

$$Q_{SH3} = (55,56 - 0,545) \cdot (3283,1 - 3106) = 9743,08 \text{ kW}$$

Návrhový tepelný výkon přehříváku SH2

$$Q_{SH2} = (M_{pp} - M_{IN2} - M_{IN1}) \cdot (i_{SH2}^{out} - i_{SH2}^{in}) \text{ [kW]} \quad (5.7)$$

$$Q_{SH2} = (55,56 - 0,545 - 4,31) \cdot (3325,7 - 3159,3) = 8452,15 \text{ kW}$$

Návrhový tepelný výkon přehříváku SH1

$$Q_{SH1} = (M_{pp} - M_{IN2} - M_{IN1}) \cdot (i_{SH1}^{out} - i_{SH1}^{in}) \text{ [kW]} \quad (5.8)$$

$$Q_{SH1} = (55,56 - 0,545 - 4,31) \cdot (3159,3 - 2726,4) = 21802,19 \text{ kW}$$

5.4.1.2 Výparník

Teplota vstupující vody do výparníku je od teploty nasycení nižší o tzv. nedohřev. Nedohřátí vody na teplotu nasycení se realizuje, pro zabezpečení přívodu vody do bubnu i při nenávrhových chodech kotle - nikoliv parovodní směsi. Dle firemních zkušeností volím při spalování dřevní štěpky nedohřev $t_{nh} = 79,63^\circ\text{C}$

$$Q_{EV} = (M_{pp} - M_{IN2} - M_{IN1}) \cdot (i_{EV}^{out} - i_{EV}^{in}) + M_O \cdot (i' - i_{EV}^{in}) \quad (5.9)$$

kde: $i_{EV}^{out} = i'' = 2726,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ - entalpie syté páry při tlaku 9,95 MPa

$i' = 1405,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ - entalpie syté kapaliny při tlaku 9,95 MPa

$$Q_{EV} = (55,56 - 0,545 - 4,31) \cdot (2726,4 - 1005,6) + 0,56 \cdot (1405,7 - 1005,6) = 87473,4 \text{ kW}$$

5.4.1.3 Ekonomizér

Návrhový tepelný výkon ekonomizéru ECO2

$$Q_{ECO2} = (M_{pp} - M_{IN2} - M_{IN1} + M_O) \cdot (i_{ECO2}^{out} - i_{ECO2}^{in}) \text{ [kW]} \quad (5.10)$$

$$Q_{ECO2} = (55,56 - 0,545 - 4,31 + 0,56) \cdot (1005,6 - 780,95) = 11516,2 \text{ kW}$$

Návrhový tepelný výkon ekonomizéru ECO1

$$Q_{ECO1} = (M_{pp} - M_{IN2} - M_{IN1} + M_O) \cdot (i_{ECO1}^{out} - i_{ECO1}^{in}) \text{ [kW]} \quad (5.11)$$

$$Q_{ECO1} = (55,56 - 0,545 - 4,31 + 0,56) \cdot (780,95 - 553,11) = 11679,7 \text{ kW}$$

5.4.1.4 Ohřívák vzduchu

Ohřívání spalovacího vzduchu probíhá ve dvoustupňovém ohříváku. Vzduch je v prvním stupni předehříván na teplotu primárního vzduchu. Část vzduchu použitá pro sekundární vzduch je potom ohřívána v druhém stupni na požadovanou teplotu. Teploty spalovacích vzduchů jsou dány firemními zkušenostmi následovně: - primární vzduch $t_{\text{prim}}=115^{\circ}\text{C}$
- sekundární vzduch $t_{\text{sek}}=200^{\circ}\text{C}$

Rozdělení spalovacího vzduchu je dáno procentem prchavé hořlaviny v palivu a firemními zkušenostmi následovně: - primární $x_{\text{prim}}=0,35$ [-]
- sekundární $x_{\text{sek}}=0,65$ [-]

Návrhový tepelný výkon AH1

$$Q_{\text{AH1}} = M_{\text{pv}} \cdot \beta \cdot (I_{\text{vzmin}}^{115^{\circ}\text{C}} - I_{\text{vzmin}}^{75^{\circ}\text{C}}) \text{ [kW]} \quad (5.12)$$

kde: $I_{\text{vzmin}}^{75^{\circ}\text{C}}$ - entalpie minimálního množství vzduchu pro $t_{\text{AH1}}^{\text{in}} = 75^{\circ}\text{C}$ odečtena z Graf 1

$$I_{\text{vzmin}}^{75^{\circ}\text{C}} = 404,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$I_{\text{vzmin}}^{115^{\circ}\text{C}}$ - entalpie minimálního množství vzduchu pro $t_{\text{AH1}}^{\text{out}} = 115^{\circ}\text{C}$ odečtena z Graf 1

$$I_{\text{vzmin}}^{115^{\circ}\text{C}} = 623,12 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q_{\text{AH1}} = 10,68 \cdot 1,3 \cdot (623,12 - 404,3) = 3038,12 \text{ kW}$$

Návrhový tepelný výkon AH2

$$Q_{\text{AH1}} = x_{\text{sek}} \cdot M_{\text{pv}} \cdot \beta \cdot (I_{\text{vzmin}}^{200^{\circ}\text{C}} - I_{\text{vzmin}}^{115^{\circ}\text{C}}) \text{ [kW]} \quad (5.13)$$

kde: $I_{\text{vzmin}}^{200^{\circ}\text{C}}$ - entalpie minimálního množství vzduchu pro $t_{\text{AH2}}^{\text{out}} = 200^{\circ}\text{C}$ odečtena z Graf 1

$$I_{\text{vzmin}}^{200^{\circ}\text{C}} = 1088,11 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q_{\text{AH1}} = 0,65 \cdot 10,68 \cdot 1,3 \cdot (1088,11 - 623,12) = 4196,4 \text{ kW}$$

5.4.2 Hnědé uhlí

5.4.2.1 Přehřívák

Návrhový tepelný výkon přehříváku SH4

$$Q_{SH4} = M_{pp} \cdot (i_{SH4}^{out} - i_{SH4}^{in}) = 55,56 \cdot (3434,2 - 3256,3) = 9884,12 \text{ kW} \quad (5.14)$$

Návrhový tepelný výkon přehříváku SH3

$$Q_{SH3} = (M_{pp} - M_{IN1}) \cdot (i_{SH3}^{out} - i_{SH3}^{in}) \text{ [kW]} \quad (5.15)$$

$$Q_{SH3} = (55,56 - 0,545) \cdot (3283,1 - 3106) = 9743,08 \text{ kW}$$

Návrhový tepelný výkon přehříváku SH2

$$Q_{SH2} = (M_{pp} - M_{IN2} - M_{IN1}) \cdot (i_{SH2}^{out} - i_{SH2}^{in}) \text{ [kW]} \quad (5.16)$$

$$Q_{SH2} = (55,56 - 0,545 - 3,8) \cdot (3295,5 - 3126,9) = 8634,52 \text{ kW}$$

Návrhový tepelný výkon přehříváku SH1

$$Q_{SH1} = (M_{pp} - M_{IN2} - M_{IN1}) \cdot (i_{SH1}^{out} - i_{SH1}^{in}) \text{ [kW]} \quad (5.17)$$

$$Q_{SH1} = (55,56 - 0,545 - 3,8) \cdot (3126,4 - 2726,4) = 20510,83 \text{ kW}$$

5.4.2.2 Výparník

Teplota vstupující vody do výparníku je od teploty nasycení nižší o tzv. nedohřev. Nedohřátí vody na teplotu nasycení se realizuje, pro zabezpečení přívodu vody do bubnu i při nenávrhových chodech kotle - nikoliv parovodní směsi. Dle firemních zkušeností volím při spalování hnědého uhlí nedohřev $t_{nh} = 85,63 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{EV} = (M_{pp} - M_{IN2} - M_{IN1}) \cdot (i_{EV}^{out} - i_{EV}^{in}) + M_O \cdot (i' - i_{EV}^{in}) \quad (5.18)$$

kde: $i_{EV}^{out} = i'' = 2726,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ - entalpie syté páry při tlaku 9,95 MPa

$i' = 1405,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ - entalpie syté kapaliny při tlaku 9,95 MPa

$$Q_{EV} = (55,56 - 0,545 - 3,8) \cdot (2726,4 - 968,71) + 0,56 \cdot (1405,7 - 968,71) = 90016,67 \text{ kW}$$

5.4.2.3 Ekonomizér

Návrhový tepelný výkon ekonomizéru ECO2

$$Q_{ECO2} = (M_{pp} - M_{IN2} - M_{IN1} + M_O) \cdot (i_{ECO2}^{out} - i_{ECO2}^{in}) \text{ [kW]} \quad (5.19)$$

$$Q_{ECO2} = (55,56 - 0,545 - 3,8 + 0,56) \cdot (968,71 - 763,47) = 10625,9 \text{ kW}$$

Návrhový tepelný výkon ekonomizéru ECO1

$$Q_{ECO1} = (M_{pp} - M_{IN2} - M_{IN1} + M_O) \cdot (i_{ECO1}^{out} - i_{ECO1}^{in}) \text{ [kW]} \quad (5.20)$$

$$Q_{ECO1} = (55,56 - 0,545 - 3,8 + 0,56) \cdot (763,47 - 553,11) = 10891 \text{ kW}$$

5.4.2.1 Ohřívák vzduchu

Ohřívání spalovacího vzduchu probíhá ve dvoustupňovém ohříváku. Vzduch je v prvním stupni přehříván na teplotu primárního vzduchu. Část vzduchu použitá pro sekundární vzduch je potom ohřívána v druhém stupni na požadovanou teplotu. Teploty spalovacích vzduchů jsou dány firemními zkušenostmi následovně: - primární vzduch $t_{\text{prim}}=115^{\circ}\text{C}$
- sekundární vzduch $t_{\text{sek}}=200^{\circ}\text{C}$

Rozdělení spalovacího vzduchu je dáno procentem prchavé hořlaviny v palivu a firemními zkušenostmi následovně: - primární $x_{\text{prim}}=0,65$ [-]
- sekundární $x_{\text{sek}}=0,35$ [-]

Návrhový tepelný výkon AH2

Jelikož musí být plocha ohříváku vzduchu AH2 větší kvůli zvýšenému objemovému množství sekundárního spalovacího vzduchu při spalování dřevní štěpky je potom menší množství vzduchu při spalování hnědého uhlí ohřáto na teplotu vyšší. Je proto nutná regulace teploty sekundárního vzduchu před vstupem do spalovací komory vzduchem studeným (25°C). Teplota vzduchu za ohřívákem AH2 a směšovací poměr byl vypočten iterací pomocí aplikace MS Excel.

Poměr pro regulaci teploty sekundárního vzduchu: - $t_{\text{AH2}}^{\text{out}} = 222^{\circ}\text{C}$, $x_{\text{AH2}} = 0,315$ [-]
- $t^{\text{in}} = 25^{\circ}\text{C}$, $x_{25^{\circ}\text{C}} = 0,0399$ [-]

Návrhový tepelný výkon AH2

$$Q_{\text{AH2}} = M_{\text{pv}} \cdot \beta \cdot (I_{\text{vzmin}}^{220^{\circ}\text{C}} - I_{\text{vzmin}}^{115^{\circ}\text{C}}) \cdot x_{\text{AH2}} \quad [\text{kW}] \quad (5.21)$$

kde: $I_{\text{vzmin}}^{115^{\circ}\text{C}}$ - entalpie minimálního množství vzduchu pro $t_{\text{AH2}}^{\text{in}} = 115^{\circ}\text{C}$ odečtena z Graf 3
 $I_{\text{vzmin}}^{115^{\circ}\text{C}} = 921,47 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$I_{\text{vzmin}}^{220^{\circ}\text{C}}$ - entalpie minimálního množství vzduchu pro $t_{\text{AH2}}^{\text{out}} = 220^{\circ}\text{C}$ odečtena z Graf 3
 $I_{\text{vzmin}}^{220^{\circ}\text{C}} = 1773,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$Q_{\text{AH2}} = 7,4 \cdot 1,3 \cdot (1773,8 - 921,47) \cdot 0,315 = 2541,8 \text{ kW}$$

Návrhový tepelný výkon AH1

Kvůli sníženému objemovému průtoku vzduchu druhým stupněm ohříváku AH2 je i objemový průtok prvním stupněm AH1 o tuto hodnotu nižší.

$$Q_{\text{AH1}} = M_{\text{pv}} \cdot \beta \cdot (I_{\text{vzmin}}^{115^{\circ}\text{C}} - I_{\text{vzmin}}^{75^{\circ}\text{C}}) \cdot (1 - (0,35 - x_{\text{AH2}})) \quad [\text{kW}] \quad (5.22)$$

kde: $I_{\text{vzmin}}^{75^{\circ}\text{C}}$ - entalpie minimálního množství vzduchu pro $t_{\text{AH1}}^{\text{in}} = 75^{\circ}\text{C}$ odečtena z Graf 3
 $I_{\text{vzmin}}^{75^{\circ}\text{C}} = 597,87 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$Q_{\text{AH1}} = 7,4 \cdot 1,3 \cdot (921,47 - 597,87) \cdot (1 - (0,35 - 0,315)) = 3004,15 \text{ kW}$$

5.5 Tepelná bilance na straně spalín

Jednotlivé návrhové entalpie spalín v tahu kotle se pro každou konvekční plochu vypočtou dle rovnice (5.23) za předpokladu, že na konci ohniště mají spaliny teplotu t_0 a přebytek vzduchu $\alpha = 1,35$. Jednotlivé teploty spalín pro vypočtené entalpie jsou odečteny z Graf 1, Graf 3.

$$i_{out}^{sp} = \frac{(i_{in}^{sp} \cdot M_{pv}) - Q}{M_{pv}} \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.23)$$

kde: i_{in}^{sp} – entalpie spalín před konvekční plochou [kJ · kg⁻¹]

i_{out}^{sp} – entalpie spalín za konvekční plochou [kJ · kg⁻¹]

Q – návrhový tepelný výkon konvekční plochy [W]

5.5.1 Dřevní štěpka

V Tab. 13 jsou uvedeny návrhové teploty spalín na vstupu a výstupu jednotlivých konvekčních ploch při spalování dřevní štěpky. Při návrhu těchto teplot není uvažován vliv výparníku v prostoru přehříváků a teplo vysálané přímo z ohniště. Výkon výparníkové mříže je odhadnut na 1800 kW.

Tab. 13 Návrhová tepelná bilance spalín – Dřevní štěpka

Konvekční plocha	Teplota spalín [°C]		Entalpie spalín [kJ.kg ⁻¹]		Přebytek vzduchu α [-]
	Vstup t_{in}^{sp}	Výstup t_{out}^{sp}	Vstup i_{in}^{sp}	Výstup i_{out}^{sp}	
SH3	928,78	842,05	8912,78	8000,51	1,35
SH4	842,05	753,61	8000,51	7075,03	1,35
SH2	753,61	675,29	7075,03	6283,63	1,35
MŘÍŽ	675,29	653,79	6283,63	6115,09	1,35
SH1	653,79	450,70	6115,09	4073,68	1,35
ECO2	450,70	336,83	4073,68	2995,39	1,35
AH2	336,83	293,02	2995,39	2602,47	1,36
ECO1	293,02	173,08	2602,47	1508,86	1,36
AH1	173,08	144,85	1508,86	1281,29	1,38

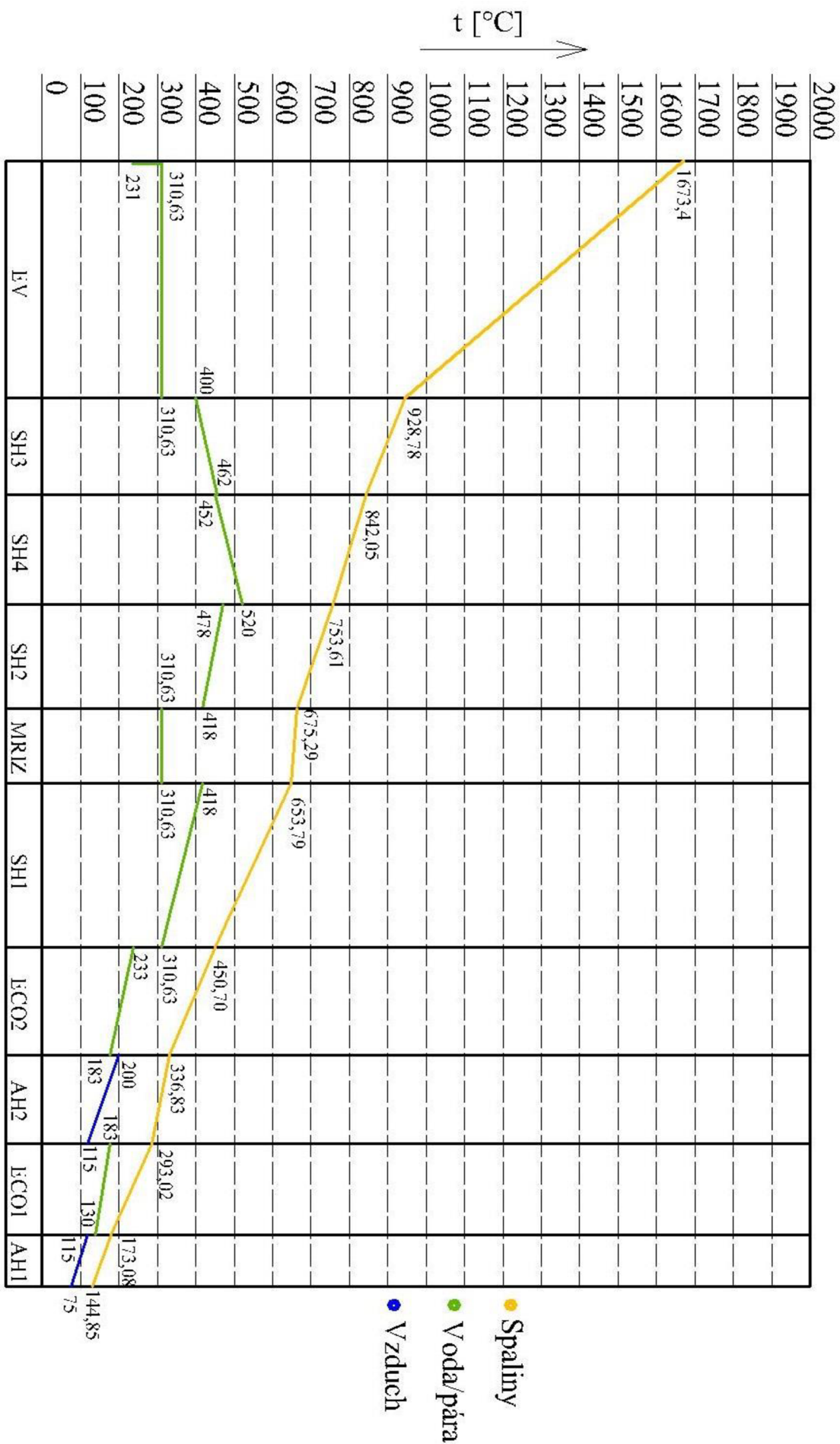
5.5.2 Hnědé uhlí

V Tab. 14 jsou uvedeny návrhové teploty spalín na vstupu a výstupu jednotlivých konvekčních ploch při spalování hnědého uhlí. Při návrhu těchto teplot není uvažován vliv výparníku v prostoru přehříváků a teplo vysálané přímo z ohniště. Výkon výparníkové mříže je odhadnut na 1800 kW.

Tab. 14 Návrhová tepelná bilance spalín – Hnědé uhlí

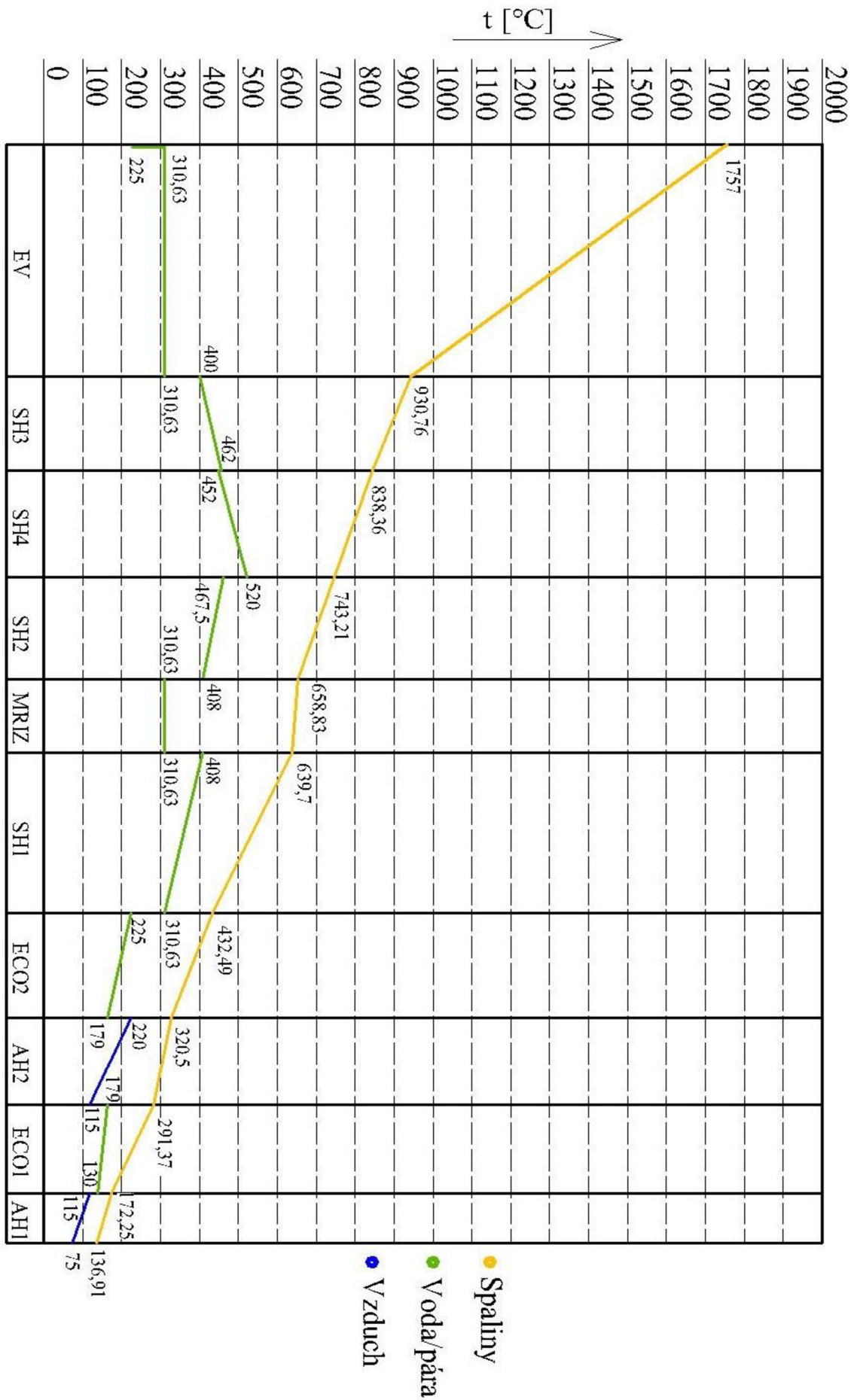
Konvekční plocha	Teplota spalín [°C]		Entalpie spalín [kJ.kg ⁻¹]		Přebytek vzduchu α [-]
	Vstup t_{in}^{sp}	Výstup t_{out}^{sp}	Vstup i_{in}^{sp}	Výstup i_{out}^{sp}	
SH3	930,76	838,36	12142,51	10825,88	1,35
SH4	838,36	743,21	10825,88	9490,18	1,35
SH2	743,21	658,83	9490,18	8323,36	1,35
MŘÍŽ	658,83	639,7	8323,36	8080,114	1,35
SH1	639,7	432,49	8080,11	5308,38	1,35
ECO2	432,49	320,50	5308,38	3872,45	1,35
AH2	320,50	291,37	3872,45	3528,98	1,36
ECO1	291,37	172,25	3528,98	2057,22	1,36
AH1	172,25	136,91	2057,22	1651,95	1,38

5.6 Návrhový pilový diagram – Dřevní štěpka



Obrázek 4. Návrhový pilový diagram - Dřevní štěpka

5.7 Návrhový pilový diagram – Hnědé uhlí

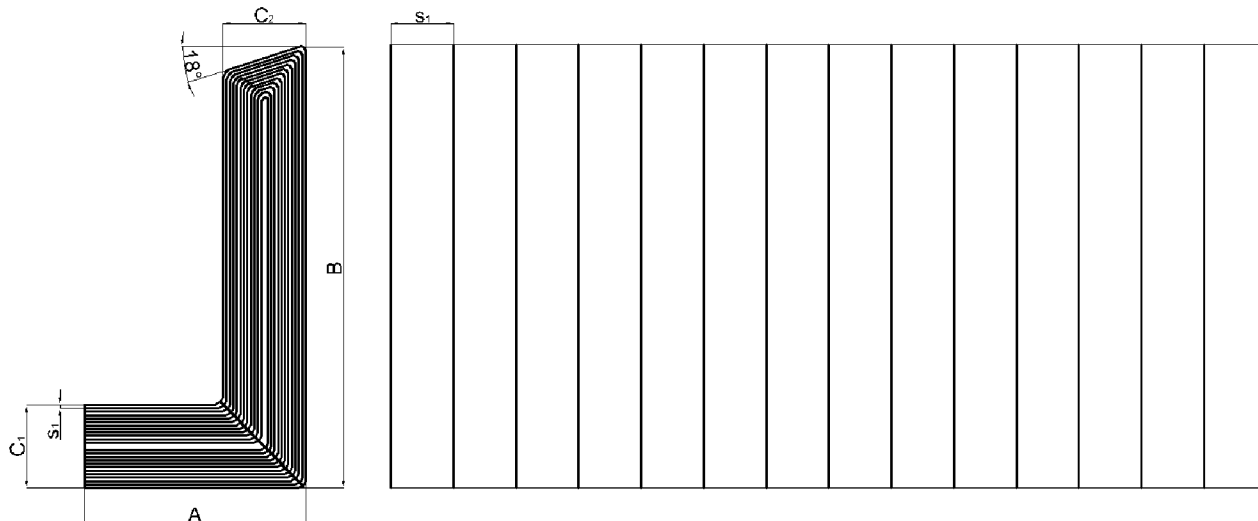


Obrázek 5. Návrhový pilový diagram - Hnědé uhlí

5.8 Výpočet konvekčních ploch – dřevní štěpka

Při výpočtu konvekčních ploch při spalování dřevní štěpky jsou zprvu navrhnuty rozměry jednotlivých ploch, pro které je vypočten skutečný tepelný výkon. Skutečný tepelný výkon plochy se nesmí lišit od návrhového tepelného výkonu dle kapitoly 5.4 o víc jak 2 %.

5.8.1 Deskový přehřívák SH3



Obrázek 6. Schéma deskového přehříváku SH3

5.8.1.1 Geometrie přehříváku SH3

Návrhové rozměry desek

- průměr trubek $D = 0,0445$ m
- vnitřní průměr trubek $d = 0,0333$ m
- šířka desky $A = 3,011$ m
- výška desky $B = 6,027$ m
- příčná šířka desky $C_1 = 1,134$ m
- podélná šířka desky $C_2 = 1,184$ m
- rozteč desek $s_1 = 0,85$ m
- počet desek $n_{\text{desek}} = 15$
- rozteč trubek $s_2 = 0,047$ m
- počet trubek $n_{\text{trubek}} = 12$
- šířka trubek $\check{s} = 0,517$ m

Návrhová plocha přehříváku SH3

$$S_{\text{SH3}} = 2 \cdot n \cdot \left(A \cdot C_1 + C_2 \cdot (B - C_1) - \frac{\text{tg } 18^\circ \cdot C_2^2}{2} \right) + \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot (2 \cdot A + 2 \cdot B - C_1) \quad [\text{m}^2] \quad (5.24)$$

kde: $n = 15$ – odhadnutý počet desek přehříváku SH3

$$S_{\text{SH3}} = 2 \cdot 15 \cdot (3,011 \cdot 1,134 + 1,184 \cdot (6,027 - 1,134) - \frac{\text{tg } 18^\circ \cdot 1,184^2}{2}) + \pi \cdot \frac{0,0445}{2} \cdot (2 \cdot 3,011 + 2 \cdot 6,027 - 1,134) = 304,93 \text{ m}^2$$

Střední průřez

$$F_{\text{str}} = \frac{2 \cdot F_{\text{in}} \cdot F_{\text{out}}}{F_{\text{in}} + F_{\text{out}}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.25)$$

kde: F_{in} – vstupní průřez [m²]

$$F_{\text{in}} = a \cdot b = 3,4 \cdot 13,005 = 44,22 \text{ m}^2 \quad (5.26)$$

kde: $a = 3,4 \text{ m}$ – šířka tahu (dána firemními podklady)

$b = 13,005 \text{ m}$ – hloubka tahu (dána firemními podklady)

F_{out} – výstupní průřez [m²]

$$F_{\text{out}} = (B - \text{š}) \cdot b = (6,027 - 0,517) \cdot 13,005 = 71,66 \text{ m}^2 \quad (5.27)$$

$$F_{\text{str}} = \frac{2 \cdot 44,22 \cdot 71,66}{44,22 + 71,66} = 54,69 \text{ m}^2$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot \left(a \cdot b - n_{\text{trubek}} \cdot n \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right)}{2 \cdot (a + b) + n_{\text{trubek}} \cdot n \cdot \pi \cdot D} = \frac{4 \cdot \left(3,4 \cdot 13,005 - 12 \cdot 15 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0445^2}{4} \right)}{2 \cdot (3,4 + 13,005) + 12 \cdot 15 \cdot \pi \cdot 0,0445} =$$

$$= 3,031 \text{ m} \quad (5.28)$$

5.8.1.2 Parametry spalinStřední teplota spalin

$$t_{\text{sp}}^{\text{str}} = \frac{t_{\text{sp}}^{\text{in}} + t_{\text{sp}}^{\text{out}}}{2} = \frac{928,77 + 852,05}{2} = 885,41 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.29)$$

kde: $t_{\text{sp}}^{\text{in}}$ – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z ohniště dle kapitoly 4.3.1) [°C]

$t_{\text{sp}}^{\text{out}}$ – výstupní teplota spalin (odečtena z Tab. 13)

Průtok spalin

$$V_{\text{sp}} = M_{\text{pv}} \cdot O_{\text{sp}} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}^{\text{str}} + 273,15}{273,15} \right) \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (5.30)$$

kde: $O_{\text{sp}} = 6,26 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$ – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,35$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{\text{sp}} = 10,68 \cdot 6,26 \cdot (1 - 0,00984) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{885,41 + 273,15}{273,15} \right) = 281,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední spalinový průřez

$$F_{sp} = \frac{2 \cdot F_{sp1} \cdot F_{sp2}}{F_{sp1} + F_{sp2}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.31)$$

kde: F_{sp1} – vstupní průřez spalin [m²]

$$F_{sp1} = F_{in} - (n \cdot D \cdot A) = 44,22 - (15 \cdot 0,0445 \cdot 3,011) = 42,21 \text{ m}^2 \quad (5.32)$$

F_{sp2} – výstupní průřez spalin [m²]

$$\begin{aligned} F_{sp2} &= F_{out} - (n \cdot D \cdot (B - \check{s})) = \\ &= 71,66 - (15 \cdot 0,0445 \cdot (6,027 - 0,517)) = 67,98 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (5.33)$$

$$F_{sp} = \frac{2 \cdot 42,21 \cdot 67,98}{42,21 + 67,98} = 52,08 \text{ m}^2$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{281,2}{52,08} = 5,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.34)$$

5.8.1.3 Parametry médiaStřední teplota páry

$$t_p^{str} = \frac{t_p^{in} + t_p^{out}}{2} = \frac{400 + 462}{2} = 431 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.35)$$

kde: t_p^{in} , t_p^{out} [°C] – vstupní, výstupní teplota páry pro SH3 odečtena z Tab. 11

Střední tlak páry

$$p_p^{str} = \frac{p_p^{in} + p_p^{out}}{2} = \frac{9,6 + 9,45}{2} = 9,525 \text{ MPa} \quad (5.36)$$

kde: p_p^{in} , p_p^{out} [MPa] – vstupní, výstupní tlak páry pro SH3 odečten z Tab. 11

Rychlost páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pp}^{SH3} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{trubek}^{SH3}} = \frac{4 \cdot (55,56 - 0,55) \cdot 0,0301}{\pi \cdot 0,0333^2 \cdot 180} = 10,56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.37)$$

kde: v – měrný objem pro t_p^{str} a p_p^{str} určen pomocí aplikace SteamProperty [m³ · kg⁻¹]

$$v = 0,0301 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

n_{trubek}^{SH3} – celkový počet trubek SH3 [-]

$$n_{trubek}^{SH3} = n_{trubek} \cdot n = 12 \cdot 15 = 180 \text{ [-]}$$

5.8.1.4 Součinitel přestupu tepla na straně média

$$\alpha_2 = \alpha_N \cdot c_d [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.38)$$

kde: α_N – nomogramový součinitel odečten z [1] pro w_p , d

$$\alpha_N = 1650 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

c_d – opravný koeficient na vnitřní průměr trubky odečten z [1]

$$c_d = 0,98 [-]$$

$$\alpha_2 = 1650 \cdot 0,98 = 1617 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.1.5 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin - příčné proudění

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.39)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

c_s – oprava na uspořádání svazku

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \quad (5.40)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,85}{0,0445} = 19,1 [-] \quad (5.41)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,047}{0,0445} = 1,056 [-] \quad (5.42)$$

- při $\sigma_1 > 3$ a $\sigma_2 < 2$, se dosazuje $\sigma_1 = 3 [-]$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,056}{2}\right)^3]^{-2} = 0,578 [-]$$

$\lambda = 0,0979 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,49 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,59 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,578 \cdot \frac{0,0979}{0,0445} \cdot \left(\frac{5,4 \cdot 0,0445}{1,49 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,59^{0,33} = 26,03 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.1.6 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin-podélné proudění

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\gamma} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.43)$$

kde: $\lambda = 0,0979 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,49 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,59 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$c_t = 1$ – opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn (odečten z [1])

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{0,0979}{3,031} \cdot \left(\frac{5,4 \cdot 3,031}{1,49 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,59^{0,4} \cdot 1 = 6,49 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.1.7 Součinitel přestupu tepla sálánímStupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{celk} \cdot p \cdot s} [-] \quad (5.44)$$

$$\text{kde: } k_{celk} = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) [-] \quad (5.45)$$

$$\text{kde: } k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{sp}^{str}}{1000} \right) [m^{-1} \cdot MPa^{-1}]$$

kde: s – účinná tloušťka sálové vrstvy [m]

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{s_1}} = \frac{1,8}{\frac{1}{3,011} + \frac{1}{6,027} + \frac{1}{0,85}} = 1,075 m \quad (5.46)$$

$r_{H_2O} = 0,13 [-]$ – objemová část vodní páry dle rovnice (2.17)

$p_{sp} = 0,026 MPa$ – celkový parciální tlak dle rovnice (4.20)

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,13}{3,16 \cdot \sqrt{0,026 \cdot 1,075}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1158,56}{1000} \right) = 10,05 m^{-1} \cdot MPa^{-1}$$

$r_{sp} = 0,263 [-]$ – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.19)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{sp}^{str} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{1158,56^2 \cdot 20^2}} = 0,053 m^{-1} \cdot MPa^{-1} \quad (5.47)$$

kde: $d_s = 20 \mu m$ – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 2,077 g \cdot m^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.19)

$$k_{celk} = (10,05 \cdot 0,263 + 0,053 \cdot 2,077) = 2,75 [-]$$

$p = 0,1 MPa$ – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-2,75 \cdot 0,1 \cdot 1,075} = 0,2562 [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p^{\text{str}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{\text{SH3}}}{S_{\text{SH3}}} \cdot 10^3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.48)$$

kde: $\varepsilon = 0,0128 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení určen dle firemních podkladů

$$t_z = 431 + \left(0,0128 + \frac{1}{1617} \right) \cdot \frac{9764,88}{304,93} \cdot 10^3 = 859,75 \text{ }^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{\text{st}} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{\text{sp}}^{\text{str}^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{\text{sp}}^{\text{str}}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.49)$$

kde: $a_{\text{st}} = 0,8$ [–] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,2562 \cdot 1158,56^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{1132,9}{1158,56} \right)^4}{1 - \frac{1132,9}{1158,56}} = 79,08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.1.8 Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_{1,\text{př}} = \omega \cdot (\alpha_{k,\text{př}} + \alpha_s) \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.50)$$

kde: $\omega = 0,85$ [–] – součinitel omývání desek odečten z [1]

$$\alpha_{1,\text{př}} = 0,85 \cdot (26,03 + 79,08) = 89,35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.1.9 Součinitel prostupu tepla – příčné proudění

$$k_{\text{př}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1,\text{př}}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{89,35} + \frac{1}{1617}} = 84,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.51)$$

5.8.1.10 Součinitel přestupu tepla na straně spalin – podélné proudění

$$\alpha_{1,\text{po}} = \omega \cdot (\alpha_{k,\text{po}} + \alpha_s) \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.52)$$

kde: $\omega = 0,85$ [–] – součinitel omývání desek odečten z [1]

$$\alpha_{1,\text{po}} = 0,85 \cdot (6,5 + 79,08) = 72,75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.1.11 Součinitel prostupu tepla – podélné proudění

$$k_{\text{po}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1,\text{po}}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{72,75} + \frac{1}{1617}} = 69,61 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.53)$$

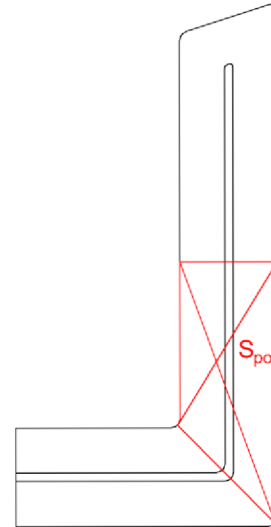
5.8.1.12 Součinitel prostupu tepla

Plocha SH3 s příčným charakterem proudění spalin

$$S_{SH3}^{př} = 0,633 \cdot S_{SH3} = 0,633 \cdot 304,93 = 193,02 \text{ m}^2 \quad (5.54)$$

Plocha SH3 s příčným charakterem proudění spalin

$$S_{SH3}^{po} = 0,367 \cdot S_{SH3} = 0,367 \cdot 304,93 = 111,91 \text{ m}^2 \quad (5.55)$$

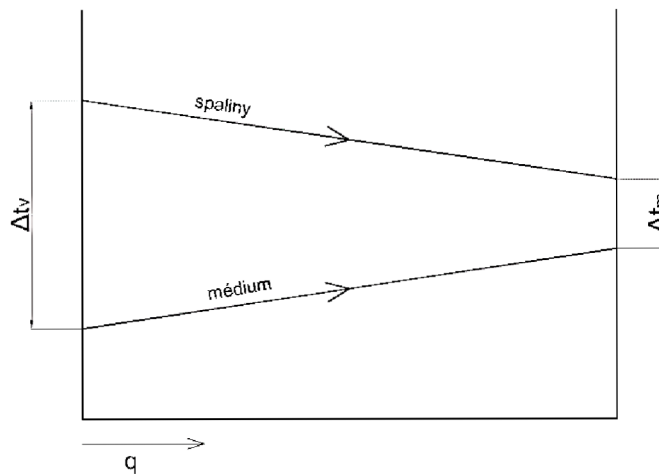


Obrázek 7. Část plochy s podélným prouděním

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{k_{př} \cdot S_{SH3}^{př} + k_{po} \cdot S_{SH3}^{po}}{S_{SH3}} = \frac{84,67 \cdot 193,02 + 69,61 \cdot 111,91}{304,93} = 79,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.56)$$

5.8.1.13 Teplotní spád



Obrázek 8. Teplotní spád SH3

$$\Delta t = t_{sp}^{str} - t_p^{str} = 885,41 - 431 = 454,41 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.57)$$

- uvedený vztah pro výpočet teplotního spádu lze použít, je-li splněna nerovnost:

$$\Delta t_v / \Delta t_m \leq 1,7 \quad (5.58)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{in} = 928,78 - 400 = 528,78 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.59)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{out} = 842,05 - 462 = 380,05 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.60)$$

$528,78 / 380,05 = 1,39 \leq 1,7$ – podmínka splněna

5.8.1.14 Teplo předané spaliny

$$Q_{SH3}^{SP} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{SH3} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.61)$$

kde: $\xi = 0,76$ [-] – součinitel využití při spalování dřevní štěpky (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{SH3}^{SP} = 0,76 \cdot 454,41 \cdot 79,14 \cdot 304,93 \cdot 10^{-3} = 8334,46 \text{ kW}$$

5.8.1.15 Teplo vysálané přímo z ohniště

Hustota tepelného toku vycházející výstupním průřezem

$$q_{sv} = y_h \cdot \bar{q} \cdot \frac{F_{in}}{F_{out}} \cdot (1 - a) \cdot \varphi_{0-sv} + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot \psi_{sv} \cdot a \cdot \left(\frac{T_{sp}^{str}}{100} \right)^4 \text{ [kW} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (5.62)$$

kde: $y_h = 0,7$ [-] - součinitel tepelné nerovnoměrnosti stěn odečten z [1]

\bar{q} – tepelné zatížení stěn ohniště dle rovnice ((4.27)) [kW · m⁻²]

φ_{0-sv} – úhlový součinitel ohniště [-]

$$\varphi_{0-sv} = \sqrt{\left(\frac{A}{s_1} \right)^2 + 1} - \frac{A}{s_1} = \sqrt{\left(\frac{3,011}{0,85} \right)^2 + 1} - \frac{3,011}{0,85} = 0,138 \text{ [-]} \quad (5.63)$$

$\psi_{sv} = 0,5$ [-] – součinitel tepel. efektivnosti svazku odečten z [1]

$$q_{sv} = 0,7 \cdot 111,7 \cdot \frac{44,22}{71,66} \cdot (1 - 0,2562) \cdot 0,138 + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 0,2562 \cdot \left(\frac{1158,56}{100} \right)^4 =$$

$$= 18,12 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$$

Sálavé teplo z ohniště zachycené v prostoru SH3

$$Q_{s,dSH3} = \delta \cdot y_h \cdot \bar{q} \cdot F_{in} - q_{sv} \cdot F_{out} \text{ [kW]} \quad (5.64)$$

kde: $\delta = 1$ [-] – součinitel odečten z [2] pro t_{sp}^{in}

$$Q_{s,dSH3} = 1 \cdot 0,7 \cdot 111,7 \cdot 44,22 - 18,12 \cdot 71,66 = 2158,53 \text{ kW}$$

Sálavé teplo z ohniště zachycené přehřívákem SH3

$$Q_{SH3}^s = \frac{S_{SH3}}{S_{SH3} + S_d^{SH3}} \cdot Q_{s,dSH3} \text{ [kW]} \quad (5.65)$$

kde: $S_d^{SH3} = 155,22 \text{ m}^2$ – velikost doplňkové plochy (membránové stěny výparníku)

$$Q_{SH3}^s = \frac{304,93}{304,93 + 155,22} \cdot 2158,53 = 1430,42 \text{ kW}$$

5.8.1.16 Celkový tepelný výkon deskového přehříváku SH3

$$Q_{SH3}^{skut} = Q_{SH3}^{sp} + Q_{SH3}^s = 8334,46 + 1430,42 = 9764,88 \text{ kW} \quad (5.66)$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{SH3}^{skut} - Q_{SH3}}{Q_{SH3}} \cdot 100 = \frac{9743,80 - 9764,88}{9764,88} \cdot 100 = 0,22 \% < 2\% \quad (5.67)$$

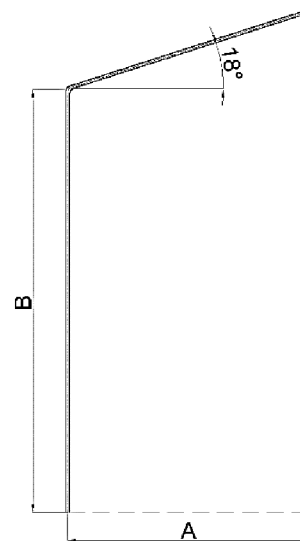
5.8.2 Doplnková plocha v prostoru SH3

- doplnkovou plochu v prostoru deskového přehříváku SH3 tvoří membránová stěna výparníku

5.8.2.1 Geometrie doplňkové plochy SH3

Rozměry doplňkové plochy

- výška plochy $B = 5,3 \text{ m}$
- šířka plochy $A = 3,4 \text{ m}$
- hloubka plochy (tahu) $b = 13,005 \text{ m}$
- rozteč trubek $s_1 = 0,075 \text{ m}$
- průměr trubek $D = 60,3 \text{ mm}$
- vnitřní průměr trubek $d = 50,3 \text{ mm}$



Obrázek 9. Schéma doplňkové plochy SH3

Velikost plochy

$$S_d^{SH3} = 2 \cdot (A \cdot B) + B \cdot b + A \cdot (\operatorname{tg}18^\circ \cdot A) + \frac{A}{\cos18^\circ} \cdot b \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.68)$$

$$S_d^{SH3} = 2 \cdot (3,4 \cdot 5,3) + 5,3 \cdot 13,005 + 3,4 \cdot (\operatorname{tg}18^\circ \cdot 3,4) + \frac{3,4}{\cos18^\circ} \cdot 13,005 = 155,22 \text{ m}^2$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 44,217}{32,81} = 5,39 \text{ m} \quad (5.69)$$

kde: $F = A \cdot b = 3,4 \cdot 13,005 = 44,217 \text{ m}^2$ – světlý průřez proudy

$O = 2 \cdot (A + b) = 2 \cdot (3,4 + 13,005) = 32,81 \text{ m}$ – obvod průřezu kanálu

5.8.2.2 Parametry média

Střední tlak média

$p_{p,d}^{str} = p_{EV} = 9,95 \text{ MPa}$ – tlak výparníku dán firemními podklady (viz Tab. 11)

Střední teplota média

$t_{p,d}^{str} = t_{EV} = 310,63 \text{ }^\circ\text{C}$ – dáno teplotou nasycení pro p_{EV} (viz Tab. 11)

5.8.2.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

- u doplňkové plochy uvažují pouze podélné proudění spalín

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\gamma} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.70)$$

kde: $\lambda = 0,0979 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,49 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,59 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$c_t = 1$ – opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn (odečten z [1])

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{0,0979}{5,39} \cdot \left(\frac{5,43 \cdot 5,39}{1,49 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,59^{0,4} \cdot 1 = 5,79 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.2.1 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k_{celk} \cdot p \cdot s} [-] \quad (5.71)$$

$$\text{kde: } k_{celk} = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) [-] \quad (5.72)$$

$$\text{kde: } k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) [m^{-1} \cdot MPa^{-1}]$$

kde: s – účinná tloušťka sálové vrstvy [m]

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S_d^{SH3}} = 3,6 \cdot \frac{258,77}{155,22} = 6,01 m \quad (5.73)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,13}{3,16 \cdot \sqrt{0,026 \cdot 6,01}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1158,56}{1000} \right) = 3,92 m^{-1} \cdot MPa^{-1}$$

$r_{sp} = 0,263 [-]$ – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.19)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{sp}^{str2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{1158,56^2 \cdot 20^2}} = 0,053 m^{-1} \cdot MPa^{-1} \quad (5.74)$$

kde: $d_s = 20 \mu m$ – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 2,077 g \cdot m^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalínách dle rovnice (2.19)

$$k_{celk} = (3,92 \cdot 0,263 + 0,053 \cdot 2,077) = 1,14 [-]$$

$p = 0,1 MPa$ – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-1,14 \cdot 0,1 \cdot 1,075} = 0,496 [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{p,d}^{\text{str}} + \varepsilon \cdot \frac{Q_d^{\text{SH3}}}{S_d^{\text{SH3}}} \cdot 10^3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.75)$$

kde: $\varepsilon = 0,0043 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1]

$Q_d^{\text{SH3}} = 1200 \text{ kW}$ – odhadovaný výkon doplňkové plochy v prostoru SH3

$$t_z = 310,63 + (0,0043) \cdot \frac{1200}{155,22} \cdot 10^3 = 366,59 \text{ }^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{\text{st}} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{\text{sp}}^{\text{str}^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.76)$$

kde: $a_{\text{st}} = 0,8$ [–] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,496 \cdot 1158,56^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{639,74}{1158,56}\right)^4}{1 - \frac{639,74}{1158,56}} = 80,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.2.2 Součinitel přestupu tepla

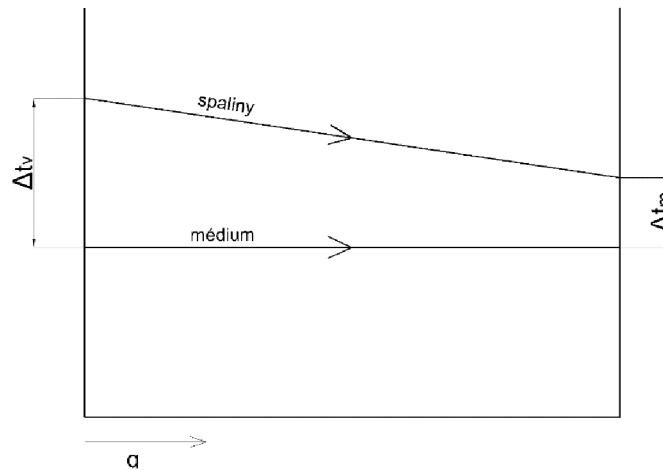
$$\alpha_{1,d} = \alpha_{k,p0} + \alpha_s = 5,79 + 80,17 = 85,96 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.77)$$

5.8.2.3 Součinitel prostupu tepla

$$k = \omega \cdot \alpha_{1,d} = 0,35 \cdot 85,96 = 30,09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.78)$$

kde: $\omega = 0,35$ [–] – součinitel omývání desek určen dle firemních zkušeností

5.8.2.4 Teplotní spád



Obrázek 10. Teplotní spád doplňkové plochy SH3

$$\Delta t_d^{SH3} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{618,15 - 541,42}{\ln \frac{618,15}{541,42}} = 573,69 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.79)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_{EV} = 928,78 - 310,63 = 618,15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.80)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_{EV} = 852,05 - 310,63 = 541,42 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.81)$$

5.8.2.5 Teplo předané spalinami

$$Q_{d,SH3}^{sp} = \bar{\Psi} \cdot \Delta t_d^{SH3} \cdot k \cdot S_d^{SH3} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.82)$$

kde: $\bar{\Psi}$ [-] – součinitel tepelné efektivity stěn dle rovnice (4.16)

$$Q_{d,SH3}^{sp} = 0,45 \cdot 573,69 \cdot 30,09 \cdot 155,22 \cdot 10^{-3} = 1205,57 \text{ kW}$$

5.8.2.6 Sálavé teplo z ohniště zachycené v doplňkové ploše v prostoru SH3

$$Q_{d,SH3}^s = \frac{S_d^{SH3}}{S_{SH3} + S_d^{SH3}} \cdot Q_{s,dp} = \frac{155,22}{304,93 + 155,22} \cdot 2158,53 = 728,11 \text{ kW} \quad (5.83)$$

5.8.2.7 Celkový tepelný výkon doplňkové plochy v prostoru SH3

$$Q_{d,SH3}^{skut} = Q_{d,SH3}^{sp} + Q_{d,SH3}^s = 1205,57 + 728,11 = 1933,69 \text{ kW} \quad (5.84)$$

5.8.2.8 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru SH3

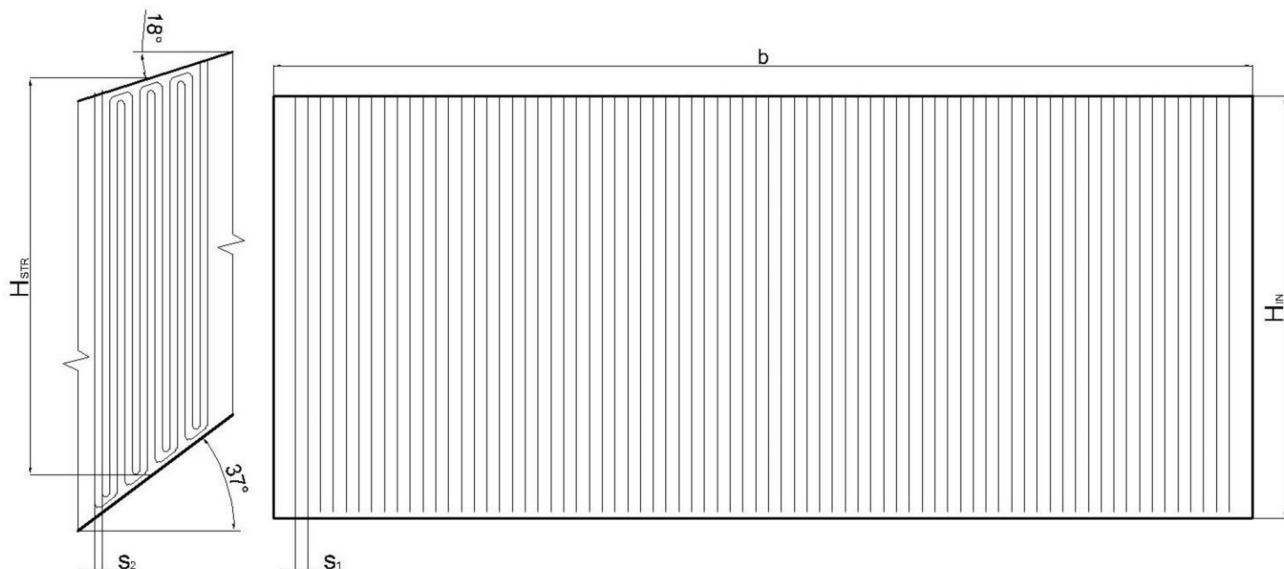
- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak $\pm 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$i_{SH3}^{out} = \frac{(i_{SH3}^{in} \cdot M_{pv}) - (Q_{SH3}^{sp} + Q_{d,SH3}^{sp})}{M_{pv}} = \frac{(8912,78 \cdot 10,68) - (8334,46 + 1205,6)}{10,68} = 8019,52 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.85)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 843,86 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ – určeno z Graf 1 pro } i_{SH3}^{out} \text{ při } \alpha = 1,35$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 842,05 - 843,86 = -1,81 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.86)$$

5.8.3 Přejířívák SH4



Obrázek 11. Schéma přejíříváku SH4

5.8.3.1 Geometrie přejíříváku SH4

Návrhové rozměry SH4

- průměr trubek $D = 0,038 \text{ m}$
- vnitřní průměr trubek $d = 0,0268 \text{ m}$
- rozteč příčná $s_1 = 0,17 \text{ m}$
- rozteč podélná $s_2 = 0,1 \text{ m}$
- počet trubek $n_{\text{trubek}} = 74$
- počet řad $n_{\text{řad}} = 16$
- střední výška průřezu $H_{\text{str}} = 5,1805 \text{ m}$

Návrhová plocha přejíříváku SH4

$$S_{\text{SH4}} = \pi \cdot D \cdot n_{\text{řad}} \cdot n_{\text{trubek}} \cdot H_{\text{str}} = \pi \cdot 0,038 \cdot 16 \cdot 74 \cdot 5,1805 = 732,25 \text{ m}^2 \quad (5.87)$$

Střední průřez

$$F_{\text{str}} = H_{\text{str}} \cdot b = 5,1805 \cdot 13,005 = 67,37 \text{ m}^2 \quad (5.88)$$

kde: $b = 13,005 \text{ m}$ – hloubka tahu (dána firemními podklady)

5.8.3.2 Parametry spalin

Návrhová teplota spalin na výstupu z SH4

$$i_{\text{SH4}}^{\text{out}} = \frac{(i_{\text{SH3}}^{\text{out}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{SH4}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(8019,52 \cdot 10,68) - 9884,12}{10,68} = 7094,04 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.89)$$

$t_{\text{sp}}^{\text{out}} = 754,6^\circ\text{C}$ – odečteno z Graf 1 pro $i_{\text{SH4}}^{\text{out}}$, $\alpha = 1,35$

Střední teplota spalin

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{843,86 + 754,6}{2} = 799,23 \text{ °C} \quad (5.90)$$

kde: t_{sp}^{in} [°C] – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z SH3 dle rovnice (5.85))

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.91)$$

kde: $O_{sp} = 6,26 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$ – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,35$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 10,68 \cdot 6,26 \cdot (1 - 0,00984) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{799,23 + 273,15}{273,15} \right) = 260,29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední spalinový průřez

$$F_{sp} = F_{str} - D \cdot n_{trubek} \cdot H_{str} = 67,37 - 0,038 \cdot 74 \cdot 5,1805 = 52,8 \text{ m}^2 \quad (5.92)$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{260,29}{52,8} = 4,93 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.93)$$

5.8.3.1 Parametry médiaStřední teplota páry

$$t_p^{str} = \frac{t_p^{in} + t_p^{out}}{2} = \frac{452 + 520}{2} = 486 \text{ °C} \quad (5.94)$$

kde: t_p^{in} , t_p^{out} [°C] – vstupní, výstupní teplota páry pro SH4 odečtena z Tab. 11

Střední tlak páry

$$p_p^{str} = \frac{p_p^{in} + p_p^{out}}{2} = \frac{9,3 + 9,45}{2} = 9,375 \text{ MPa} \quad (5.95)$$

kde: p_p^{in} , p_p^{out} [MPa] – vstupní, výstupní tlak páry pro SH4 odečten z Tab. 11

Rychlost páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pp}^{SH4} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot 2 \cdot n_{trubek}^{SH4}} = \frac{4 \cdot 55,56 \cdot 0,0343}{\pi \cdot 0,0268^2 \cdot 2 \cdot 74} = 22,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.96)$$

kde: v – měrný objem pro t_p^{str} a p_p^{str} určen pomocí aplikace SteamProperty [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

$v = 0,0343 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

5.8.3.1 Součinitel přestupu tepla na straně média

$$\alpha_2 = \alpha_N \cdot c_d [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.97)$$

kde: α_N – nomogramový součinitel odečten z [1] pro w_p , d

$$\alpha_N = 2480 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

c_d – opravný koeficient na vnitřní průměr trubky odečten z [1]

$$c_d = 1,02 [-]$$

$$\alpha_2 = 2480 \cdot 1,02 = 2529,6 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.3.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalin. Trubky přehříváku SH4 jsou uspořádané za sebou pro snížení opotřebení materiálu přehříváku spalinami.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.98)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \text{ – oprava na uspořádání svazku} \quad (5.99)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,17}{0,038} = 4,47 [-] \quad (5.100)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,63 [-] \quad (5.101)$$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 4,47 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,63}{2}\right)^3]^{-2} = 1,51 [-]$$

$\lambda = 0,0907 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,32 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,6 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,51 \cdot \frac{0,0907}{0,038} \cdot \left(\frac{4,93 \cdot 0,038}{1,32 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,6^{0,33} = 68,4 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.3.1 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.102)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_{\text{p}} \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.103)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}{1000} \right) \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s [m] – účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad [\text{m}] \quad (5.104)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1 \right) = 0,478 \text{ m}$$

$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,13$ [-] – objemová část vodní páry dle rovnice (2.17)

$p_{\text{sp}} = 0,026$ MPa – celkový parciální tlak dle rovnice (4.20)

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,13}{3,16 \cdot \sqrt{0,026 \cdot 0,478}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1072,38}{1000} \right) = 16,21 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,263$ [-] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.19)

$$k_{\text{p}} = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{1072,38^2 \cdot 20^2}} = 0,056 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.105)$$

kde: $d_s = 20$ μm – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 2,077$ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalínách dle rovnice (2.19)

$$k_{\text{celk}} = (16,21 \cdot 0,263 + 0,056 \cdot 2,077) = 4,38 \quad [-]$$

$p = 0,1$ MPa – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-4,38 \cdot 0,1 \cdot 0,478} = 0,189 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p^{\text{str}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{\text{SH4}}}{S_{\text{SH4}}} \cdot 10^3 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.106)$$

kde: $\varepsilon = 0,01$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1] pro w_{sp}

$$t_z = 486 + \left(0,01 + \frac{1}{2529,6} \right) \cdot \frac{9884,12}{732,25} \cdot 10^3 = 626,32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.107)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [-] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

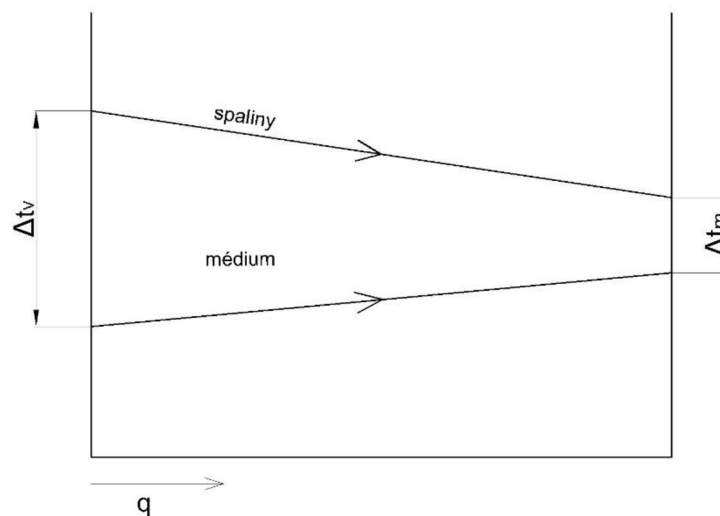
$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,189 \cdot 1072,38^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{899,47}{1072,38}\right)^4}{1 - \frac{899,47}{1072,38}} = 37,46 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.3.1 Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 68,4 + 37,46 = 105,85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.108)$$

5.8.3.2 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1} = \frac{105,85}{1 + \left(0,01 + \frac{1}{2529,6}\right) \cdot 105,85} = 50,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.109)$$

5.8.3.3 Teplotní spád

Obrázek 12. Teplotní spád SH4

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{391,86 - 234,6}{\ln \frac{391,86}{234,6}} = 306,53 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.110)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{in} = 843,86 - 452 = 391,86 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.111)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{out} = 754,6 - 520 = 234,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.112)$$

5.8.3.1 Teplo předané spaliny

$$Q_{SH4}^{SP} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{SH4} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.113)$$

kde: $\xi = 0,76$ [–] – součinitel využití při spalování dřevní štěrky (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{SH4}^{SP} = 0,76 \cdot 306,54 \cdot 50,4 \cdot 732,25 \cdot 10^{-3} = 8597,26 \text{ kW}$$

5.8.3.2 Teplo vysálané přímo z ohniště

Dle [1] se v další konvekční ploše za ohništěm zachytí celý podíl tepla vysálaného přímo z ohniště nezachycený v první konvekční ploše (SH3). Teplo vysálané přímo z ohniště nezachycené v prostoru deskového přehříváku se rozdělí mezi plochu přehříváku SH4 a doplňkové plochy výparníku v prostoru SH4.

Sálavé teplo z ohniště zachycené v prostoru SH4

$$Q_{s,dSH4} = \delta \cdot y_h \cdot \bar{q} \cdot F_{in} - Q_{s,dSH3} = 1 \cdot 0,7 \cdot 111,7 \cdot 44,22 - 2158,53 = 1298,75 \text{ kW} \quad (5.114)$$

kde: $\delta, y_h, \bar{q}, F_{in}$ – viz rovnice (5.64)

Sálavé teplo z ohniště zachycené přehřívákem SH4

$$Q_{SH4}^S = \frac{S_{SH4}}{S_{SH4} + S_d^{SH4}} \cdot Q_{s,dSH4} \text{ [kW]} \quad (5.115)$$

kde: $S_d^{SH4} = 62,01 \text{ m}^2$ – velikost doplňkové plochy (membránové stěny výparníku)

$$Q_{SH4}^S = \frac{732,25}{732,25 + 62,01} \cdot 1298,75 = 1197,35 \text{ kW}$$

5.8.3.3 Celkový tepelný výkon deskového přehříváku SH3

$$Q_{SH4}^{skut} = Q_{SH4}^{SP} + Q_{SH4}^S = 8597,26 + 1197,35 = 9794,6 \text{ kW} \quad (5.116)$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{SH4}^{skut} - Q_{SH4}}{Q_{SH4}} \cdot 100 = \frac{9794,6 - 9884,12}{9884,12} \cdot 100 = -0,91 \% < 2\% \quad (5.117)$$

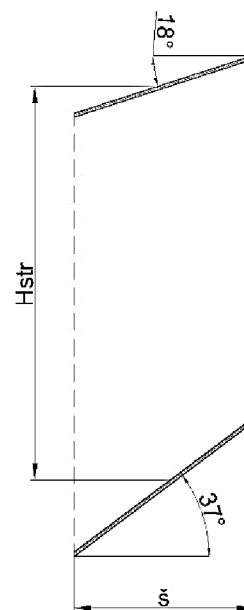
5.8.4 Doplnková plocha v prostoru SH4

- doplnkovou plochu v prostoru deskového přehříváku SH4 tvoří membránová stěna výparníku

5.8.4.1 Geometrie doplnkové plochy SH4

Rozměry doplnkové plochy

- šířka plochy $\check{s} = 1,538$ m
- střední výška průřezu $H_{str} = 5,108$ m
- hloubka plochy (tahu) $b = 13,005$ m
- rozteč trubek $s_1 = 0,075$ m
- průměr trubek $D = 60,3$ mm
- vnitřní průměr trubek $d = 50,3$ mm



Obrázek 13. Schéma doplnkové plochy SH3

Velikost plochy

$$S_d^{SH4} = 2 \cdot H_{str} \cdot \check{s} + \frac{\check{s}}{\cos 37^\circ} \cdot b + \frac{\check{s}}{\cos 18^\circ} \cdot b =$$

$$= 2 \cdot 5,108 \cdot 1,538 + \frac{1,538}{\cos 37^\circ} \cdot 13,005 + \frac{1,538}{\cos 18^\circ} \cdot 13,005 = 62,01 \text{ m}^2 \quad (5.118)$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{str}}{O} = \frac{4 \cdot 67,37}{36,226} = 7,44 \text{ m} \quad (5.119)$$

kde: $O = 2 \cdot (H_{str} + b) = 2 \cdot (5,108 + 13,005) = 32,81$ m – obvod průřezu kanálu

5.8.4.2 Parametry média

Střední tlak média

$p_{p,d}^{str} = p_{EV} = 9,95$ MPa – tlak výparníku dán firemními podklady (viz Tab. 11)

Střední teplota média

$t_{p,d}^{str} = t_{EV} = 310,63$ °C – dáno teplotou nasycení pro p_{EV} (viz Tab. 11)

5.8.4.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

- u doplňkové plochy uvažují pouze podélné proudění spalín

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\gamma} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.120)$$

kde: $\lambda = 0,0912 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,6 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$c_t = 1$ – opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn (odečten z [1])

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{0,0912}{7,44} \cdot \left(\frac{4,96 \cdot 7,44}{1,33 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,6^{0,4} \cdot 1 = 5,19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.4.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k_{celk} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.121)$$

$$\text{kde: } k_{celk} = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.122)$$

$$\text{kde: } k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad [m^{-1} \cdot MPa^{-1}]$$

kde: s – účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S_d^{SH4}} = 3,6 \cdot \frac{103,62}{62,01} = 6,02 \text{ m} \quad (5.123)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,13}{3,16 \cdot \sqrt{0,026 \cdot 6,02}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1072,38}{1000} \right) = 4,14 \text{ m}^{-1} \cdot MPa^{-1}$$

$r_{sp} = 0,263 [-]$ – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.19)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{sp}^{str2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{1072,38^2 \cdot 20^2}} = 0,056 \text{ m}^{-1} \cdot MPa^{-1} \quad (5.124)$$

kde: $d_s = 20 \mu\text{m}$ – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 2,077 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalínách dle rovnice (2.19)

$$k_{celk} = (4,14 \cdot 0,263 + 0,056 \cdot 2,077) = 1,2 \quad [-]$$

$p = 0,1 \text{ MPa}$ – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-1,2 \cdot 0,1 \cdot 6,02} = 0,52 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{p,d}^{\text{str}} + \varepsilon \cdot \frac{Q_d^{\text{SH4}}}{S_d^{\text{SH4}}} \cdot 10^3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.125)$$

kde: $\varepsilon = 0,0043 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1]

$Q_d^{\text{SH4}} = 400 \text{ kW}$ – odhadovaný výkon doplňkové plochy v prostoru SH3

$$t_z = 310,63 + 0,0043 \cdot \frac{400}{62,01} \cdot 10^3 = 338,12 \text{ }^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{\text{str}^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{\text{str}}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{\text{str}}}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.126)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [–] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,52 \cdot 1072,38^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{611,27}{1072,38}\right)^4}{1 - \frac{611,27}{1072,38}} = 67,82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.4.5 Součinitel přestupu tepla

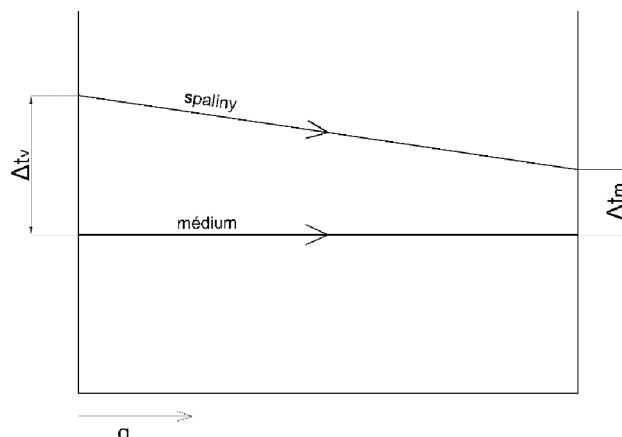
$$\alpha_{1,d} = \alpha_{k,p0} + \alpha_s = 5,19 + 67,82 = 73,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.127)$$

5.8.4.6 Součinitel prostupu tepla

$$k = \omega \cdot \alpha_{1,d} = 0,35 \cdot 73 = 25,55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.128)$$

kde: $\omega = 0,35$ [–] – součinitel omývání desek určen dle firemních zkušeností

5.8.4.7 Teplotní spád



Obrázek 14. Teplotní spád doplňkové plochy SH3

$$\Delta t_d^{SH4} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{533,23 - 443,97}{\ln \frac{533,23}{443,97}} = 487,24 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.129)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_{EV} = 843,86 - 310,63 = 533,23 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.130)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_{EV} = 754,6 - 310,63 = 443,97 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.131)$$

5.8.4.8 Teplo předané spaliny

$$Q_{d,SH4}^{sp} = \bar{\Psi} \cdot \Delta t_d^{SH4} \cdot k \cdot S_d^{SH4} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.132)$$

kde: $\bar{\Psi}$ [-] – součinitel tepelné efektivity stěn dle rovnice (4.16)

$$Q_{d,SH4}^{sp} = 0,45 \cdot 487,24 \cdot 25,55 \cdot 155,22 \cdot 10^{-3} = 347,41 \text{ kW}$$

5.8.4.9 Sálavé teplo z ohniště zachycené v doplňkové ploše v prostoru SH4

$$Q_{d,SH4}^s = \frac{S_d^{SH4}}{S_{SH4} + S_d^{SH4}} \cdot Q_{s,dSH4} = \frac{62,01}{732,25 + 62,01} \cdot 1298,75 = 101,4 \text{ kW} \quad (5.133)$$

5.8.4.10 Celkový tepelný výkon doplňkové plochy v prostoru SH4

$$Q_{d,SH4}^{skut} = Q_{d,SH4}^{sp} + Q_{d,SH4}^s = 347,41 + 101,4 = 448,81 \text{ kW} \quad (5.134)$$

5.8.4.11 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru SH4

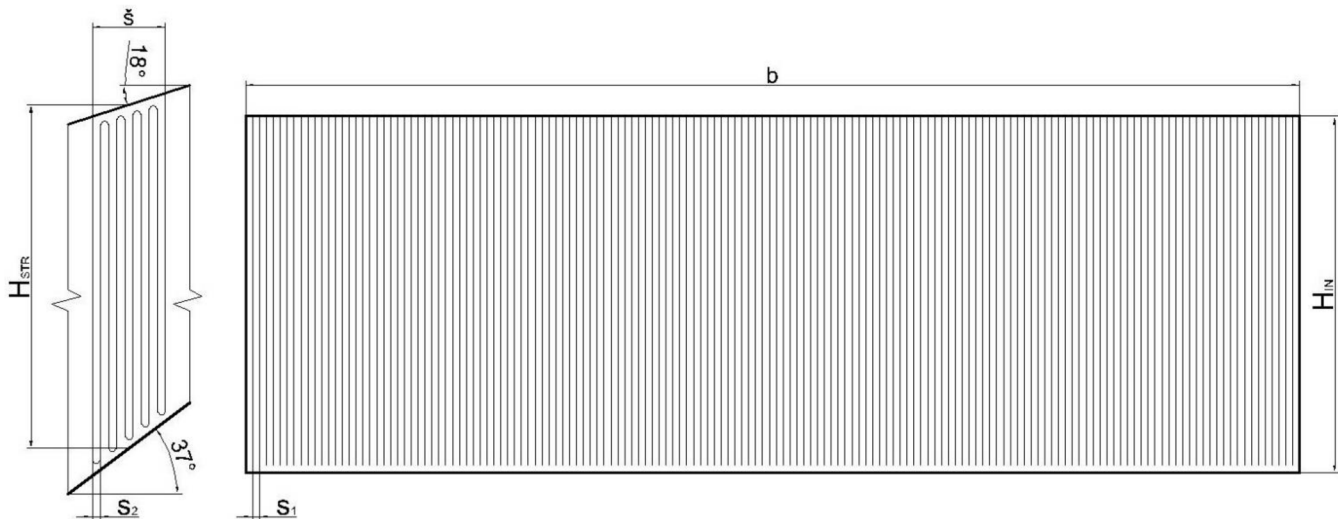
- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak $\pm 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$i_{SH4}^{out} = \frac{(i_{SH4}^{in} \cdot M_{pv}) - (Q_{SH4}^{sp} + Q_{d,SH4}^{sp})}{M_{pv}} = \frac{(8019,52 \cdot 10,68) - (8597,26 + 347,41)}{10,68} = 7182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.135)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 763,16 \text{ } ^\circ\text{C} - \text{určeno z Graf 1 pro } i_{SH4}^{out} \text{ při } \alpha = 1,35$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 754,6 - 763,16 = -8,56 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.136)$$

5.8.5 Přejhřívák SH2



Obrázek 15. Schéma přehříváku SH2

5.8.5.1 Geometrie přehříváku SH2

Návrhové rozměry SH2

- průměr trubek $D = 0,038$ m
- vnitřní průměr trubek $d = 0,028$ m
- rozteč příčná $s_1 = 0,085$ m
- rozteč podélná $s_2 = 0,1$ m
- počet trubek $n_{\text{trubek}} = 152$
- počet řad $n_{\text{řad}} = 10$
- střední výška průřezu $H_{\text{str}} = 4,1725$ m

Návrhová plocha přehříváku SH2

$$S_{\text{SH2}} = \pi \cdot D \cdot n_{\text{řad}} \cdot n_{\text{trubek}} \cdot H_{\text{str}} = \pi \cdot 0,038 \cdot 10 \cdot 152 \cdot 4,1725 = 757,14 \text{ m}^2 \quad (5.137)$$

Střední průřez

$$F_{\text{str}} = H_{\text{str}} \cdot b = 4,1725 \cdot 13,005 = 55,56 \text{ m}^2 \quad (5.138)$$

kde: $b = 13,005$ m – hloubka tahu (dána firemními podklady)

5.8.5.2 Parametry spalin

Návrhová teplota spalin na výstupu z SH2

$$i_{\text{SH2}}^{\text{out}} = \frac{(i_{\text{SH4}}^{\text{out}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{SH2}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(7182 \cdot 10,68) - 8452,15}{10,68} = 6390,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.139)$$

$t_{\text{sp}}^{\text{out}} = 685,89$ °C – odečteno z Graf 1 pro $i_{\text{SH2}}^{\text{out}}$, $\alpha = 1,35$

Střední teplota spalin

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{763,16 + 685,89}{2} = 724,52 \text{ °C} \quad (5.140)$$

kde: t_{sp}^{in} [°C] – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z SH4 dle rovnice (5.135))

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.141)$$

kde: $O_{sp} = 6,26 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$ – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,35$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 10,68 \cdot 6,26 \cdot (1 - 0,00984) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{724,52 + 273,15}{273,15} \right) = 242,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední spalinový průřez

$$F_{sp} = F_{str} - D \cdot n_{trubek} \cdot H_{str} = 55,56 - 0,038 \cdot 152 \cdot 4,1725 = 31,46 \text{ m}^2 \quad (5.142)$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{242,16}{31,46} = 7,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.143)$$

5.8.5.3 Parametry médiaStřední teplota páry

$$t_p^{str} = \frac{t_p^{in} + t_p^{out}}{2} = \frac{418 + 478}{2} = 448 \text{ °C} \quad (5.144)$$

kde: t_p^{in} , t_p^{out} [°C] – vstupní, výstupní teplota páry pro SH2 odečtena z Tab. 11

Střední tlak páry

$$p_p^{str} = \frac{p_p^{in} + p_p^{out}}{2} = \frac{9,75 + 9,6}{2} = 9,675 \text{ MPa} \quad (5.145)$$

kde: p_p^{in} , p_p^{out} [MPa] – vstupní, výstupní tlak páry pro SH2 odečten z Tab. 11

Rychlost páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pp}^{SH2} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{trubek}^{SH2}} = \frac{4 \cdot (55,56 - 0,55 - 4,3) \cdot 0,0306}{\pi \cdot 0,028^2 \cdot 152} = 16,54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.146)$$

kde: v – měrný objem pro t_p^{str} a p_p^{str} určen pomocí aplikace SteamProperty [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

$v = 0,0306 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

5.8.5.4 Součinitel přestupu tepla na straně média

$$\alpha_2 = \alpha_N \cdot c_d [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.147)$$

kde: α_N – nomogramový součinitel odečten z [1] pro w_p , d

$$\alpha_N = 2260 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

c_d – opravný koeficient na vnitřní průměr trubky odečten z [1]

$$c_d = 1,02 [-]$$

$$\alpha_2 = 2260 \cdot 1,02 = 2305,2 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.5.5 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalin. Trubky přehříváku SH2 jsou uspořádané za sebou pro snížení opotřebení materiálu spalinami.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.148)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \text{ – oprava na uspořádání svazku} \quad (5.149)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,085}{0,038} = 2,24 [-] \quad (5.150)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,63 [-] \quad (5.151)$$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 2,24 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,63}{2}\right)^3]^{-2} = 1,1 [-]$$

$\lambda = 0,0843 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,17 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,61 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot \frac{0,0843}{0,038} \cdot \left(\frac{7,7 \cdot 0,038}{1,17 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,61^{0,33} = 66,94 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.5.6 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.152)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.153)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}{1000} \right) \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s [m] – účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad [\text{m}] \quad (5.154)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,085 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1 \right) = 0,222 \text{ m}$$

$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,13$ [-] – objemová část vodní páry dle rovnice (2.17)

$p_{\text{sp}} = 0,026$ MPa – celkový parciální tlak dle rovnice (4.20)

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,13}{3,16 \cdot \sqrt{0,026 \cdot 0,222}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{997,67}{1000} \right) = 25,18 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,263$ [-] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.19)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{997,67^2 \cdot 20^2}} = 0,0585 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.155)$$

kde: $d_s = 20$ μm – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 2,077$ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.19)

$$k_{\text{celk}} = (25,18 \cdot 0,263 + 0,0585 \cdot 2,077) = 6,74 \quad [-]$$

$p = 0,1$ MPa – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-6,74 \cdot 0,1 \cdot 0,222} = 0,139 \quad [-];$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p^{\text{str}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{\text{SH}_2}}{S_{\text{SH}_2}} \cdot 10^3 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.156)$$

kde: $\varepsilon = 0,0067$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1] pro w_{sp}

$$t_z = 448 + \left(0,0067 + \frac{1}{2305,2} \right) \cdot \frac{8452,15}{757,14} \cdot 10^3 = 527,64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.157)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [-] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

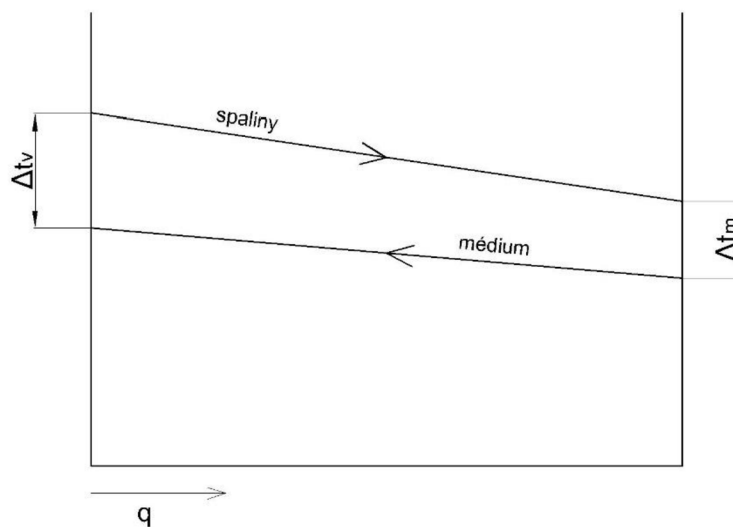
$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,139 \cdot 997,67^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{800,8}{997,67}\right)^4}{1 - \frac{800,8}{997,67}} = 21,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.5.7 Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 66,94 + 21 = 87,94 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.158)$$

5.8.5.8 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1} = \frac{87,94}{1 + \left(0,0067 + \frac{1}{2305,2}\right) \cdot 87,94} = 54,04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.159)$$

5.8.5.9 Teplotní spád

Obrázek 16. Teplotní spád SH2

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{285,16 - 267,89}{\ln \frac{285,16}{267,89}} = 276,43 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.160)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{out} = 763,16 - 478 = 285,16 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.161)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{in} = 685,89 - 418 = 267,89 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.162)$$

5.8.5.10 Skutečný tepelný výkon přehříváku SH2

$$Q_{SH2}^{skut} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{SH2} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.163)$$

kde: $\xi = 0,75$ [-] – součinitel využití pro SH2 při spalování dřevní štěpky (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{SH2}^{skut} = 0,75 \cdot 276,43 \cdot 54,04 \cdot 757,14 \cdot 10^{-3} = 8482,83 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{SH2}^{skut} - Q_{SH2}}{Q_{SH2}} \cdot 100 = \frac{8482,83 - 8452,15}{8452,15} \cdot 100 = 0,36 \% < 2\% \quad (5.164)$$

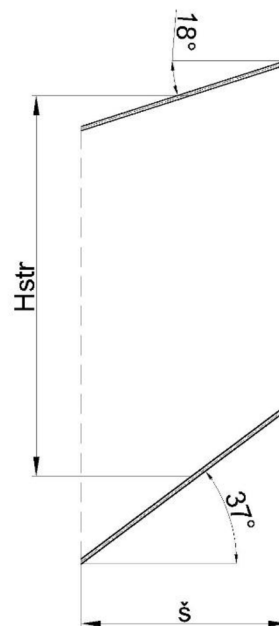
5.8.6 Doplnková plocha v prostoru SH2

- doplnkovou plochu v prostoru deskového přehříváku SH2 tvoří membránová stěna výparníku

5.8.6.1 Geometrie doplnkové plochy SH2

Rozměry doplnkové plochy

- šířka plochy $\check{s} = 1,238$ m
- střední výška průřezu $H_{str} = 4,1725$ m
- hloubka plochy (tahu) $b = 13,005$ m
- rozteč trubek $s_1 = 0,075$ m
- průměr trubek $D = 60,3$ mm
- vnitřní průměr trubek $d = 50,3$ mm



Obrázek 17. Schéma doplnkové plochy SH2

Velikost plochy

$$S_d^{SH2} = 2 \cdot H_{str} \cdot \check{s} + \frac{\check{s}}{\cos 37^\circ} \cdot b + \frac{\check{s}}{\cos 18^\circ} \cdot b =$$

$$= 2 \cdot 4,1725 \cdot 1,238 + \frac{1,238}{\cos 37^\circ} \cdot 13,005 + \frac{1,238}{\cos 18^\circ} \cdot 13,005 = 47,42 \text{ m}^2 \quad (5.165)$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{str}}{O} = \frac{4 \cdot 55,56}{34,355} = 6,47 \text{ m} \quad (5.166)$$

kde: $O = 2 \cdot (H_{str} + b) = 2 \cdot (4,1725 + 13,005) = 34,355$ m – obvod průřezu kanálu

5.8.6.2 Parametry média

Střední tlak média

$p_{p,d}^{str} = p_{EV} = 9,95$ MPa – tlak výparníku dán firemními podklady (viz Tab. 11)

Střední teplota média

$t_{p,d}^{str} = t_{EV} = 310,63$ °C – dáno teplotou nasycení pro p_{EV} (viz Tab. 11)

5.8.6.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

- u doplňkové plochy uvažují pouze podélné proudění spalín

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\gamma} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.167)$$

kde: $\lambda = 0,0843 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,61$ [–] – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$c_t = 1$ – opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn (odečten z [1])

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{0,0843}{6,47} \cdot \left(\frac{7,7 \cdot 6,47}{1,17 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,61^{0,4} \cdot 1 = 7,82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.6.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k_{celk} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.168)$$

$$\text{kde: } k_{celk} = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.169)$$

$$\text{kde: } k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad [m^{-1} \cdot MPa^{-1}]$$

kde: s – účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S_{SH2}^d} = 3,6 \cdot \frac{67,18}{47,42} = 5,1 \text{ m} \quad (5.170)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,13}{3,16 \cdot \sqrt{0,026 \cdot 5,1}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{997,67}{1000} \right) = 4,75 \text{ m}^{-1} \cdot MPa^{-1}$$

$r_{sp} = 0,263$ [–] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.19)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{sp}^{str2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{997,67^2 \cdot 20^2}} = 0,059 \text{ m}^{-1} \cdot MPa^{-1} \quad (5.171)$$

kde: $d_s = 20 \text{ } \mu\text{m}$ – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 2,077 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalínách dle rovnice (2.19)

$$k_{celk} = (4,75 \cdot 0,263 + 0,059 \cdot 2,077) = 1,37 \quad [-]$$

$p = 0,1 \text{ MPa}$ – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-1,37 \cdot 0,1 \cdot 5,1} = 0,503 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{p,d}^{\text{str}} + \varepsilon \cdot \frac{Q_d^{\text{SH2}}}{S_d^{\text{SH2}}} \cdot 10^3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.172)$$

kde: $\varepsilon = 0,0043 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1]

$Q_d^{\text{SH4}} = 200 \text{ kW}$ – odhadovaný výkon doplňkové plochy v prostoru SH2

$$t_z = 310,63 + 0,0043 \cdot \frac{200}{47,42} \cdot 10^3 = 329,17 \text{ }^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{\text{st}} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{\text{sp}}^{\text{str}^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.173)$$

kde: $a_{\text{st}} = 0,8$ [–] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,503 \cdot 997,67^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{602,32}{997,67}\right)^4}{1 - \frac{602,32}{997,67}} = 56,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.6.5 Součinitel přestupu tepla

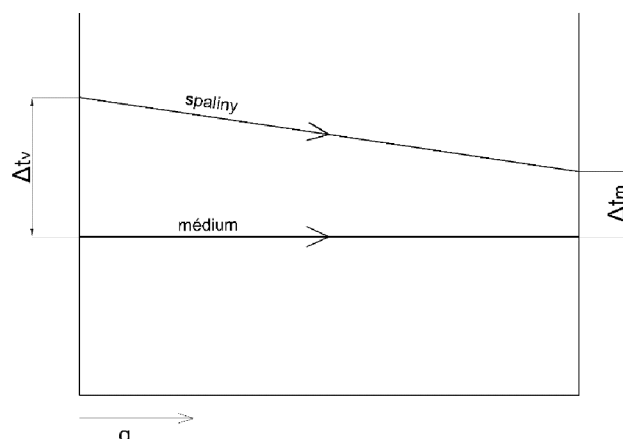
$$\alpha_{1,d} = \alpha_{k,p0} + \alpha_s = 7,82 + 56,1 = 63,93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.174)$$

5.8.6.6 Součinitel prostupu tepla

$$k = \omega \cdot \alpha_{1,d} = 0,35 \cdot 63,93 = 22,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.175)$$

kde: $\omega = 0,35$ [–] – součinitel omývání desek určen dle firemních zkušeností

5.8.6.7 Teplotní spád



Obrázek 18. Teplotní spád doplňkové plochy SH2

$$\Delta t_d^{SH4} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{533,23 - 443,97}{\ln \frac{533,23}{443,97}} = 412,69 \text{ °C} \quad (5.176)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_{EV} = 763,16 - 310,63 = 533,23 \text{ °C} \quad (5.177)$$

$$\Delta t_v = t_{sp}^{out} - t_{EV} = 685,89 - 310,63 = 443,97 \text{ °C} \quad (5.178)$$

5.8.6.8 Tepelný výkon doplňkové plochy v prostoru SH2

$$Q_{d,SH2} = \bar{\Psi} \cdot \Delta t_d^{SH2} \cdot k \cdot S_d^{SH2} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.179)$$

kde: $\bar{\Psi}$ [-] – součinitel tepelné efektivity stěn dle rovnice (4.16)

$$Q_{d,SH2} = 0,45 \cdot 412,69 \cdot 22,24 \cdot 47,42 \cdot 10^{-3} = 174,06 \text{ kW}$$

5.8.6.9 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru SH2

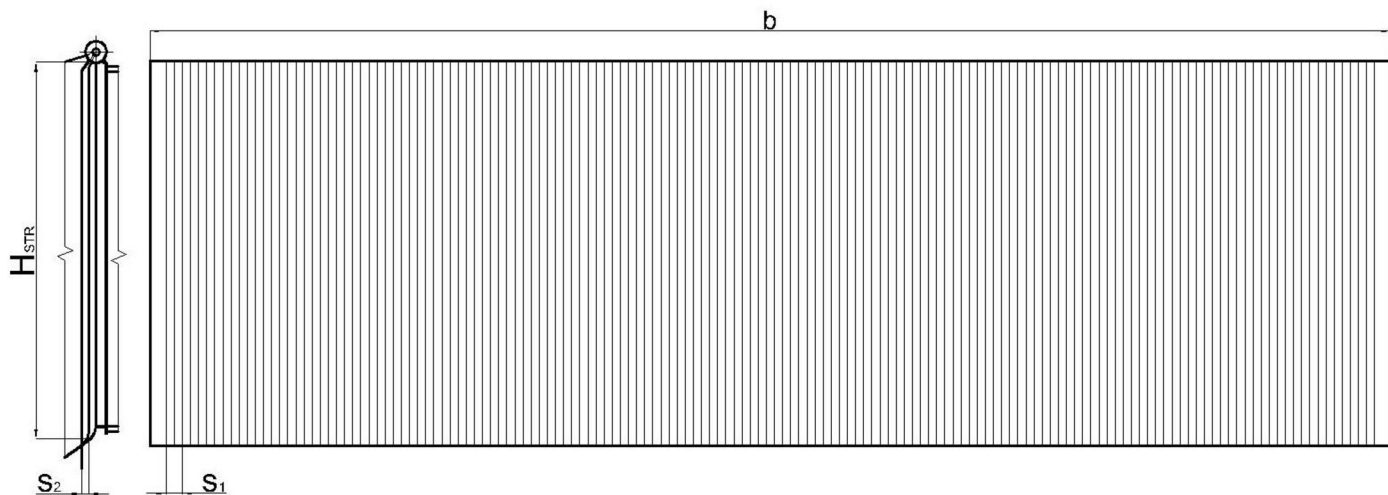
- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak $\pm 50 \text{ °C}$ od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$i_{SH2}^{out} = \frac{(i_{SH2}^{in} \cdot M_{pv}) - (Q_{SH2}^{skut} + Q_{d,SH2})}{M_{pv}} = \frac{(7182 \cdot 10,68) - (8482,83 + 174,06)}{10,68} = 6371,43 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.180)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 683,99 \text{ °C} - \text{určeno z Graf 1 pro } i_{SH2}^{out} \text{ při } \alpha = 1,35$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 685,89 - 683,99 = 1,9 \text{ °C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.181)$$

5.8.7 Výparníková mříž



Obrázek 19. Schéma výparníkové mříže

5.8.7.1 Geometrie výparníkové mříže

Návrhové rozměry mříže

- průměr trubek	$D = 0,0603 \text{ m}$
- vnitřní průměr trubek	$d = 0,0503 \text{ m}$
- rozteč příčná	$s_1 = 0,17 \text{ m}$
- rozteč podélná	$s_2 = 0,075 \text{ m}$
- počet trubek v řadě	$n_{\text{trubek}} = 75$
- počet řad	$n_{\text{řad}} = 3$
- střední výška průřezu	$H_{\text{str}} = 3,75 \text{ m}$

Návrhová plocha mříže

$$S_{\text{MRIZ}} = \pi \cdot D \cdot n_{\text{řad}} \cdot n_{\text{trubek}} \cdot H_{\text{str}} = \pi \cdot 0,0603 \cdot 3 \cdot 75 \cdot 3,75 = 159,84 \text{ m}^2 \quad (5.182)$$

Střední průřez

$$F_{\text{str}} = H_{\text{str}} \cdot b = 3,75 \cdot 13,005 = 48,77 \text{ m}^2 \quad (5.183)$$

kde: $b = 13,005 \text{ m}$ – hloubka tahu (dána firemními podklady)

5.8.7.2 Parametry spalin

Návrhová teplota spalin na výstupu z výparníkové mříže

$$i_{\text{MRIZ}}^{\text{out}} = \frac{(i_{\text{SH}_2}^{\text{out}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{MRIZ}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(6371,43 \cdot 10,68) - 1800}{10,68} = 6202,89 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.184)$$

kde: $Q_{\text{MRIZ}} = 1800 \text{ kW}$ – návrhový výkon výparníkové mříže

$t_{\text{sp}}^{\text{out}} = 667,29 \text{ }^\circ\text{C}$ – odečteno z Graf 1 pro $i_{\text{MRIZ}}^{\text{out}}$, $\alpha = 1,35$

Střední teplota spalin

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{683,99 + 667,29}{2} = 675,64 \text{ °C} \quad (5.185)$$

kde: t_{sp}^{in} [°C] – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z SH2 dle rovnice(5.180))

Objemový průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.186)$$

kde: $O_{sp} = 6,26 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$ – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,35$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 10,68 \cdot 6,26 \cdot (1 - 0,00984) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{675,64 + 273,15}{273,15} \right) = 230,29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední spalinový průřez

$$F_{sp} = F_{str} - D \cdot n_{trubek} \cdot H_{str} = 48,77 - 0,0603 \cdot 75 \cdot 3,75 = 31,81 \text{ m}^2 \quad (5.187)$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{230,29}{31,81} = 7,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.188)$$

5.8.7.3 Parametry médiaStřední tlak páry

$$p_p^{str} = 9,95 \text{ MPa} = p_{EV}$$

Střední teplota média

$$t_p^{str} = 310,63 \text{ °C} \text{ – dána teplotou nasycení při tlaku } p_p^{str}$$

5.8.7.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalin. Trubky výparníkové mříže jsou uspořádané vystřídane.

$$\alpha_k = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.189)$$

kde: $c_s = 0,275 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} [-]$ – oprava na uspořádání svazku

$$\text{kde: } \varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2' - 1} [-] \text{ – poměrná příčná rozteč} \quad (5.190)$$

$$\text{kde: } \sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,17}{0,0603} = 2,82 [-] \quad (5.191)$$

$$\sigma_2' = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} [-] \quad (5.192)$$

$$\text{kde: } \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,075}{0,0603} = 1,24 [-] \quad (5.193)$$

$$\sigma_2' = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 2,82^2 + 1,24^2} = 1,88 [-]$$

$$\varphi_\sigma = \frac{2,82 - 1}{1,88 - 1} = 2,07 [-]$$

$$c_s = 0,275 \cdot 2,07^{0,1} = 0,395 [-]$$

$$c_z = 3,12 \cdot n_{rad}^{0,05} - 2,5 = 3,12 \cdot 3^{0,05} - 2,5 = 0,796 [-] \quad (5.194)$$

$$\lambda = 0,0801 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \text{ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro } t_{sp}^{str} \text{ (určeno z [1])}$$

$$\gamma = 1,076 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1} \text{ – součinitel kin. viskozity spalin pro } t_{sp}^{str} \text{ (určeno z [1])}$$

$$Pr = 0,613 [-] \text{ – Prandtlovo číslo pro } t_{sp}^{str} \text{ (určeno z [1])}$$

$$\alpha_k = 0,395 \cdot 0,796 \cdot \frac{0,0801}{0,0603} \cdot \left(\frac{7,24 \cdot 0,0603}{1,076 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,613^{0,33} = 52,02 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.7.5 Součinitel přestupu tepla sálánímStupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.195)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.196)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}{1000} \right) \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s [m] – účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad [\text{m}] \quad (5.197)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,075}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,188 \text{ m}$$

$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,13$ [-] – objemová část vodní páry dle rovnice (2.17)

$p_{\text{sp}} = 0,026$ MPa – celkový parciální tlak dle rovnice (4.20)

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,13}{3,16 \cdot \sqrt{0,026 \cdot 0,188}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{948,79}{1000} \right) = 28,2 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,263$ [-] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.19)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{948,79^2 \cdot 20^2}} = 0,0604 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.198)$$

kde: $d_s = 20$ μm – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 2,077$ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.19)

$$k_{\text{celk}} = (28,2 \cdot 0,263 + 0,0604 \cdot 2,077) = 7,54 \quad [-]$$

$p = 0,1$ MPa – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-7,54 \cdot 0,1 \cdot 0,188} = 0,132 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p^{\text{str}} + \varepsilon \cdot \frac{Q_{\text{MRIZ}}}{S_{\text{MRIZ}}} \cdot 10^3 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.199)$$

kde: $\varepsilon = 0,0085$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1] pro vystřídání uspořádání a w_{sp}

$$t_z = 310,63 + 0,0085 \cdot \frac{1800}{159,84} \cdot 10^3 = 406,35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.200)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [-] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,132 \cdot 948,79^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{679,5}{948,79}\right)^4}{1 - \frac{679,5}{948,79}} = 15,13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.7.6 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 52,02 + 15,13 = 67,15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.201)$$

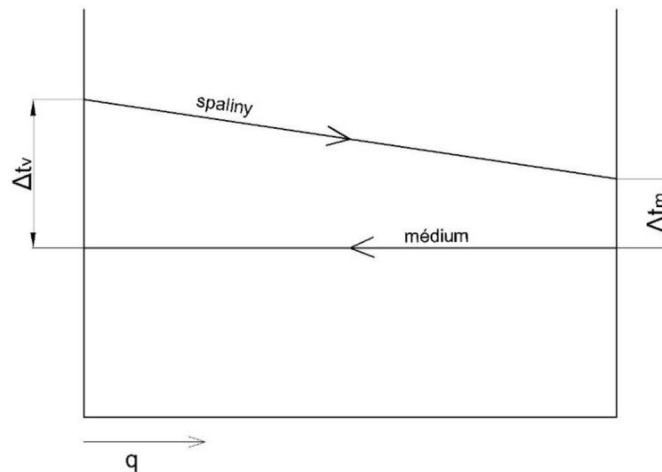
5.8.7.7 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.202)$$

kde: $\frac{1}{\alpha_2} = 0$ – termický odpor na vnitřní straně média lze zanedbat, je-li splněna podmínka $\alpha_2 \gg \alpha_1$ [1]

$$k = \frac{67,15}{1 + (0,0085 + 0) \cdot 67,15} = 42,72 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.7.8 Teplotní spád



Obrázek 20. Teplotní spád výparníkové mříže

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{373,36 - 356,66}{\ln \frac{373,36}{356,66}} = 364,95 \text{ °C} \quad (5.203)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{out} = 683,99 - 310,63 = 373,36 \text{ °C} \quad (5.204)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{in} = 667,29 - 310,63 = 356,66 \text{ °C} \quad (5.205)$$

5.8.7.9 Skutečný tepelný výkon výparníkové mříže

$$Q_{MRIZ}^{skut} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{SH2} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.206)$$

kde: $\xi = 0,72$ [–] – součinitel využití pro výparníkovou mříž při spalování dřevní štěpky (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{MRIZ}^{skut} = 0,72 \cdot 364,95 \cdot 42,72 \cdot 159,84 \cdot 10^{-3} = 1794,04 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{MRIZ}^{skut} - Q_{MRIZ}}{Q_{MRIZ}} \cdot 100 = \frac{1794,04 - 1800}{1800} \cdot 100 = -0,33 \% < 2\% \quad (5.207)$$

5.8.7.10 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru mříže

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak $\pm 50 \text{ °C}$ od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

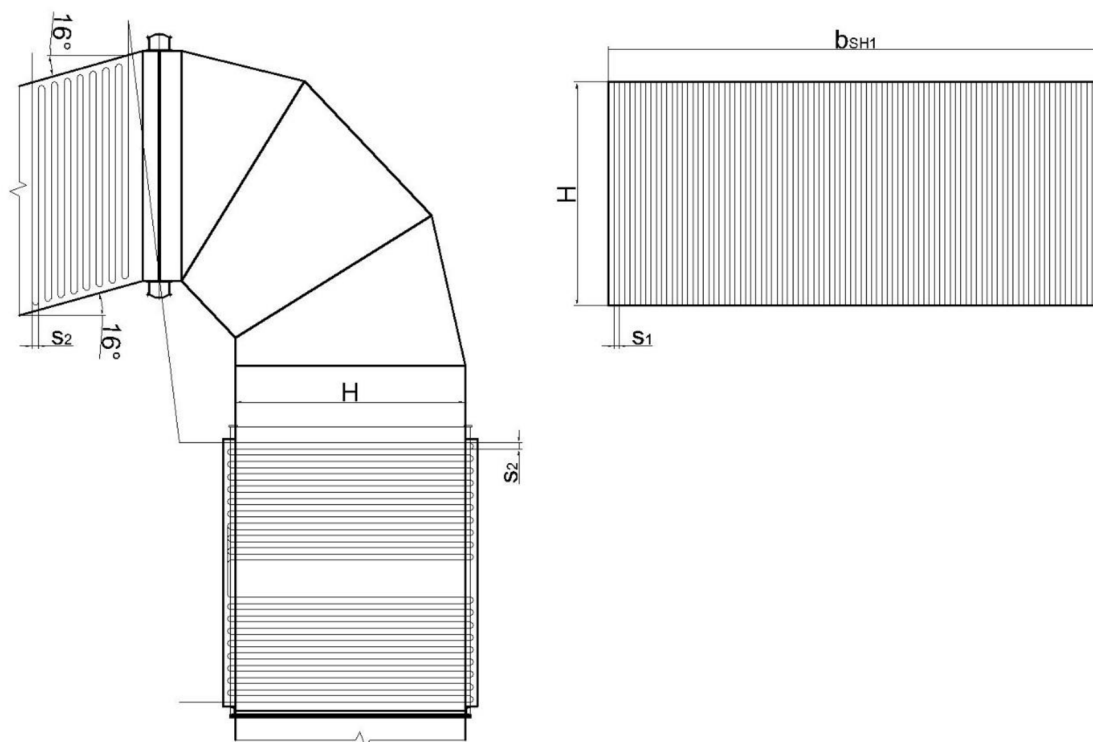
$$i_{MRIZ}^{out} = \frac{(i_{SH2}^{out} \cdot M_{pv}) - Q_{MRIZ}^{skut}}{M_{pv}} = \frac{(6371,43 \cdot 10,68) - 1794,04}{10,68} = 6203,45 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.208)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 667,35 \text{ °C} - \text{určeno z Graf 1 pro } i_{MRIZ}^{out} \text{ při } \alpha = 1,35$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 667,29 - 667,35 = -0,06 \text{ °C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.209)$$

5.8.8 Přehřívák SH1

Plocha přehříváku SH1 musí být rozdělena na tři části. První mezera je způsobena zakřivením tahu kotle. Druhá mezera mezi trubkami přehříváku je vytvořena pro servisní otvor a parní ofukovač ploch. Rozměry trubek, mezer i tahu kotle jsou pro všechny části stejné.



Obrázek 21. Schéma přehříváku SH1

5.8.8.1 Geometrie přehříváku SH1

Návrhové rozměry SH1

- průměr trubek	$D = 0,038 \text{ m}$
- vnitřní průměr trubek	$d = 0,029 \text{ m}$
- rozteč příčná	$s_1 = 0,085 \text{ m}$
- rozteč podélná	$s_2 = 0,1 \text{ m}$
- počet trubek	$n_{\text{trubek}} = 93$
- počet řad	$n_{\text{řad}} = 16 + 20 + 20 = 56$
- střední výška průřezu	$H_{\text{str}} = 3,65 \text{ m}$
- hloubka tahu	$b_{\text{SH1}} = 8 \text{ m}$

Návrhová plocha přehříváku SH1

$$S_{\text{SH1}} = \pi \cdot D \cdot n_{\text{řad}} \cdot n_{\text{trubek}} \cdot H_{\text{str}} = \pi \cdot 0,038 \cdot 56 \cdot 93 \cdot 3,65 = 2269,33 \text{ m}^2 \quad (5.210)$$

Střední průřez

$$F_{\text{str}} = H_{\text{str}} \cdot b_{\text{SH1}} = 3,65 \cdot 8 = 29,2 \text{ m}^2 \quad (5.211)$$

5.8.8.2 Parametry spalin

Návrhová teplota spalin na výstupu z SH1

$$i_{SH1}^{out} = \frac{(i_{MRIZ}^{out} \cdot M_{pv}) - Q_{SH1}}{M_{pv}} = \frac{(6203,45 \cdot 10,68) - 21802,19}{10,68} = 4162,05 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.212)$$

kde: Q_{SH1} [kW] – návrhový tepelný výkon dle rovnice (5.8)

$$t_{sp}^{out} = 459,87 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ – odečteno z Graf 1 pro } i_{SH1}^{out}, \alpha=1,35$$

Střední teplota spalin

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{667,35 + 459,87}{2} = 563,61 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.213)$$

kde: t_{sp}^{in} [°C] – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z MRÍŽ dle rovnice (5.180))

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.214)$$

kde: $O_{sp} = 6,26 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$ – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,35$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 10,68 \cdot 6,26 \cdot (1 - 0,00984) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{563,61 + 273,15}{273,15} \right) = 203,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední spalinový průřez

$$F_{sp} = F_{str} - D \cdot n_{trubek} \cdot H_{str} = 29,2 - 0,038 \cdot 93 \cdot 3,65 = 16,3 \text{ m}^2 \quad (5.215)$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{203,1}{16,3} = 12,46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.216)$$

5.8.8.3 Parametry médiaStřední teplota páry

$$t_p^{\text{str}} = \frac{t_p^{\text{in}} + t_p^{\text{out}}}{2} = \frac{310,63 + 418}{2} = 364,32 \text{ °C} \quad (5.217)$$

kde: $t_p^{\text{in}}, t_p^{\text{out}}$ [°C] – vstupní, výstupní teplota páry pro SH1 odečtena z Tab. 11

Střední tlak páry

$$p_p^{\text{str}} = \frac{p_p^{\text{in}} + p_p^{\text{out}}}{2} = \frac{9,95 + 9,75}{2} = 9,85 \text{ MPa} \quad (5.218)$$

kde: $p_p^{\text{in}}, p_p^{\text{out}}$ [MPa] – vstupní, výstupní tlak páry pro SH1 odečten z Tab. 11

Rychlost páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pp}^{\text{SH1}} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\text{trubek}}^{\text{SH1}}} = \frac{4 \cdot (55,56 - 0,545 - 4,3) \cdot 0,0238}{\pi \cdot 0,029^2 \cdot 93} = 19,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.219)$$

kde: v – měrný objem pro t_p^{str} a p_p^{str} určen pomocí aplikace SteamProperty [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

$$v = 0,0238 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

5.8.8.4 Součinitel přestupu tepla na straně média

$$\alpha_2 = \alpha_N \cdot c_d [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.220)$$

kde: α_N – nomogramový součinitel odečten z [1] pro w_p , d a p_p^{str}

$$\alpha_N = 3250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

c_d – opravný koeficient na vnitřní průměr trubky odečten z [1]

$$c_d = 1 [-]$$

$$\alpha_2 = 3250 \cdot 1 = 3250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.8.5 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalin. Trubky přehříváku SH1 jsou uspořádané za sebou pro snížení opotřebení materiálu spalinami.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.221)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \text{ – oprava na uspořádání svazku} \quad (5.222)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,085}{0,038} = 2,24 [-] \quad (5.223)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,63 [-] \quad (5.224)$$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 2,24 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,63}{2}\right)^3]^{-2} = 1,1 [-]$$

$\lambda = 0,0706 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 0,874 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kin. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,624 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot \frac{0,0706}{0,038} \cdot \left(\frac{12,46 \cdot 0,038}{0,874 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,624^{0,33} = 93,48 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.8.6 Součinitel přestupu tepla sálánímStupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.225)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.226)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}{1000} \right) \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s [m] – účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad [\text{m}] \quad (5.227)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,085 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1 \right) = 0,222 \text{ m}$$

$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,13$ [-] – objemová část vodní páry dle rovnice (2.17)

$p_{\text{sp}} = 0,026$ MPa – celkový parciální tlak dle rovnice (4.20)

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,13}{3,16 \cdot \sqrt{0,026 \cdot 0,222}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{836,76}{1000} \right) = 27,55 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,263$ [-] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.19)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{836,76^2 \cdot 20^2}} = 0,0657 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.228)$$

kde: $d_s = 20$ μm – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 2,077$ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.19)

$$k_{\text{celk}} = (27,55 \cdot 0,263 + 0,0657 \cdot 2,077) = 7,38 \quad [-]$$

$p = 0,1$ MPa – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-7,38 \cdot 0,1 \cdot 0,222} = 0,151 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p^{\text{str}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{\text{SH1}}}{S_{\text{SH1}}} \cdot 10^3 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.229)$$

kde: $\varepsilon = 0,0056$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1] pro w_{sp}

$$t_z = 364,32 + \left(0,0056 + \frac{1}{3250} \right) \cdot \frac{21826,33}{2269,33} \cdot 10^3 = 421,07 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.230)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [-] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

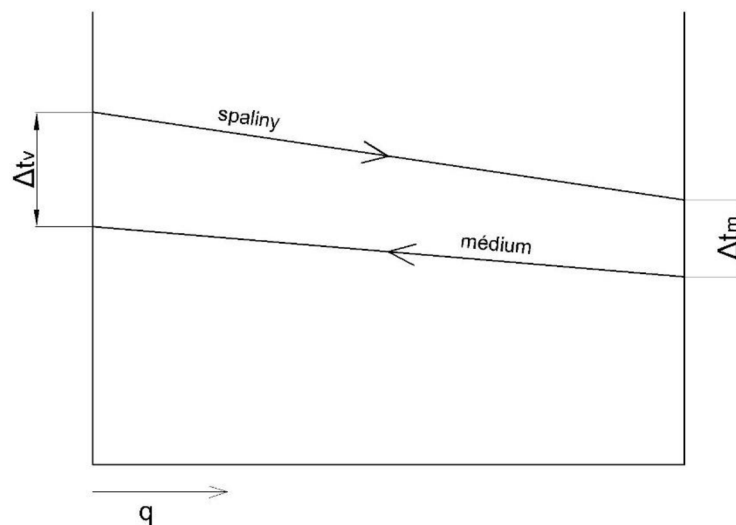
$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,151 \cdot 836,76^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{694,22}{836,76}\right)^4}{1 - \frac{694,22}{836,76}} = 14,04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.8.7 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 93,48 + 14,04 = 107,52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.231)$$

5.8.8.8 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1} = \frac{107,52}{1 + \left(0,0056 + \frac{1}{3250}\right) \cdot 107,52} = 65,75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.232)$$

5.8.8.9 Teplotní spád

Obrázek 22. Teplotní spád SH1

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{249,35 - 149,24}{\ln \frac{249,35}{149,24}} = 195,03 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.233)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{out} = 667,35 - 418 = 249,35 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.234)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{in} = 459,87 - 310,63 = 149,24 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.235)$$

5.8.8.10 Skutečný tepelný výkon přehříváku SH1

$$Q_{SH1}^{skut} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{SH1} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.236)$$

kde: $\xi = 0,75$ [-] – součinitel využití pro SH1 při spalování dřevní štěrky (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{SH1}^{skut} = 0,75 \cdot 195,03 \cdot 65,75 \cdot 2269,33 \cdot 10^{-3} = 21826,33 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{SH1}^{skut} - Q_{SH1}}{Q_{SH1}} \cdot 100 = \frac{21826,33 - 21802,19}{21802,19} \cdot 100 = 0,11 \% < 2\% \quad (5.237)$$

5.8.8.11 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru SH1

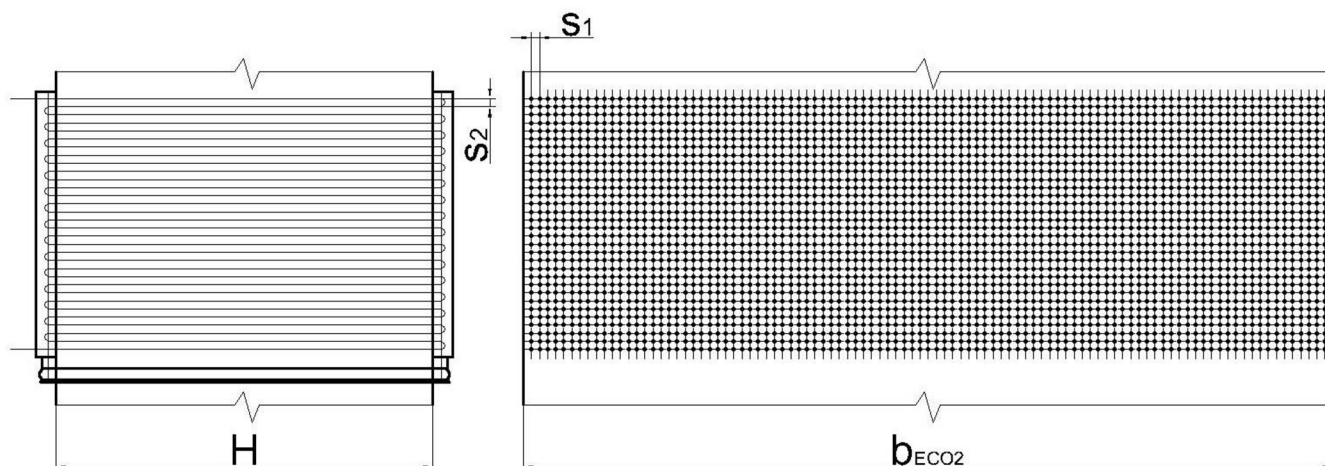
- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak ± 50 °C od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$i_{SH1}^{out,skut} = \frac{(i_{MRIZ}^{out} \cdot M_{pv}) - Q_{SH1}^{skut}}{M_{pv}} = \frac{(6203,45 \cdot 10,68) - 21826,33}{10,68} = 4159,79 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.238)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 459,63 \text{ °C} - \text{určeno z Graf 1 pro } i_{SH1}^{out,skut} \text{ při } \alpha = 1,35$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 459,87 - 459,63 = 0,24 \text{ °C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.239)$$

5.8.9 Ekonomizér (ohřívák vody) ECO2



Obrázek 23. Schéma ekonomizéru ECO2

5.8.9.1 Geometrie ekonomizéru ECO2

Návrhové rozměry ECO2

- průměr trubek	$D = 0,032 \text{ m}$
- vnitřní průměr trubek	$d = 0,0248 \text{ m}$
- rozteč příčná	$s_1 = 0,08 \text{ m}$
- rozteč podélná	$s_2 = 0,08 \text{ m}$
- počet trubek	$n_{\text{trubek}} = 99$
- počet řad	$n_{\text{řad}} = 32$
- šířka tahu	$H = 3,65 \text{ m}$
- hloubka tahu	$b_{\text{ECO2}} = 8 \text{ m}$

Návrhová plocha ECO2

$$S_{\text{ECO2}} = \pi \cdot D \cdot n_{\text{řad}} \cdot n_{\text{trubek}} \cdot H = \pi \cdot 0,032 \cdot 32 \cdot 99 \cdot 3,65 = 1162,46 \text{ m}^2 \quad (5.240)$$

Střední průřez

$$F_{\text{str}} = H \cdot b_{\text{ECO2}} = 3,65 \cdot 8 = 29,2 \text{ m}^2 \quad (5.241)$$

5.8.9.2 Parametry spalin

Návrhová teplota spalin na výstupu z ECO2

$$i_{\text{ECO2}}^{\text{out}} = \frac{(i_{\text{SH1}}^{\text{out,skut}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{ECO2}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(4159,79 \cdot 10,68) - 11516,2}{10,68} = 3081,49 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.242)$$

kde: Q_{ECO2} [kW] – návrhový tepelný výkon dle rovnice ((5.10)

$t_{\text{sp}}^{\text{out}} = 346,05 \text{ }^\circ\text{C}$ – odečteno z Graf 1 pro $i_{\text{ECO2}}^{\text{out}}$, $\alpha = 1,35$

Střední teplota spalin

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{459,63 - 346,05}{2} = 402,84 \text{ °C} \quad (5.243)$$

kde: t_{sp}^{in} [°C] – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z SH1 dle rovnice (5.238))

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.244)$$

kde: $O_{sp} = 6,26 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$ – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,35$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 10,68 \cdot 6,26 \cdot (1 - 0,00984) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{402,84 + 273,15}{273,15} \right) = 164,08 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední spalinový průřez

$$F_{sp} = F_{str} - D \cdot n_{trubek} \cdot H_{str} = 29,2 - 0,032 \cdot 99 \cdot 3,65 = 17,64 \text{ m}^2 \quad (5.245)$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{164,08}{17,64} = 9,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.246)$$

5.8.9.3 Parametry médiaStřední teplota páry

$$t_p^{str} = \frac{t_p^{in} + t_p^{out}}{2} = \frac{183 + 233}{2} = 208 \text{ °C} \quad (5.247)$$

kde: t_p^{in}, t_p^{out} [°C] – vstupní, výstupní teplota páry pro ECO2 odečtena z Tab. II

Střední tlak páry

$$p_p^{str} = \frac{p_p^{in} + p_p^{out}}{2} = \frac{10,05 + 9,95}{2} = 10 \text{ MPa} \quad (5.248)$$

kde: p_p^{in}, p_p^{out} [MPa] – vstupní, výstupní tlak páry pro ECO2 odečten z Tab. II

5.8.9.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalín. Trubky přehříváku ECO2 jsou uspořádané za sebou.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.249)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \text{ – oprava na uspořádání svazku} \quad (5.250)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,08}{0,03} = 2,5 [-] \quad (5.251)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,03} = 2,5 [-] \quad (5.252)$$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 2,5 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,5}{2}\right)^3]^{-2} = 1,07 [-]$$

$\lambda = 0,0569 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 0,609 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kin. viskozity spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,64 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,07 \cdot \frac{0,0569}{0,032} \cdot \left(\frac{9,3 \cdot 0,032}{0,609 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,64^{0,33} = 81,85 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.9.5 Součinitel přestupu tepla sálánímStupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.253)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.254)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}{1000} \right) \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s [m] – účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad [\text{m}] \quad (5.255)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,08}{0,032^2} - 1 \right) = 0,2 \text{ m}$$

$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,13$ [-] – objemová část vodní páry dle rovnice (2.17)

$p_{\text{sp}} = 0,026$ MPa – celkový parciální tlak dle rovnice (4.20)

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,13}{3,16 \cdot \sqrt{0,026 \cdot 0,2}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{675,99}{1000} \right) = 31,55 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,263$ [-] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.19)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{675,99^2 \cdot 20^2}} = 0,0758 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.256)$$

kde: $d_s = 20$ μm – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 2,077$ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.19)

$$k_{\text{celk}} = (31,55 \cdot 0,263 + 0,0758 \cdot 2,077) = 8,45 \quad [-]$$

$p = 0,1$ MPa – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-8,45 \cdot 0,1 \cdot 0,2} = 0,156 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p^{\text{str}} + \varepsilon \cdot \frac{Q_{\text{ECO}_2}}{S_{\text{ECO}_2}} \cdot 10^3 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.257)$$

kde: $\varepsilon = 0,0062$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1] pro w_{sp}

$$t_z = 208 + 0,0062 \cdot \frac{11516,18}{1162,46} \cdot 10^3 = 269,42 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.258)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [-] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,156 \cdot 675,99^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{542,57}{675,99}\right)^4}{1 - \frac{542,57}{675,99}} = 7,32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

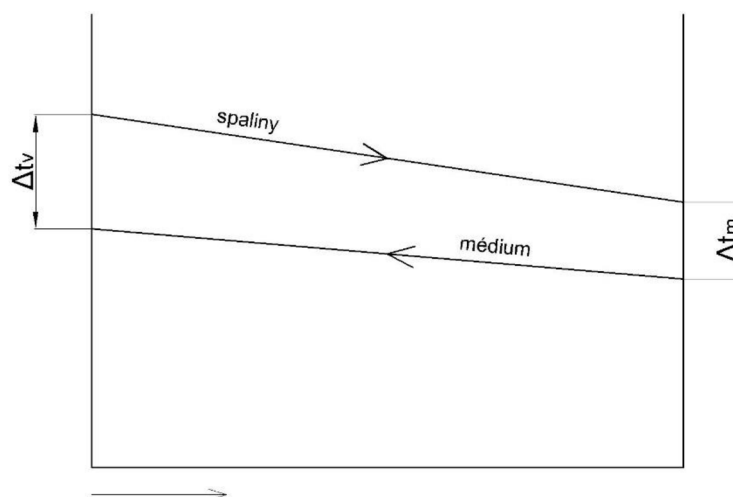
5.8.9.6 Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 81,85 + 7,32 = 89,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.259)$$

5.8.9.7 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1} = \frac{89,17}{1 + (0,0062 + 0) \cdot 89,17} = 57,42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.260)$$

kde: $\frac{1}{\alpha_2} = 0$ – termický odpor na vnitřní straně média lze zanedbat, je-li splněna podmínka $\alpha_2 \gg \alpha_1$ [1]

5.8.9.8 Teplotní spád

Obrázek 24. Teplotní spád ECO2

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{226,63 - 161,05}{\ln \frac{226,63}{161,05}} = 193,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.261)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{out} = 459,63 - 233 = 226,63 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.262)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{in} = 346,05 - 183 = 161,05 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.263)$$

5.8.9.9 Skutečný tepelný výkon ECO2

$$Q_{\text{ECO2}}^{\text{skut}} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{\text{ECO2}} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.264)$$

kde: $\xi = 0,9$ [-] – součinitel využití pro ECO2 při spalování dřevní štěpky (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{\text{ECO2}}^{\text{skut}} = 0,9 \cdot 193,1 \cdot 57,43 \cdot 1162,46 \cdot 10^{-3} = 11600,75 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{\text{ECO2}}^{\text{skut}} - Q_{\text{ECO2}}}{Q_{\text{ECO2}}} \cdot 100 = \frac{11567,78 - 11600,75}{11516,18} \cdot 100 = 0,73 \% < 2\% \quad (5.265)$$

5.8.9.10 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru ECO2

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak ± 50 °C od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$\begin{aligned} i_{\text{ECO2}}^{\text{out,skut}} &= \frac{(i_{\text{SH1}}^{\text{out,skut}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{ECO2}}^{\text{skut}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(4159,79 \cdot 10,68) - 11600,75}{10,68} = \\ &= 3073,57 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (5.266)$$

$$t_{\text{sp}}^{\text{out,skut}} = 345,2 \text{ °C} - \text{určeno z Graf 1 pro } i_{\text{ECO2}}^{\text{out,skut}} \text{ při } \alpha = 1,35$$

$$t_{\text{sp}}^{\text{out}} - t_{\text{sp}}^{\text{out,skut}} = 346,05 - 345,2 = 0,85 \text{ °C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.267)$$

5.8.9.11 Kontrola rychlosti vody

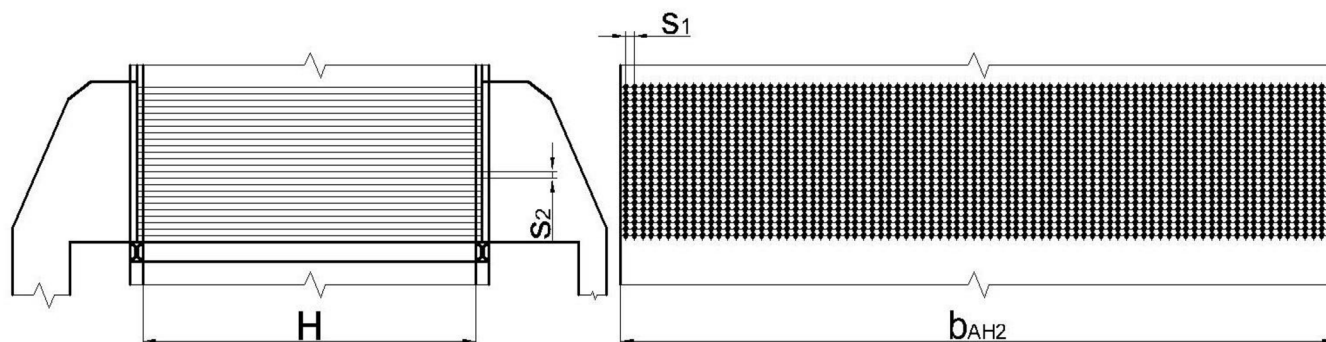
V ekonomizéru je nutno zajistit, aby rychlost proudění vody nebyla nižší jak $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ při plném výkonu. Tím se zabezpečí proudění vody všemi trubkami i při sníženém výkonu kotle. Při nízkých rychlostech by nedocházelo k odtržení vzniklých bublinek od stěny trubky a tím by hrozilo „ucpání“ trubky párou. Při zahlcení trubky párou může dojít k poškození materiálu trubek ekonomizéru vysokými teplotami (dochází k omezení chlazení stěn trubek).

$$\begin{aligned} w_p &= \frac{4 \cdot M_{\text{pp}}^{\text{ECO2}} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\text{trubek}}} = \frac{4 \cdot (55,56 - 0,545 - 4,3 + 0,56) \cdot 1,16 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 99} = \\ &= 1,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned} \quad (5.268)$$

kde: v – měrný objem pro t_p^{str} a p_p^{str} určen pomocí aplikace SteamProperty [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

$$v = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

5.8.10 Ohřívák vzduchu AH2



Obrázek 25. Schéma ohříváku vzduchu AH2

5.8.10.1 Geometrie ohříváku vzduchu AH2

Návrhové rozměry AH2

- průměr trubek	$D = 0,0445$ m
- vnitřní průměr trubek	$d = 0,0395$ m
- rozteč příčná	$s_1 = 0,068$ m
- rozteč podélná	$s_2 = 0,095$ m
- počet příčných řad	$n_1 = 84$
- počet podélných řad	$n_2 = 30$
- počet trubek	$n_{\text{trubek}} = 2016$
- šířka tahu	$H = 3,65$ m
- hloubka tahu	$b_{\text{AH2}} = 8$ m

Návrhová plocha AH2

$$S_{\text{AH2}} = \pi \cdot D \cdot n_{\text{trubek}} \cdot H = \pi \cdot 0,0445 \cdot 2520 \cdot 3,65 = 1285,89 \text{ m}^2 \quad (5.269)$$

Střední průřez

$$F_{\text{str}} = H \cdot b_{\text{AH2}} = 3,65 \cdot 8 = 29,2 \text{ m}^2 \quad (5.270)$$

5.8.10.2 Parametry spalin

Návrhová teplota spalin na výstupu z AH2

$$i_{\text{AH2}}^{\text{out}} = \frac{(i_{\text{ECO2}}^{\text{out,skut}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{AH2}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(3073,57 \cdot 10,68) - 4196,4}{10,68} = 2680,65 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.271)$$

kde: Q_{AH2} [kW] – návrhový tepelný výkon dle rovnice (5.13)

$t_{\text{sp}}^{\text{out}} = 301,35$ °C – odečteno z Graf 1 pro $i_{\text{AH2}}^{\text{out}}$, $\alpha = 1,36$

Střední teplota spalin

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{345,53 - 301,35}{2} = 323,27 \text{ °C} \quad (5.272)$$

kde: t_{sp}^{in} [°C] – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z ECO2 dle (5.266))

Objemový průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.273)$$

kde: O_{sp} [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$] – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,36$ [-]

$$O_{sp} = O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin} = 4,81 + (1,36 - 1) \cdot 4,147 = 6,3 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (5.274)$$

$\Delta p = 150$ Pa – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325$ Pa – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 10,68 \cdot 6,3 \cdot (1 - 0,00984) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{323,27 + 273,15}{273,15} \right) = 145,76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední spalinový průřez

$$F_{sp} = F_{str} - D \cdot n_1 \cdot H_{str} = 29,2 - 0,0445 \cdot 84 \cdot 3,65 = 15,56 \text{ m}^2 \quad (5.275)$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{145,76}{15,56} = 9,37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.276)$$

5.8.10.3 Parametry médiaStřední teplota vzduchu

$$t_{vz}^{str} = \frac{t_{vz}^{in} + t_{vz}^{out}}{2} = \frac{115 + 200}{2} = 157,5 \text{ °C} \quad (5.277)$$

kde: $t_{vz}^{in}, t_{vz}^{out}$ [°C] – vstupní, výstupní teplota vzduchu pro AH2 odečtena z Tab. 11

Objemový průtok vzduchu

$$V_{vz} = M_{pv} \cdot O_{vzmin} \cdot x_{sek} \cdot \beta \cdot \left(\frac{t_{vz}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.278)$$

kde: $O_{vzmin} = 4,15 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ – min. objem vzduchu, viz rovnice (2.3)

$\beta = 1,3$ [-] – přebytek vzduchu v ohříváku

$$V_{vz} = 10,68 \cdot 4,15 \cdot 0,65 \cdot 1,3 \cdot \left(\frac{157,5 + 273,15}{273,15} \right) = 59,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost vzduchu

$$w_{vz} = \frac{4 \cdot V_{vz}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{trubek}} = \frac{4 \cdot 59}{\pi \cdot 0,0395^2 \cdot 2520} = 19,12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.279)$$

5.8.10.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalín, trubky ohříváku vzduchu AH2 jsou uspořádané za sebou.

$$\alpha_{k,sp} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.280)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \text{ – oprava na uspořádání svazku} \quad (5.281)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,068}{0,0445} = 1,53 [-] \quad (5.282)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,095}{0,0445} = 2,13 [-] \quad (5.283)$$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 1,53 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,13}{2}\right)^3]^{-2} = 1 [-]$$

$\lambda = 0,0502 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 0,493 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kin. viskozity spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,65 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_{k,sp} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0502}{0,0445} \cdot \left(\frac{9,37 \cdot 0,0445}{0,493 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,65^{0,33} = 69,83 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.10.5 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu

$$\alpha_{k,vz} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{vz} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.284)$$

kde: $\lambda = 0,0361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ - součinitel tepel. vodivosti vzduchu pro t_{vz}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 29,79 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - součinitel kin. viskozity vzduchu pro t_{vz}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,71[-]$ - Prandtlovo číslo vzduchu pro t_{vz}^{str} (určeno z [1])

$c_t [-]$ - opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn (odečten z [1])

$$c_t = \left(\frac{T_{vz}^{str}}{\frac{T_{vz}^{str} + T_{sp}^{str}}{2}} \right)^{0,5} = \left(\frac{430,65}{\frac{460,65 + 596,75}{2}} \right)^{0,5} = 0,915 [-] \quad (5.285)$$

$$\alpha_{k,vz} = 0,023 \cdot \frac{0,03619}{0,0395} \cdot \left(\frac{19,12 \cdot 0,0395}{29,79 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,71^{0,4} \cdot 0,915 = 55,89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.10.6 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_{k,sp} \cdot \alpha_{k,vz}}{\alpha_{k,sp} + \alpha_{k,vz}} = \frac{69,83 \cdot 55,89}{69,83 + 55,89} = 31,05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.286)$$

5.8.10.7 Součinitel ψ pro křížové prouděníParametr P

$$P = \frac{t_{sp}^{in} - t_{sp}^{out}}{t_{sp}^{in} - t_{vz}^{in}} = \frac{345,2 - 301,35}{345,2 - 115} = 0,19 [-] \quad (5.287)$$

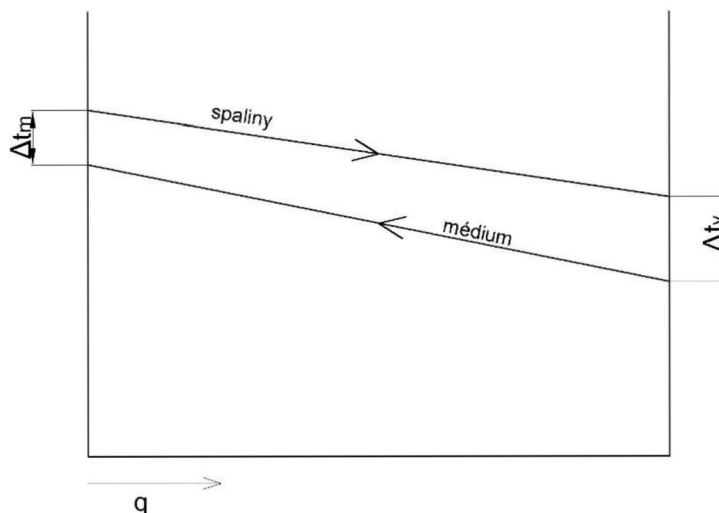
Parametr R

$$R = \frac{t_{vz}^{out} - t_{vz}^{in}}{t_{sp}^{out} - t_{sp}^{in}} = \frac{200 - 115}{345,2 - 301,35} = 1,94 [-] \quad (5.288)$$

Součinitel ψ_{kr}

$\psi_{kr} = 0,91 [-]$ - odečteno z nomogramu z [1] pro parametry P a R

5.8.10.8 Teplotní spád



Obrázek 26. Teplotní spád AH2

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} \cdot \psi_{kr} = \frac{186,35 - 145,2}{\ln \frac{186,35}{145,2}} \cdot 0,92 = 150,08 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.289)$$

$$\text{kde: } \Delta t_m = t_{sp}^{in} - t_{vz}^{out} = 345,2 - 200 = 145,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.290)$$

$$\Delta t_v = t_{sp}^{out} - t_{vz}^{in} = 301,35 - 115 = 186,35 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.291)$$

5.8.10.9 Skutečný tepelný výkon AH2

$$Q_{AH2}^{skut} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{AH2} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.292)$$

kde: $\xi = 0,7$ [-] – součinitel využití pro AH2 při spalování dřevní štěpky (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{AH2}^{skut} = 0,9 \cdot 150,08 \cdot 31,05 \cdot 1285,89 \cdot 10^{-3} = 4193,76 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{AH2}^{skut} - Q_{AH2}}{Q_{AH2}} \cdot 100 = \frac{4239,85 - 4193,76}{4196,4} \cdot 100 = -0,06 \% < 2\% \quad (5.293)$$

5.8.10.10 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru AH2

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak $\pm 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

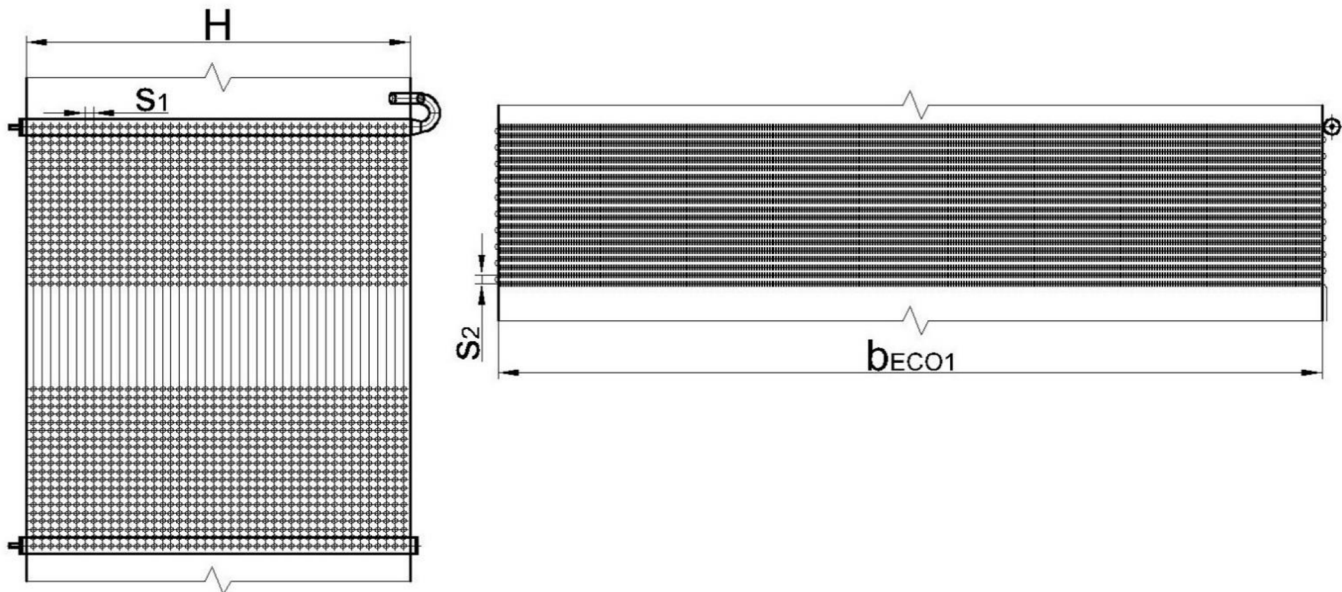
$$\begin{aligned} i_{AH2}^{out,skut} &= \frac{(i_{ECO2}^{out,skut} \cdot M_{pv}) - Q_{AH2}^{skut}}{M_{pv}} = \frac{(3073,57 \cdot 10,68) - 4293,76}{10,68} = \\ &= 2680,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (5.294)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 301,37 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ – určeno z Graf 1 pro } i_{AH2}^{out,skut} \text{ při } \alpha = 1,36$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 301,35 - 301,37 = -0,02 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.295)$$

5.8.11 Ekonomizér (ohřívák vody) ECO1

První ohřívák vody je tvořen žebrovanými trubkami uspořádanými za sebou. Trubky ekonomizéru jsou otočené o 90° (vzhledem k ostatním konvekčním plochám) kvůli ofukování párou. Otočení trubek zabezpečí ofouknutí popílku i z prostoru mezi jednotlivými žebry. Plocha je rozdělena pro servisní otvor.



Obrázek 27. Schéma ekonomizéru ECO1

5.8.11.1 Geometrie ekonomizéru ECO1

Návrhové rozměry

- průměr trubek	$D = 0,032 \text{ m}$
- vnitřní průměr trubek	$d = 0,0248 \text{ m}$
- rozteč příčná	$s_1 = 0,082 \text{ m}$
- rozteč podélná	$s_2 = 0,08 \text{ m}$
- počet trubek	$n_{\text{trubek}} = 44$
- počet řad	$n_{\text{řad}} = 40$
- šířka tahu	$H = 3,65 \text{ m}$
- hloubka tahu	$b_{\text{ECO1}} = 8 \text{ m}$
- výška žeber	$h_z = 0,01 \text{ m}$
- tloušťka žeber	$\delta_z = 0,001 \text{ m}$
- počet žeber na 1 m trubky	$n_z = 80$
- rozteč žeber	$s_z = 0,0125 \text{ m}$
- průměr žeber	$D_z = 0,052 \text{ m}$

Plocha 1 m trubky

$$S_{1m} = \pi \cdot D - \pi \cdot D \cdot \delta_z \cdot n_z + \pi \cdot D_z \cdot \delta_z \cdot n_z + \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{D_z^2}{2} - \frac{D^2}{2} \right) \cdot n_z \quad [m^2] \quad (5.296)$$

$$S_{1m} = \pi \cdot 0,032 - \pi \cdot 0,032 \cdot 0,001 \cdot 80 + \pi \cdot 0,052 \cdot 0,001 \cdot 80 + \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{0,052^2}{2} - \frac{0,032^2}{2} \right) \cdot 80 =$$

$$= 0,317 \text{ m}^2$$

Návrhová plocha

$$S_{\text{ECO1}} = S_{1\text{m}} \cdot H \cdot n_{\text{řad}} \cdot n_{\text{trubek}} = 0,317 \cdot 3,65 \cdot 40 \cdot 44 = 4458,75 \text{ m}^2 \quad (5.297)$$

Střední průřez

$$F_{\text{str}} = H \cdot b_{\text{ECO1}} = 3,65 \cdot 8 = 29,2 \text{ m}^2 \quad (5.298)$$

5.8.11.2 Parametry spalinNávrhová teplota spalin na výstupu z ECO1

$$i_{\text{ECO1}}^{\text{out}} = \frac{(i_{\text{AH2}}^{\text{out,skut}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{ECO1}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(2680,9 \cdot 10,68) - 11679,7}{10,68} = 1587,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.299)$$

kde: $Q_{\text{ECO1}} = 11679,7 \text{ kW}$ – návrhový tepelný výkon dle rovnice (5.11))

$t_{\text{sp}}^{\text{out}} = 181,66 \text{ }^\circ\text{C}$ – odečteno z Graf 1 pro $i_{\text{ECO1}}^{\text{out}}$, $\alpha=1,36$

Střední teplota spalin

$$t_{\text{sp}}^{\text{str}} = \frac{t_{\text{sp}}^{\text{in}} + t_{\text{sp}}^{\text{out}}}{2} = \frac{301,28 - 181,66}{2} = 241,52 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.300)$$

kde: $t_{\text{sp}}^{\text{in}} [^\circ\text{C}]$ – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z AH2 dle rovnice (5.294))

Objemový průtok spalin

$$V_{\text{sp}} = M_{\text{pv}} \cdot O_{\text{sp}} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}^{\text{str}} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.301)$$

kde: $O_{\text{sp}} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$ – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,36$ [-]

$$O_{\text{sp}} = O_{\text{spmin}} + (\alpha - 1) \cdot O_{\text{vzmin}} = \quad (5.302)$$

$$= 4,81 + (1,36 - 1) \cdot 4,147 = 6,3 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{\text{sp}} = 10,68 \cdot 6,3 \cdot (1 - 0,00984) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{241,52 + 273,15}{273,15} \right) = 125,78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední spalinový průřez

$$F_{\text{sp}} = F_{\text{str}} - (D \cdot n_{\text{trubek}} \cdot H + 2 \cdot \delta_z \cdot n_z \cdot h_z \cdot n_{\text{trubek}} \cdot H) [\text{m}^2] \quad (5.303)$$

$$F_{\text{sp}} = 29,2 - (0,032 \cdot 44 \cdot 3,65 + 2 \cdot 0,001 \cdot 80 \cdot 0,01 \cdot 44 \cdot 3,65) = 17,37 \text{ m}^2$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{125,78}{17,37} = 7,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.304)$$

5.8.11.3 Parametry médiaStřední teplota páry

$$t_p^{str} = \frac{t_p^{in} + t_p^{out}}{2} = \frac{130 + 183}{2} = 156,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.305)$$

kde: t_p^{in} , t_p^{out} [$^\circ\text{C}$] – vstupní, výstupní teplota páry pro ECO1 odečtena z Tab. II

Střední tlak páry

$$p_p^{str} = \frac{p_p^{in} + p_p^{out}}{2} = \frac{10,05 + 10,25}{2} = 10,15 \text{ MPa} \quad (5.306)$$

kde: p_p^{in} , p_p^{out} [MPa] – vstupní, výstupní tlak páry pro ECO1 odečten z Tab. II

5.8.11.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k = 0,105 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{s_z} \cdot \left(\frac{d}{s_z}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z}{s_z}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot s_z}{\gamma}\right)^{0,72} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.307)$$

kde: $c_z = 1$ [–] – opravný koeficient na počet příčných řad ve svazku

$c_s = 1$ [–] – opravný koeficient na uspořádání trubek ve svazku

$\lambda = 0,0433 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 3,81 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kin. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_k = 0,105 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0433}{0,0125} \cdot \left(\frac{0,0248}{0,0125}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,01}{0,0125}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{7,24 \cdot 0,0125}{3,81 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,72} = 69,72 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.11.5 Redukovaný součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{1r} = \left(\frac{S_z}{S} \cdot E + \frac{S_h}{S} \right) \cdot \frac{\Psi_z \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \Psi_z \cdot \alpha_k} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.308)$$

$$\text{kde: } \frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z}{D} - \frac{\delta_z}{D}\right)} = \frac{\left(\frac{0,052}{0,032}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0,052}{0,032}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0,0125}{0,032} - \frac{0,001}{0,032}\right)} = 0,695 \quad [-]$$

E [-] – součinitel efektivnosti žebra, určuje se v závislosti $\beta \cdot h_z$ a $\frac{D_z}{D}$ z nomogramu [1]

$$\beta \cdot h_z = \sqrt{\frac{2 \cdot \Psi_z \cdot \alpha_k}{\delta_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \Psi_z \cdot \alpha_k)}} \cdot h_z \quad [-] \quad (5.309)$$

kde: $\Psi_z = 0,85$ [-] – koeficient charakterizující nerovnoměrné rozdělení α_k po povrchu žebra, odečteno z [-]

$\lambda_z = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti žeber (odečten z firemních podkladů)

$\varepsilon = 0,0091$ [-] – součinitel znečištění (odečten z [1] pro w_{sp} a pro žebrované trubky)

$$\beta \cdot h_z = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 69,69}{0,001 \cdot 25 \cdot (1 + 0,0091 \cdot 0,85 \cdot 69,69)}} \cdot 0,01 = 0,555 \quad [-]$$

$$\frac{D_z}{D} = \frac{0,052}{0,032} = 1,625 \quad [-] \quad (5.310)$$

$$E = 0,96 \quad [-]$$

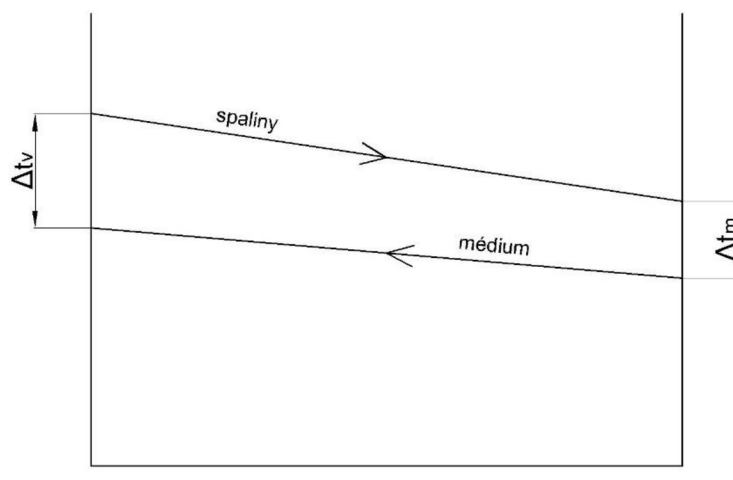
$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S} = 1 - 0,695 = 0,305 \quad [-] \quad (5.311)$$

$$\alpha_{1r} = (0,695 \cdot 0,96 + 0,305) \cdot \frac{0,85 \cdot 69,72}{1 + 0,0091 \cdot 0,85 \cdot 69,72} = 37,43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.11.6 Součinitel prostupu tepla

$$k = \alpha_{1r} = 37,43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.8.11.7 Teplotní spád



Obrázek 28. Teplotní spád ECO1

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{118,37 - 51,66}{\ln \frac{118,37}{51,66}} = 80,46 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.312)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{out} = 301,37 - 183 = 118,37 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.313)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{in} = 181,66 - 130 = 51,66 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.314)$$

5.8.11.8 Skutečný tepelný výkon

$$Q_{ECO1}^{skut} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{ECO1} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.315)$$

kde: $\xi = 0,88$ [-] – součinitel využití pro ECO1 při spalování dřevní štěpky (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{ECO1}^{skut} = 0,88 \cdot 80,46 \cdot 37,43 \cdot 4458,75 \cdot 10^{-3} = 11816,83 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{ECO1}^{skut} - Q_{ECO1}}{Q_{ECO1}} \cdot 100 = \frac{11816,83 - 11679,71}{11679,71} \cdot 100 = 1,17 \% < 2\% \quad (5.316)$$

5.8.11.9 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru ECO1

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak $\pm 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$\begin{aligned} i_{ECO1}^{out,skut} &= \frac{(i_{AH2}^{out,skut} \cdot M_{pv}) - Q_{ECO1}^{skut}}{M_{pv}} = \frac{(2680,9 \cdot 10,68) - 11816,83}{10,68} = \\ &= 1574,45 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (5.317)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 180,26 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ – určeno z Graf 1 pro } i_{ECO1}^{out,skut} \text{ při } \alpha = 1,36$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 181,66 - 180,26 = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.318)$$

5.8.11.10 Kontrola rychlosti vody

V ekonomizéru je nutno zajistit, aby rychlost proudění vody nebyla nižší jak $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ při plném výkonu. Tím se zabezpečí proudění vody všemi trubkami i při sníženém výkonu kotle. Při nízkých rychlostech by nedocházelo k odtržení vzniklých bublinek od stěny trubky a tím by hrozilo „ucpání“ trubky párou. Při zahlcení trubky párou může dojít k poškození materiálu trubek ekonomizéru vysokými teplotami (dochází k omezení chlazení stěn trubek).

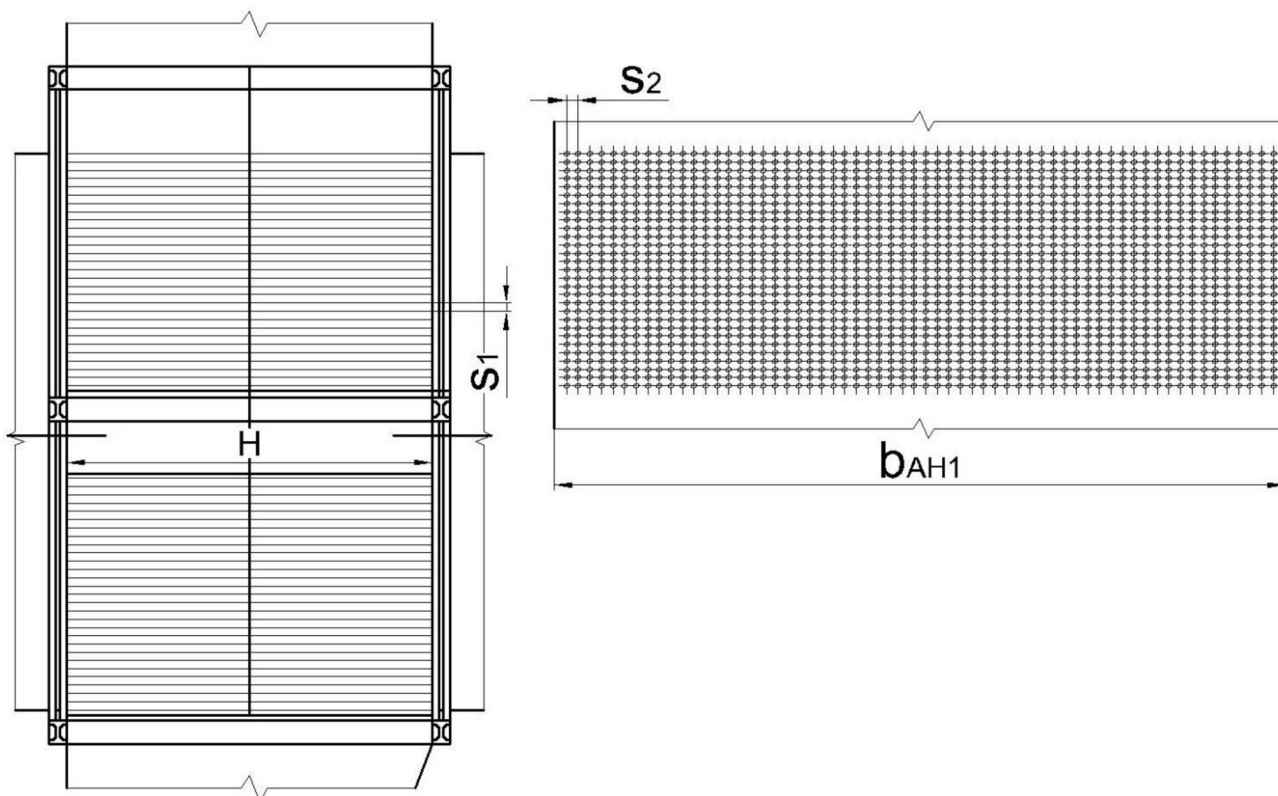
$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pp}^{\text{CO}_1, v}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\text{trubek}}} = \frac{4 \cdot (55,56 - 0,545 - 4,3 + 0,56) \cdot 1,09 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 44} = \quad (5.319)$$

$$= 2,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde: v – měrný objem pro t_p^{str} a p_p^{str} určen pomocí aplikace SteamProperty [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

$$v = 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

5.8.12 Ohřívák vzduchu AH1



Obrázek 29. Schéma ohříváku vzduchu AH1

5.8.12.1 Geometrie ohříváku vzduchu AH1

Návrhové rozměry AH1

- průměr trubek	$D = 0,0445 \text{ m}$
- vnitřní průměr trubek	$d = 0,0395 \text{ m}$
- rozteč příčná	$s_1 = 0,068 \text{ m}$
- rozteč podélná	$s_2 = 0,095 \text{ m}$
- počet příčných řad	$n_1 = 62$
- počet podélných řad	$n_2 = 58$
- počet trubek	$n_{\text{trubek}} = 3596$
- šířka tahu	$H = 3 \text{ m}$
- hloubka tahu	$b_{\text{AH1}} = 6 \text{ m}$

Návrhová plocha AH1

$$S_{\text{AH1}} = \pi \cdot D \cdot n_{\text{trubek}} \cdot H = \pi \cdot 0,0445 \cdot 3596 \cdot 3 = 1508,17 \text{ m}^2 \quad (5.320)$$

Střední průřez

$$F_{\text{str}} = H \cdot b_{\text{AH1}} = 3 \cdot 6 = 18 \text{ m}^2 \quad (5.321)$$

5.8.12.2 Parametry spalin

Návrhová teplota spalin na výstupu z AH1

$$i_{AH1}^{out} = \frac{(i_{ECO1}^{out,skut} \cdot M_{pv}) - Q_{AH1}}{M_{pv}} = \frac{(1574,45 \cdot 10,68) - 3038,12}{10,68} = 1294,88 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.322)$$

kde: Q_{AH1} [kW] – návrhový tepelný výkon dle rovnice (5.12)

$$t_{sp}^{out} = 146,37 \text{ }^\circ\text{C} - \text{odečteno z Graf 1 pro } i_{AH1}^{out}, \alpha=1,38$$

- návrhová teplota spalin na výstupu z kotle je o víc jak $10 \text{ }^\circ\text{C}$ nižší jak předpokládaná teplota ($160 \text{ }^\circ\text{C}$). Pro snížení výkonu ohříváku je nutno předehřívát vzduch Před vstupem v kaloriferu na vyšší teplotu (kalorifer je navrhnout na maximální ohřátí vzduchu na 100°C)

Návrhový tepelný výkon AH1 při ohřívání vzduchu před vstupem na $80 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{AH1} = M_{pv} \cdot \beta \cdot (I_{vzmin}^{115^\circ\text{C}} - I_{vzmin}^{80^\circ\text{C}}) \text{ [kW]} \quad (5.323)$$

kde: $I_{vzmin}^{80^\circ\text{C}}$ - entalpie minimálního množství vzduchu pro $t_{AH1}^{in} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ odečtena z *Graf 1*

$$I_{vzmin}^{80^\circ\text{C}} = 431,65 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q_{AH1} = 10,68 \cdot 1,3 \cdot (623,12 - 431,65) = 2658,4 \text{ kW}$$

Návrhová teplota spalin na výstupu z AH1 při ohřívání vzduchu před vstupem na $80 \text{ }^\circ\text{C}$

$$i_{AH1}^{out} = \frac{(i_{ECO1}^{out,skut} \cdot M_{pv}) - Q_{AH1}}{M_{pv}} = \frac{(1574,45 \cdot 10,68) - 2658,4}{10,68} = 1325,54 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.324)$$

kde: $t_{sp}^{out} = 149,8 \text{ }^\circ\text{C}$ – odečteno z *Graf 1* pro $i_{AH1}^{out}, \alpha=1,38$

Střední teplota spalin

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{180,26 - 149,8}{2} = 165,02 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.325)$$

kde: t_{sp}^{in} [$^\circ\text{C}$] – vstupní teplota spalin (výstupní teplota spalin z ECO1)

Objemový průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.326)$$

kde: $O_{sp} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$ – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,38$ [-]

$$O_{sp} = O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin} = \quad (5.327)$$

$$= 4,81 + (1,38 - 1) \cdot 4,147 = 6,3 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 10,68 \cdot 6,39 \cdot (1 - 0,00984) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{165,02 + 273,15}{273,15} \right) = 108,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední spalinový průřez

$$F_{sp} = F_{str} - D \cdot n_{svazek} \cdot H = 18 - 0,0445 \cdot 62 \cdot 3 = 9,72 \text{ m}^2 \quad (5.328)$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{108,5}{9,72} = 11,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.329)$$

5.8.12.3 Parametry médiaStřední teplota vzduchu

$$t_{vz}^{str} = \frac{t_{vz}^{in} + t_{vz}^{out}}{2} = \frac{80 + 115}{2} = 97,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.330)$$

kde: $t_{vz}^{out} [^\circ\text{C}]$ – výstupní teplota vzduchu pro AH2 odečtena z Tab. 11

Objemový průtok vzduchu

$$V_{vz} = M_{pv} \cdot O_{vzmin} \cdot \beta \cdot \left(\frac{t_{vz}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.331)$$

kde: $O_{vzmin} = 4,15 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ – min. objem vzduchu, viz rovnice (2.3)

$\beta = 1,3$ [-] – přebytek vzduchu v ohříváku

$$V_{vz} = 10,68 \cdot 4,15 \cdot 1,3 \cdot \left(\frac{97,5 + 273,15}{273,15} \right) = 78,24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost vzduchu

$$w_{vz} = \frac{4 \cdot V_{vz}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{trubek}} = \frac{4 \cdot 78,24}{\pi \cdot 0,0395^2 \cdot 3596} = 17,76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.332)$$

5.8.12.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalín, trubky ohříváku vzduchu AH1 jsou uspořádané za sebou.

$$\alpha_{k,sp} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.333)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \text{ – oprava na uspořádání svazku} \quad (5.334)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,068}{0,0445} = 1,53 [-] \quad (5.335)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,095}{0,0445} = 2,13 [-] \quad (5.336)$$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 1,53 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,13}{2}\right)^3]^{-2} = 1 [-]$$

$\lambda = 0,037 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 0,291 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kin. viskozity spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,677 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_{k,sp} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,037}{0,0445} \cdot \left(\frac{11,16 \cdot 0,0445}{0,291 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,677^{0,33} = 82,54 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.12.5 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu

$$\alpha_{k,vz} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{vz} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.337)$$

kde: $\lambda = 0,0305 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti vzduchu pro t_{vz}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 22,1 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kin. viskozity vzduchu pro t_{vz}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,73 [-]$ – Prandtlovo číslo vzduchu pro t_{vz}^{str} (určeno z [1])

$c_t [-]$ – opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn (odečten z [1])

$$c_t = \left(\frac{T_{vz}^{str}}{\frac{T_{vz}^{str} + T_{sp}^{str}}{2}} \right)^{0,5} = \left(\frac{372,65}{\frac{372,65 + 438,2}{2}} \right)^{0,5} = 0,957 [-] \quad (5.338)$$

$$\alpha_{k,vz} = 0,023 \cdot \frac{0,0305}{0,0395} \cdot \left(\frac{17,76 \cdot 0,0395}{22,1 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,73^{0,4} \cdot 0,957 = 60,18 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.8.12.6 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_{k,sp} \cdot \alpha_{k,vz}}{\alpha_{k,sp} + \alpha_{k,vz}} = \frac{82,54 \cdot 60,18}{82,54 + 60,18} = 34,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.339)$$

5.8.12.7 Součinitel ψ pro křížové proudění

Parametr P

$$P = \frac{t_{sp}^{in} - t_{sp}^{out}}{t_{sp}^{in} - t_{vz}^{in}} = \frac{180,26 - 149,8}{180,26 - 80} = 0,3 [-] \quad (5.340)$$

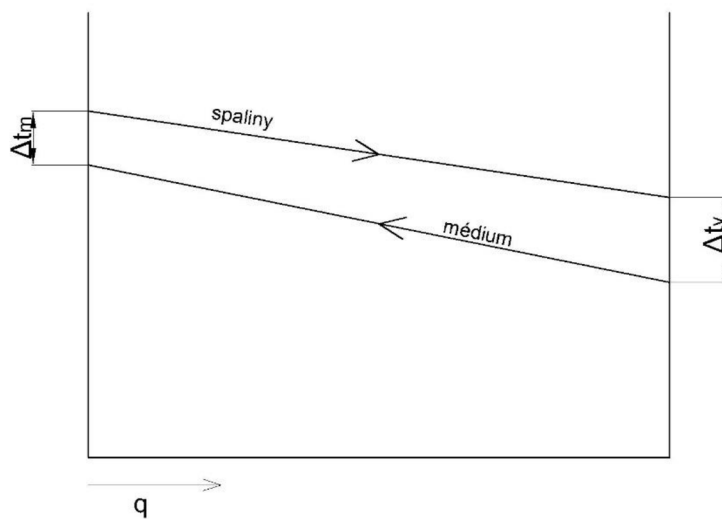
Parametr R

$$R = \frac{t_{vz}^{out} - t_{vz}^{in}}{t_{sp}^{in} - t_{sp}^{out}} = \frac{115 - 80}{180,26 - 149,8} = 1,15 [-] \quad (5.341)$$

Součinitel ψ_{kr}

$\psi_{kr} = 0,97 [-]$ – odečteno z nomogramu z [1] pro parametry P a R

5.8.12.8 Teplotní spád



Obrázek 30. Teplotní spád AH2

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} \cdot \psi_{kr} = \frac{69,78 - 65,74}{\ln \frac{69,78}{65,74}} \cdot 0,97 = 65,74 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.342)$$

$$\text{kde: } \Delta t_m = t_{sp}^{in} - t_{vz}^{out} = 180,26 - 115 = 65,74 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.343)$$

$$\Delta t_v = t_{sp}^{out} - t_{vz}^{in} = 149,8 - 80 = 69,78 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.344)$$

5.8.12.9 Skutečný tepelný výkon

$$Q_{AH1}^{skut} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{AH1} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.345)$$

kde: $\xi = 0,75$ [–] – součinitel využití pro AH1 při spalování dřevní štěpky (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{AH1}^{skut} = 0,75 \cdot 65,74 \cdot 34,8 \cdot 1508,17 \cdot 10^{-3} = 2622,53 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{AH1}^{skut} - Q_{AH1}}{Q_{AH1}} \cdot 100 = \frac{2622,53 - 2658,4}{2658,4} \cdot 100 = -1,35 \% < 2\% \quad (5.346)$$

5.8.12.10 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru AH1

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak ± 50 °C od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$i_{AH1}^{out,skut} = \frac{(i_{ECO1}^{out,skut} \cdot M_{pv}) - Q_{AH1}^{skut}}{M_{pv}} = \frac{(1574,45 \cdot 10,68) - 2622,53}{10,68} = 1328,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.347)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 150,2 \text{ °C} - \text{určeno z Graf 1 pro } i_{AH1}^{out,skut} \text{ při } \alpha = 1,38$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 149,8 - 150,2 = -0,4 \text{ °C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.348)$$

- vypočtená teplota spalin na konci kotle je nižší, než předpoklad, avšak dle složení dřevní štěpky (velmi nízký obsah síry a chlóru) lze předpokládat nízkou teplotu rosného bodu spalin

5.8.13 Výparník

5.8.13.1 Celkový výkon výparníku

$$Q_{EV}^{skut} = \bar{q} \cdot (S_{ús} - S_2) + Q_{d,SH3}^{skut} + Q_{d,SH4}^{skut} + Q_{d,SH2}^{skut} + Q_{MRIZ}^{skut} \text{ [kW]} \quad (5.349)$$

kde: $\bar{q} = 111,7 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ – tepelné zatížení stěn ohniště dle rovnice (4.27)

$S_{ús} = 786,02 \text{ m}^2$ – aktivní plocha stěn ohniště pro převzetí tepla dle rovnice (4.6)

$S_2 = 47,53 \text{ m}^2$ - plochá výstupního otvoru dle rovnice (4.3)

$$Q_{EV}^{skut} = 111,7 \cdot (786,02 - 47,53) + 1933,7 + 448,8 + 174,06 + 1794 = 86838,9 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{EV}^{skut} - Q_{EV}}{Q_{EV}} \cdot 100 = \frac{86838,9 - 87473,4}{87473,4} \cdot 100 = -0,7 \% < 2\% \quad (5.350)$$

kde: $Q_{EV} = 87473,4 \text{ kW}$ – návrhový tepelný výkon výparníku dle rovnice (5.9)

5.8.14 Kontrola výpočtu

5.8.14.1 Celkový tepelný výkon kotle

$$Q_{\text{celk}} = Q_{\text{EV}}^{\text{skut}} + Q_{\text{SH3}}^{\text{skut}} + Q_{\text{SH4}}^{\text{skut}} + Q_{\text{SH2}}^{\text{skut}} + Q_{\text{SH1}}^{\text{skut}} + Q_{\text{ECO2}}^{\text{skut}} + Q_{\text{ECO1}}^{\text{skut}} \text{ [kW]} \quad (5.351)$$

$$Q_{\text{celk}} = 86838,9 + 9764,9 + 9794,6 + 8482,8 + 21826,3 + 11600,7 + 11816,8 = \\ = 160\,125,1 \text{ kW}$$

Kontrola celkového tepelného výkonu kotle

- celkový tepelný výkon kotle se nesmí lišit od výrobního tepla páry o víc jak 0,5 % (tato hodnota je tolerovaná při garančních zkouškách kotle)

$$\Delta Q = \frac{Q_V - Q_{\text{celk}}}{Q_V} \cdot 100 = \frac{160551 - 160125,1}{160551} \cdot 100 = 0,27 \% < 0,5 \% \quad (5.352)$$

kde: $Q_V = 160551 \text{ kW}$ – výrobní teplo páry dle rovnice (3.16)

5.8.14.2 Účinnost kotle

$$\eta_k^{\text{skut}} = \frac{Q_{\text{celk}} \cdot \left(1 - \frac{z_c}{100}\right)}{Q_p^p \cdot M_{pv}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (5.353)$$

kde: $Q_p^p \text{ [kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$ – teplo přivedené do kotle při předehřátí vzduchu na 80 °C

$$Q_p^p = Q_i^r + Q_{vzv} = 16000 + 385,53 = 16385,53 \text{ kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (5.354)$$

$$\text{kde: } Q_{vzv} = \beta \cdot \Delta I_{vzmin} = 1,3 \cdot 296,56 = 385,53 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.355)$$

$$\text{kde: } \Delta I_{vzmin} = (I_{vzmin}^{80^\circ} - I_{vzmin}^{25^\circ}) \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.356)$$

$$\text{kde: } I_{vzmin}^{80^\circ} = 431,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ – odečteno z Graf 1}$$

$$\Delta I_{vzmin} = 431,6 - 135,04 = 296,56 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\eta_k^{\text{skut}} = \frac{160125,1 \cdot \left(1 - \frac{0,985}{100}\right)}{16385,53 \cdot 10,68} \cdot 100 = 90,61 \%$$

Kontrola účinnosti kotle

- u správného výpočtu by se účinnost vypočtena ze skutečných tepelných výkonů konvekčních ploch neměla lišit o víc jak 0,5 % od navržené účinnosti určené nepřímou metodou

$$\Delta \eta = \eta_k - \eta_k^{\text{skut}} = 91,09 - 90,61 = 0,48 \% < 0,5 \% \quad (5.357)$$

5.8.15 Skutečný pilový diagram – Dřevní štěpka



Obrázek 31. Skutečný pilový diagram - Dřevní štěpka

5.9 Výpočet konvekčních ploch – hnědé uhlí

U výpočtu výkonu konvekčních ploch při spalování hnědé uhlí jsou uvažovány rozměry ploch určené z kapitoly 5.7. Dle firemních zkušeností se spaliny při spalování hnědé uhlí méně usazují na konvekčních plochách (v porovnání se spalinami ze spalování biomasy), což umožňuje uvažovat vyšší hodnoty součinitelů využití.

5.9.1 Deskový přehřívák SH3

5.9.1.1 Parametry spalin

Střední teplota spalin

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{930,76 + 837,28}{2} = 884,02 \text{ °C} \quad (5.358)$$

kde: t_{sp}^{in} – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z ohniště dle kapitoly 4.3.2) [°C]

t_{sp}^{out} – výstupní teplota spalin (odečtena z Tab. 14)

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.359)$$

kde: $O_{sp} = 8,61 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$ – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,35$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 7,4 \cdot 8,61 \cdot (1 - 0,0314) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{884,02 + 273,15}{273,15} \right) = 261,83 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{261,83}{52,08} = 5,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.360)$$

kde: $F_{sp} [\text{m}^2]$ – střední spalinový průřez dle kapitoly 5.8.1.1

5.9.1.2 Parametry médiaStřední teplota páry

$$t_p^{\text{str}} = \frac{t_p^{\text{in}} + t_p^{\text{out}}}{2} = \frac{400 + 462}{2} = 431 \text{ °C} \quad (5.361)$$

kde: $t_p^{\text{in}}, t_p^{\text{out}}$ [°C] – vstupní, výstupní teplota páry pro SH3 odečtena z Tab. 12

Střední tlak páry

$$p_p^{\text{str}} = \frac{p_p^{\text{in}} + p_p^{\text{out}}}{2} = \frac{9,6 + 9,45}{2} = 9,525 \text{ MPa} \quad (5.362)$$

kde: $p_p^{\text{in}}, p_p^{\text{out}}$ [MPa] – vstupní, výstupní tlak páry pro SH3 odečten z Tab. 11

Rychlost páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pp}^{\text{SH3}} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\text{trubek}}^{\text{SH3}}} = \frac{4 \cdot (55,56 - 0,545) \cdot 0,0301}{\pi \cdot 0,0333^2 \cdot 180} = 10,56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.363)$$

kde: v – měrný objem pro t_p^{str} a p_p^{str} určen pomocí aplikace SteamProperty [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

$$v = 0,0301 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$n_{\text{trubek}}^{\text{SH3}}$ – celkový počet trubek SH3 [-]

$$n_{\text{trubek}}^{\text{SH3}} = n_{\text{trubek}} \cdot n = 12 \cdot 15 = 180 \text{ [-]}$$

5.9.1.3 Součinitel přestupu tepla na straně média

$$\alpha_2 = \alpha_N \cdot c_d \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.364)$$

kde: α_N – nomogramový součinitel odečten z [1] pro w_p, d

$$\alpha_N = 1650 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

c_d – opravný koeficient na vnitřní průměr trubky odečten z [1]

$$c_d = 0,98 \text{ [-]}$$

$$\alpha_2 = 1650 \cdot 0,98 = 1617 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.1.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin - příčné proudění

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.365)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

c_s – oprava na uspořádání svazku

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \quad (5.366)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,85}{0,0445} = 19,1 [-] \quad (5.367)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,047}{0,0445} = 1,056 [-] \quad (5.368)$$

- při $\sigma_1 > 3$ a $\sigma_2 < 2$, se dosazuje $\sigma_1 = 3 [-]$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,056}{2}\right)^3]^{-2} = 0,578 [-]$$

$\lambda = 0,0977 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,48 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,59 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_{k,př} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,578 \cdot \frac{0,0977}{0,0445} \cdot \left(\frac{5,02 \cdot 0,0445}{1,48 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,59^{0,33} = 24,79 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.9.1.5 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin-podélné proudění

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\gamma} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.369)$$

kde: $\lambda = 0,0977 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,48 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,59 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$c_t = 1$ – opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn (odečten z [1])

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{0,0977}{3,031} \cdot \left(\frac{5,03 \cdot 3,031}{1,48 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,59^{0,4} \cdot 1 = 6,12 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.9.1.6 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.370)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.371)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}{1000} \right) \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s – účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{s_1}} = \frac{1,8}{\frac{1}{3,011} + \frac{1}{6,027} + \frac{1}{0,85}} = 1,075 \text{ m} \quad (5.372)$$

$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,07$ [–] – objemová část vodní páry dle rovnice (2.39)

$p_{\text{sp}} = 0,0205$ MPa – celkový parciální tlak dle rovnice (4.36)

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,07}{3,16 \cdot \sqrt{0,0205 \cdot 1,075}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1157,17}{1000} \right) = 10,32 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,205$ [–] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.35)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{1157,17^2 \cdot 20^2}} = 0,053 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.373)$$

kde: $d_s = 20$ μm – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 4,53$ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalínách dle rovnice (2.41)

$$k_{\text{celk}} = (10,32 \cdot 0,205 + 0,053 \cdot 4,53) = 2,36 \quad [-]$$

$p = 0,1$ MPa – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-2,36 \cdot 0,1 \cdot 1,075} = 0,224 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p^{\text{str}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{\text{SH3}}}{S_{\text{SH3}}} \cdot 10^3 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.374)$$

kde: $\varepsilon = 0,0128$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení určen dle firemních podkladů

$Q_{\text{SH3}} = 9743,08$ kW – návrhový tepelný výkon SH3 dle rovnice (5.15)

$$t_z = 431 + \left(0,0128 + \frac{1}{1617} \right) \cdot \frac{9743,08}{304,93} \cdot 10^3 = 842,76 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.375)$$

kde: $a_{st} = 0,8 [-]$ – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,224 \cdot 1157,17^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{1115,9}{1157,17}\right)^4}{1 - \frac{1115,9}{1157,17}} = 67,42 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.9.1.7 Součinitel přestupu tepla na straně spalin – příčné proudění

$$\alpha_{1,př} = \omega \cdot (\alpha_{k,př} + \alpha_s) [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.376)$$

kde: $\omega = 0,85 [-]$ – součinitel omývání desek odečten z [1]

$$\alpha_{1,př} = 0,85 \cdot (24,79 + 67,42) = 78,37 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.9.1.8 Součinitel prostupu tepla – příčné proudění

$$k_{př} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1,př}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{78,37} + \frac{1}{1617}} = 74,75 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (5.377)$$

5.9.1.9 Součinitel přestupu tepla na straně spalin – podélné proudění

$$\alpha_{1,po} = \omega \cdot (\alpha_{k,po} + \alpha_s) [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.378)$$

kde: $\omega = 0,85 [-]$ – součinitel omývání desek odečten z [1]

$$\alpha_{1,po} = 0,85 \cdot (6,12 + 67,42) = 62,51 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.9.1.10 Součinitel prostupu tepla – podélné proudění

$$k_{po} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1,po}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{62,51} + \frac{1}{1617}} = 60,18 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (5.379)$$

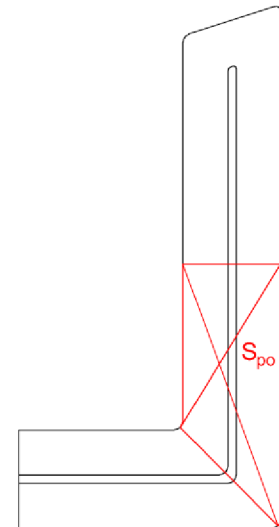
5.9.1.11 Součinitel prostupu tepla

Plocha SH3 s příčným charakterem proudění spalin

$$S_{SH3}^{př} = 0,633 \cdot S_{SH3} = 0,633 \cdot 304,93 = 193,02 \text{ m}^2 \quad (5.380)$$

Plocha SH3 s příčným charakterem proudění spalin

$$S_{SH3}^{po} = 0,367 \cdot S_{SH3} = 0,367 \cdot 304,93 = 111,91 \text{ m}^2 \quad (5.381)$$

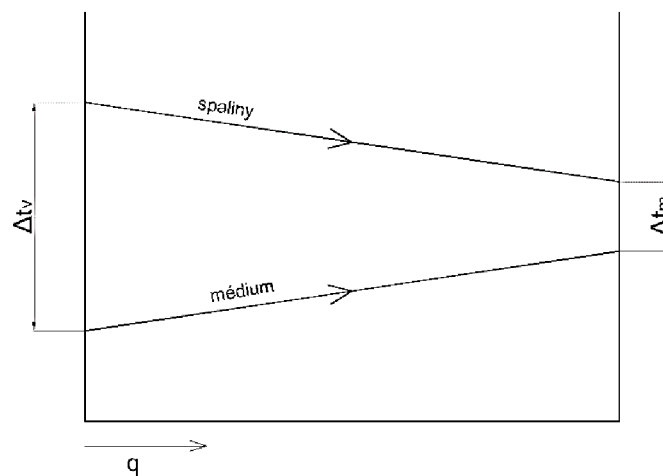


Obrázek 32. Část plochy s podélným prouděním

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{k_{př} \cdot S_{SH3}^{př} + k_{po} \cdot S_{SH3}^{po}}{S_{SH3}} = \frac{74,75 \cdot 193,02 + 60,18 \cdot 111,91}{304,93} = 69,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.382)$$

5.9.1.12 Teplotní spád



Obrázek 33. Teplotní spád SH3

$$\Delta t = t_{sp}^{str} - t_p^{str} = 884,02 - 431 = 453,02 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.383)$$

- uvedený vztah pro výpočet teplotního spádu lze použít, je-li splněna nerovnost:

$$\Delta t_v / \Delta t_m \leq 1,7 \quad (5.384)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{in} = 930,76 - 400 = 530,76 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.385)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{out} = 837,28 - 462 = 375,28 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.386)$$

$530,76 / 375,28 = 1,4 \leq 1,7$ – podmínka splněna

5.9.1.13 Teplo předané spaliny

$$Q_{SH3}^{sp} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{SH3} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.387)$$

kde: $\xi = 0,85$ [-] – součinitel využití při spalování hnědého uhlí (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{SH3}^{sp} = 0,85 \cdot 453,02 \cdot 69,4 \cdot 304,93 \cdot 10^{-3} = 8149,21 \text{ kW}$$

5.9.1.14 Teplo vysálané přímo z ohništěHustota tepelného toku vycházející výstupním průřezem

$$q_{sv} = y_h \cdot \bar{q} \cdot \frac{F_{in}}{F_{out}} \cdot (1 - a) \cdot \varphi_{0-sv} + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot \psi_{sv} \cdot a \cdot \left(\frac{T_{sp}^{str}}{100} \right)^4 \text{ [kW} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (5.388)$$

kde: $y_h = 0,7$ [-] - součinitel tepelné nerovnoměrnosti stěn odečten z [1]

$\bar{q} = 116,03 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ – tepelné zatížení stěn ohniště dle rovnice (4.43)

φ_{0-sv} – úhlový součinitel ohniště [-]

$$\varphi_{0-sv} = \sqrt{\left(\frac{A}{s_1} \right)^2 + 1} - \frac{A}{s_1} = \sqrt{\left(\frac{3,011}{0,85} \right)^2 + 1} - \frac{3,011}{0,85} = 0,138 \text{ [-]} \quad (5.389)$$

$\psi_{sv} = 0,5$ [-] – součinitel tepel. efektivity svazku odečten z [1]

$$q_{sv} = 0,7 \cdot 116,03 \cdot \frac{44,22}{71,66} \cdot (1 - 0,224) \cdot 0,138 + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 0,2224 \cdot \left(\frac{1157,17}{100} \right)^4 =$$

$$= 16,82 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$$

Sálavé teplo z ohniště zachycené v prostoru SH3

$$Q_{s,dSH3} = \delta \cdot y_h \cdot \bar{q} \cdot F_{in} - q_{sv} \cdot F_{out} \text{ [kW]} \quad (5.390)$$

kde: $\delta = 1$ [-] – součinitel odečten z [2] pro t_{sp}^{in}

$$Q_{s,dSH3} = 1 \cdot 0,7 \cdot 116,03 \cdot 44,22 - 16,82 \cdot 71,66 = 2385,36 \text{ kW}$$

Sálavé teplo z ohniště zachycené přehřívákem SH3

$$Q_{SH3}^s = \frac{S_{SH3}}{S_{SH3} + S_d^{SH3}} \cdot Q_{s,dSH3} \text{ [kW]} \quad (5.391)$$

kde: $S_d^{SH3} = 155,22 \text{ m}^2$ – velikost doplňkové plochy v prostoru SH3

$$Q_{SH3}^s = \frac{304,93}{304,93 + 155,22} \cdot 2385,36 = 1580,73 \text{ kW}$$

5.9.1.15 Celkový tepelný výkon deskového přehříváku SH3

$$Q_{SH3}^{skut} = Q_{SH3}^{sp} + Q_{SH3}^s = 8149,21 + 1580,73 = 9729,94 \text{ kW} \quad (5.392)$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{SH3}^{skut} - Q_{SH3}}{Q_{SH3}} \cdot 100 = \frac{9729,94 - 9743,08}{9743,08} \cdot 100 = -0,13 \% < 2\% \quad (5.393)$$

5.9.2 Doplnková plocha v prostoru SH3

- doplnková plocha v prostoru SH3 je tvořena membránovou stěnou výparníku

5.9.2.1 Parametry médiaStřední tlak média

$$p_{p,d}^{str} = p_{EV} = 9,95 \text{ MPa} - \text{tlak výparníku dán firemními podklady (viz Tab. 11)}$$

Střední teplota média

$$t_{p,d}^{str} = t_{EV} = 310,63 \text{ °C} - \text{dáno teplotou nasycení pro } p_{EV} \text{ (viz Tab. 11)}$$

5.9.2.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

- u doplnkové plochy uvažují pouze podélné proudění spalin

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\gamma} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.394)$$

kde: $\lambda = 0,0977 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,49 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,59$ [–] – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$c_t = 1$ – opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn (odečten z [1])

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{0,0977}{5,39} \cdot \left(\frac{5,03 \cdot 5,39}{1,49 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,59^{0,4} \cdot 1 = 5,46 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.2.3 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.395)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.396)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s – účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S_{\text{d}}^{\text{SH}_3}} = 3,6 \cdot \frac{258,77}{155,22} = 6,01 \text{ m} \quad (5.397)$$

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,07}{3,16 \cdot \sqrt{0,026 \cdot 6,01}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1157,17}{1000} \right) = 3,93 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,205$ [-] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice **Chyba!**
Nenalezen zdroj odkazů.(4.19)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{1157,17^2 \cdot 20^2}} = 0,053 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.398)$$

kde: $d_s = 20 \mu\text{m}$ – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 4,53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.19)

$$k_{\text{celk}} = (3,93 \cdot 0,205 + 0,053 \cdot 4,53) = 1,17 \quad [-]$$

$p = 0,1 \text{ MPa}$ – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-1,17 \cdot 0,1 \cdot 1,075} = 0,504 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{\text{p,d}}^{\text{str}} + \varepsilon \cdot \frac{Q_{\text{d}}^{\text{SH}_3}}{S_{\text{d}}^{\text{SH}_3}} \cdot 10^3 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.399)$$

kde: $\varepsilon = 0,0043 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1]

$Q_{\text{d}}^{\text{SH}_3} = 1200 \text{ kW}$ – odhadovaný výkon doplňkové plochy v prostoru SH3

$$t_z = 310,63 + 0,0043 \cdot \frac{1200}{155,22} \cdot 10^3 = 366,59 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.400)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [-] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,503 \cdot 1157,17^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{639,74}{1157,17}\right)^4}{1 - \frac{639,74}{1157,17}} = 79,42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

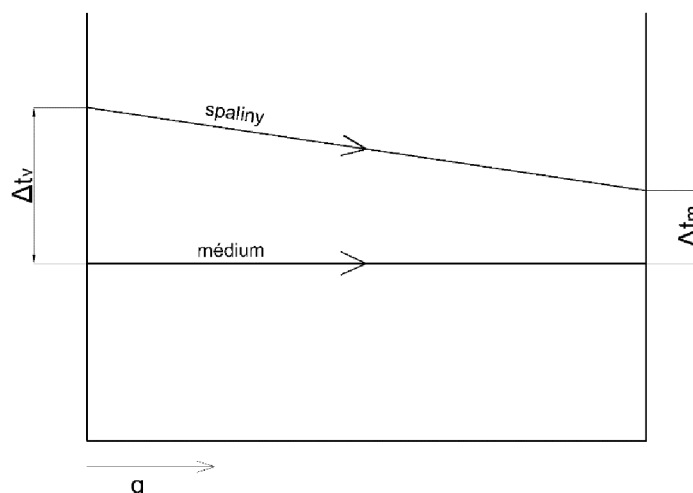
5.9.2.4 Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_{1,d} = \alpha_{k,po} + \alpha_s = 5,46 + 79,42 = 84,87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.401)$$

5.9.2.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \omega \cdot \alpha_{1,d} = 0,35 \cdot 84,87 = 29,71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.402)$$

kde: $\omega = 0,35$ [-] – součinitel omývání desek určen dle firemních zkušeností

5.9.2.6 Teplotní spád

Obrázek 34. Teplotní spád doplňkové plochy SH3

$$\Delta t_d^{SH3} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{620,13 - 526,65}{\ln \frac{620,13}{526,65}} = 572,12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.403)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_{EV} = 930,76 - 310,63 = 620,13 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.404)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_{EV} = 837,28 - 310,63 = 526,65 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.405)$$

5.9.2.7 Teplo předané spaliny

$$Q_{d,SH3}^{sp} = \bar{\Psi} \cdot \Delta t_d^{SH3} \cdot k \cdot S_d^{SH3} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.406)$$

kde: $\bar{\Psi}$ [-] – součinitel tepelné efektivity stěn dle rovnice (4.16)

$$Q_{d,SH3}^{sp} = 0,45 \cdot 572,12 \cdot 29,71 \cdot 155,22 \cdot 10^{-3} = 1055,16 \text{ kW}$$

5.9.2.8 Sálavé teplo z ohniště zachycené v doplňkové ploše v prostoru SH3

$$Q_{d,SH3}^s = \frac{S_d^{SH3}}{S_{SH3} + S_d^{SH3}} \cdot Q_{s,dp} = \frac{155,22}{304,93 + 155,22} \cdot 2385,36 = 804,62 \text{ kW} \quad (5.407)$$

5.9.2.9 Celkový tepelný výkon doplňkové plochy v prostoru SH3

$$Q_{d,SH3}^{skut} = Q_{d,SH3}^{sp} + Q_{d,SH3}^s = 1055,1 + 804,62 = 1859,72 \text{ kW} \quad (5.408)$$

5.9.2.10 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru SH3

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak $\pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$i_{SH3}^{out} = \frac{(i_{SH3}^{in} \cdot M_{pv}) - (Q_{SH3}^{sp} + Q_{d,SH3}^{sp})}{M_{pv}} = \frac{(12142,5 \cdot 7,4) - (8161,95 + 1055,16)}{10,68} = 10881,38 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.409)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 842,27 \text{ }^\circ\text{C} - \text{určeno z Graf 3 pro } i_{SH3}^{out} \text{ při } \alpha = 1,35$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 838,36 - 842,27 = -3,91 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.410)$$

5.9.3 Přejíhřívák SH4

5.9.3.1 Parametry spalin

Návrhová teplota spalin na výstupu z SH4

$$i_{SH4}^{out} = \frac{(i_{SH3}^{out} \cdot M_{pv}) - Q_{SH4}}{M_{pv}} = \frac{(10881,38 \cdot 7,4) - 9884,12}{7,4} = 9545,69 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.411)$$

kde: $Q_{SH4} = 9884,12 \text{ kW}$ – návrhový tepelný výkon SH4 dle rovnice (5.14)

$t_{sp}^{out} = 747,19^\circ\text{C}$ – odečteno z Graf 3 pro i_{SH4}^{out} , $\alpha=1,35$

Střední teplota spalin

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{842,27 + 747,19}{2} = 794,73 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.412)$$

kde: t_{sp}^{in} [$^\circ\text{C}$] – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z SH3 dle rovnice (5.409))

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.413)$$

kde: $O_{sp} = 8,61 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$ – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,35$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 7,4 \cdot 8,61 \cdot (1 - 0,0314) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{794,73 + 273,15}{273,15} \right) = 241,63 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{241,63}{52,8} = 4,58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.414)$$

5.9.3.2 Parametry média

Střední teplota páry

$$t_p^{str} = \frac{t_p^{in} + t_p^{out}}{2} = \frac{452 + 520}{2} = 486 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.415)$$

kde: t_p^{in} , t_p^{out} [$^\circ\text{C}$] – vstupní, výstupní teplota páry pro SH4 odečtena z Tab. 12

Střední tlak páry

$$p_p^{str} = \frac{p_p^{in} + p_p^{out}}{2} = \frac{9,3 + 9,45}{2} = 9,375 \text{ MPa} \quad (5.416)$$

kde: p_p^{in} , p_p^{out} [MPa] – vstupní, výstupní tlak páry pro SH4 odečten z Tab. 12

Rychlost páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pp}^{SH4} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot 2 \cdot n_{trubek}^{SH4}} = \frac{4 \cdot 55,56 \cdot 0,0343}{\pi \cdot 0,0268^2 \cdot 2 \cdot 74} = 22,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.417)$$

kde: v – měrný objem pro t_p^{str} a p_p^{str} určen pomocí aplikace SteamProperty [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

$$v = 0,0343 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

5.9.3.3 Součinitel přestupu tepla na straně média

$$\alpha_2 = \alpha_N \cdot c_d [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.418)$$

kde: α_N – nomogramový součinitel odečten z [1] pro w_p , d

$$\alpha_N = 2480 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

c_d – opravný koeficient na vnitřní průměr trubky odečten z [1]

$$c_d = 1,02 [-]$$

$$\alpha_2 = 2480 \cdot 1,02 = 2529,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.3.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalin. Trubky přehříváku SH4 jsou uspořádané za sebou pro snížení opotřebení materiálu přehříváku spalinami.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.419)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \text{ – oprava na uspořádání svazku} \quad (5.420)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,17}{0,038} = 4,47 [-] \quad (5.421)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,63 [-] \quad (5.422)$$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 4,47 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,63}{2}\right)^3]^{-2} = 1,51 [-]$$

$\lambda = 0,0902 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,31 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,6 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,51 \cdot \frac{0,0902}{0,038} \cdot \left(\frac{4,58 \cdot 0,038}{1,31 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,6^{0,33} = 65,07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.3.5 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.423)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.424)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}{1000} \right) \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s [m] – účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad [\text{m}] \quad (5.425)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1 \right) = 0,478 \text{ m}$$

$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,07$ [-] – objemová část vodní páry dle rovnice (2.39)

$p_{\text{sp}} = 0,0205$ MPa – celkový parciální tlak dle rovnice (4.36)

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,07}{3,16 \cdot \sqrt{0,0205 \cdot 0,478}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1067,88}{1000} \right) = 16,67 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,205$ [-] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.35)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{1067,88^2 \cdot 20^2}} = 0,056 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.426)$$

kde: $d_s = 20$ μm – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 4,53$ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.41)

$$k_{\text{celk}} = (16,67 \cdot 0,205 + 0,056 \cdot 4,53) = 3,67 \quad [-]$$

$p = 0,1$ MPa – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-3,67 \cdot 0,1 \cdot 0,478} = 0,161 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p^{\text{str}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{\text{SH}_4}}{S_{\text{SH}_4}} \cdot 10^3 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.427)$$

kde: $\varepsilon = 0,011$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1] pro w_{sp}

$$t_z = 486 + \left(0,011 + \frac{1}{2529,6} \right) \cdot \frac{9884,12}{732,25} \cdot 10^3 = 636,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.428)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [-] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

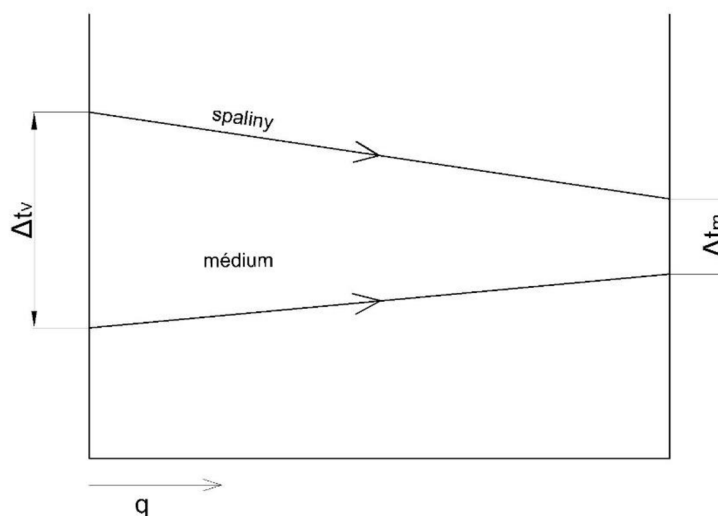
$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,161 \cdot 1067,88^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{909,35}{1067,88}\right)^4}{1 - \frac{909,35}{1067,88}} = 32,13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.3.6 Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 65,07 + 32,13 = 97,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.429)$$

5.9.3.7 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1} = \frac{97,2}{1 + \left(0,011 + \frac{1}{2529,6}\right) \cdot 97,2} = 46,55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.430)$$

5.9.3.8 Teplotní spád

Obrázek 35. Teplotní spád SH4

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{390,27 - 227,19}{\ln \frac{390,27}{227,19}} = 301,41 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.431)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{in} = 842,27 - 452 = 390,27 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.432)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{out} = 747,19 - 520 = 227,19 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.433)$$

5.9.3.9 Teplo předané spalinami

$$Q_{SH4}^{SP} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{SH4} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.434)$$

kde: $\xi = 0,85$ [–] – součinitel využití při spalování hnědého uhlí (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{SH4}^{SP} = 0,85 \cdot 301,41 \cdot 46,55 \cdot 732,25 \cdot 10^{-3} = 8732,32 \text{ kW}$$

5.9.3.10 Teplo vysálané přímo z ohniště

Dle [1] se v další konvekční ploše za ohništěm zachytí celý podíl tepla vysálaného přímo z ohniště nezachycený v první konvekční ploše (SH3). Teplo vysálané přímo z ohniště nezachycené v prostoru deskového přehříváku se rozdělí mezi plochu přehříváku SH4 a doplňkové plochy výparníku v prostoru SH4.

Sálavé teplo z ohniště zachycené v prostoru SH4

$$Q_{s,dSH4} = \delta \cdot y_h \cdot \bar{q} \cdot F_{in} - Q_{s,dSH3} = 1 \cdot 0,7 \cdot 116,03 \cdot 44,22 - 2384,03 = 1206,4 \text{ kW} \quad (5.435)$$

kde: $\delta, y_h, \bar{q}, F_{in}$ – viz rovnice (5.388)

Sálavé teplo z ohniště zachycené přehřívákem SH4

$$Q_{SH4}^S = \frac{S_{SH4}}{S_{SH4} + S_d^{SH4}} \cdot Q_{s,dSH4} \text{ [kW]} \quad (5.436)$$

kde: $S_d^{SH4} = 62,01 \text{ m}^2$ – velikost doplňkové plochy (membránové stěny výparníku)

$$Q_{SH4}^S = \frac{732,25}{732,25 + 62,01} \cdot 1206,4 = 1134,97 \text{ kW}$$

5.9.3.11 Celkový tepelný výkon deskového přehříváku SH3

$$Q_{SH4}^{skut} = Q_{SH4}^{SP} + Q_{SH4}^S = 8732,32 + 1134,97 = 9867,29 \text{ kW} \quad (5.437)$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{SH4}^{skut} - Q_{SH4}}{Q_{SH4}} \cdot 100 = \frac{9867,29 - 9884,12}{9867,29} \cdot 100 = -0,17 \% < 2\% \quad (5.438)$$

5.9.4 Doplnková plocha v prostoru SH4

5.9.4.1 Parametry média

Střední tlak média

$p_{p,d}^{str} = p_{EV} = 9,95 \text{ MPa}$ – tlak výparníku dán firemními podklady (viz Tab. 11)

Střední teplota média

$t_{p,d}^{str} = t_{EV} = 310,63 \text{ °C}$ – dáno teplotou nasycení pro p_{EV} (viz Tab. 11)

5.9.4.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{celk} \cdot p \cdot s} [-] \quad (5.439)$$

$$\text{kde: } k_{celk} = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) [-] \quad (5.440)$$

$$\text{kde: } k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s – účinná tloušťka sálové vrstvy [m]

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S_d^{SH4}} = 3,6 \cdot \frac{103,62}{62,01} = 6,02 \text{ m} \quad (5.441)$$

$$k_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,07}{3,16 \cdot \sqrt{0,205 \cdot 6,02}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1067,88}{1000} \right) = 4,04 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{sp} = 0,205 [-]$ – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.35)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{sp}^{str2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{1067,88^2 \cdot 20^2}} = 0,056 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.442)$$

kde: $d_s = 20 \text{ } \mu\text{m}$ – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 4,53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.41)

$$k_{celk} = (4,04 \cdot 0,205 + 0,056 \cdot 4,53) = 1,08 [-]$$

$p = 0,1 \text{ MPa}$ – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-1,08 \cdot 0,1 \cdot 6,02} = 0,58 [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{p,d}^{\text{str}} + \varepsilon \cdot \frac{Q_d^{\text{SH4}}}{S_d^{\text{SH4}}} \cdot 10^3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.443)$$

kde: $\varepsilon = 0,0043 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1]

$Q_d^{\text{SH4}} = 250 \text{ kW}$ – odhadovaný výkon doplňkové plochy v prostoru SH3

$$t_z = 310,63 + 0,0043 \cdot \frac{250}{62,01} \cdot 10^3 = 334,47 \text{ }^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{\text{str}^3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{\text{str}}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{\text{str}}}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.444)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [–] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,58 \cdot 1067,88^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{607,62}{1067,88}\right)^4}{1 - \frac{607,62}{1067,88}} = 75,66 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.4.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

- u doplňkové plochy uvažují pouze podélné proudění spalin

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\gamma}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.445)$$

kde: $\lambda = 0,0902 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,31 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,6$ [–] – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$c_t = 1$ – opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn (odečten z [1])

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{0,0902}{7,44} \cdot \left(\frac{4,58 \cdot 7,44}{1,31 \cdot 10^{-4}}\right)^{0,8} \cdot 0,6^{0,4} \cdot 1 = 4,71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.4.4 Součinitel přestupu tepla

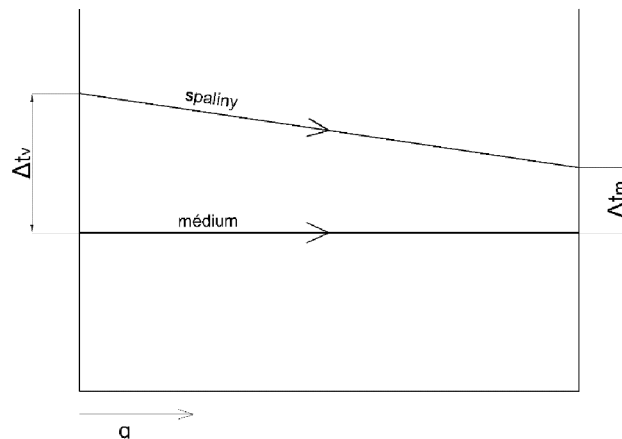
$$\alpha_{1,d} = \alpha_{k,po} + \alpha_s = 4,71 + 75,66 = 80,37 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.446)$$

5.9.4.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \omega \cdot \alpha_{1,d} = 0,35 \cdot 80,37 = 27,92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.447)$$

kde: $\omega = 0,35$ [–] – součinitel omývání desek určen dle firemních zkušeností

5.9.4.6 Teplotní spád



Obrázek 36. Teplotní spád doplňkové plochy SH3

$$\Delta t_d^{SH4} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{531,64 - 436,56}{\ln \frac{531,64}{436,56}} = 482,54 \text{ °C} \quad (5.448)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_{EV} = 842,27 - 310,63 = 531,64 \text{ °C} \quad (5.449)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_{EV} = 747,19 - 310,63 = 436,56 \text{ °C} \quad (5.450)$$

5.9.4.7 Teplo předané spaliny

$$Q_{d,SH4}^{sp} = \bar{\Psi} \cdot \Delta t_d^{SH4} \cdot k \cdot S_d^{SH4} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.451)$$

kde: $\bar{\Psi}$ [-] – součinitel tepelné efektivity stěn dle rovnice (4.16)

$$Q_{d,SH4}^{sp} = 0,45 \cdot 482,54 \cdot 27,92 \cdot 155,22 \cdot 10^{-3} = 248,28 \text{ kW}$$

5.9.4.8 Sálavé teplo z ohniště zachycené v doplňkové ploše v prostoru SH4

$$Q_{d,SH4}^s = \frac{S_d^{SH4}}{S_{SH4} + S_d^{SH4}} \cdot Q_{s,dSH4} = \frac{62,01}{732,25 + 62,01} \cdot 1206,38 = 71,41 \text{ kW} \quad (5.452)$$

5.9.4.9 Celkový tepelný výkon doplňkové plochy v prostoru SH4

$$Q_{d,SH4}^{skut} = Q_{d,SH4}^{sp} + Q_{d,SH4}^s = 248,28 + 71,41 = 319,69 \text{ kW} \quad (5.453)$$

5.9.4.10 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru SH4

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak $\pm 50 \text{ °C}$ od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$i_{SH4}^{out} = \frac{(i_{SH4}^{in} \cdot M_{pv}) - (Q_{SH4}^{sp} + Q_{d,SH4}^{sp})}{M_{pv}} = \frac{(10881,38 \cdot 7,4) - (8732,32 + 248,28)}{7,4} = 9667,78 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.454)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 755,95 \text{ °C} - \text{určeno z Graf 3 pro } i_{SH4}^{out} \text{ při } \alpha = 1,35$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 747,19 - 755,95 = -8,76 \text{ °C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.455)$$

5.9.5 Přejířvák SH2

5.9.5.1 Parametry spalín

Návrhová teplota spalín na výstupu z SH2

$$i_{SH2}^{out} = \frac{(i_{SH4}^{out} \cdot M_{pv}) - Q_{SH2}}{M_{pv}} = \frac{(9667,78 \cdot 7,4) - 8634,52}{7,4} = 8500,96 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.456)$$

kde: $Q_{SH2} = 8634,52 \text{ kW}$ – návrhový tepelný výkon SH2 dle rovnice (5.16)

$$t_{sp}^{out} = 671,78 \text{ }^\circ\text{C} \text{ – odečteno z Graf 3 pro } i_{SH2}^{out}, \alpha=1,35$$

Střední teplota spalín

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{755,95 + 671,78}{2} = 713,86 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.457)$$

kde: t_{sp}^{in} [°C] – vstupní teplota spalín (výstupní teplota z SH4 dle rovnice (5.454))

Průtok spalín

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.458)$$

kde: $O_{sp} = 8,61 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$ – skutečné množství spalín pro $\alpha=1,35$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 7,4 \cdot 8,61 \cdot (1 - 0,0314) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{713,86 + 273,15}{273,15} \right) = 223,33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost spalín

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{223,33}{31,46} = 7,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.459)$$

5.9.5.2 Parametry média

Střední teplota páry

$$t_p^{str} = \frac{t_p^{in} + t_p^{out}}{2} = \frac{418 + 467,5}{2} = 437,75 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.460)$$

kde: t_p^{in}, t_p^{out} [°C] – vstupní, výstupní teplota páry pro SH2 odečtena z Tab. 12

Střední tlak páry

$$p_p^{str} = \frac{p_p^{in} + p_p^{out}}{2} = \frac{9,75 + 9,6}{2} = 9,675 \text{ MPa} \quad (5.461)$$

kde: p_p^{in}, p_p^{out} [MPa] – vstupní, výstupní tlak páry pro SH2 odečten z Tab. 12

Rychlost páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pp}^{SH2} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{trubek}^{SH2}} = \frac{4 \cdot (55,56 - 0,545 - 3,8) \cdot 0,0306}{\pi \cdot 0,028^2 \cdot 152} = 16,74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.462)$$

kde: v – měrný objem pro t_p^{str} a p_p^{str} určen pomocí aplikace SteamProperty [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

$$v = 0,0306 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

5.9.5.3 Součinitel přestupu tepla na straně média

$$\alpha_2 = \alpha_N \cdot c_d [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.463)$$

kde: α_N – nomogramový součinitel odečten z [1] pro w_p , d

$$\alpha_N = 2260 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

c_d – opravný koeficient na vnitřní průměr trubky odečten z [1]

$$c_d = 1,02 [-]$$

$$\alpha_2 = 2260 \cdot 1,02 = 2305,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.5.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalin. Trubky přehříváku SH2 jsou uspořádané za sebou pro snížení opotřeбенí materiálu spalinami.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.464)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \text{ – oprava na uspořádání svazku} \quad (5.465)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,085}{0,038} = 2,24 [-] \quad (5.466)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,63 [-] \quad (5.467)$$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 2,24 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,63}{2}\right)^3]^{-2} = 1,1 [-]$$

$\lambda = 0,0832 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,61 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot \frac{0,0832}{0,038} \cdot \left(\frac{7,1 \cdot 0,038}{1,15 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,61^{0,33} = 63,48 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.5.5 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.468)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.469)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}{1000} \right) \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s [m] – účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad [\text{m}] \quad (5.470)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,085 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1 \right) = 0,222 \text{ m}$$

$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,07$ [-] – objemová část vodní páry dle rovnice (2.39)

$p_{\text{sp}} = 0,0205$ MPa – celkový parciální tlak dle rovnice (4.36)

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,07}{3,16 \cdot \sqrt{0,0205 \cdot 0,222}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{987,01}{1000} \right) = 25,97 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,205$ [-] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.35)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{987,01^2 \cdot 20^2}} = 0,0589 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.471)$$

kde: $d_s = 20$ μm – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 4,53$ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.41)

$$k_{\text{celk}} = (25,97 \cdot 0,205 + 0,0589 \cdot 4,53) = 5,59 \quad [-]$$

$p = 0,1$ MPa – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-5,59 \cdot 0,1 \cdot 0,222} = 0,117 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p^{\text{str}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{\text{SH}_2}}{S_{\text{SH}_2}} \cdot 10^3 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.472)$$

kde: $\varepsilon = 0,007$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1] pro w_{sp}

$$t_z = 437,75 + \left(0,007 + \frac{1}{2305,2} \right) \cdot \frac{8634,52}{757,14} \cdot 10^3 = 528,34 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.473)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [-] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

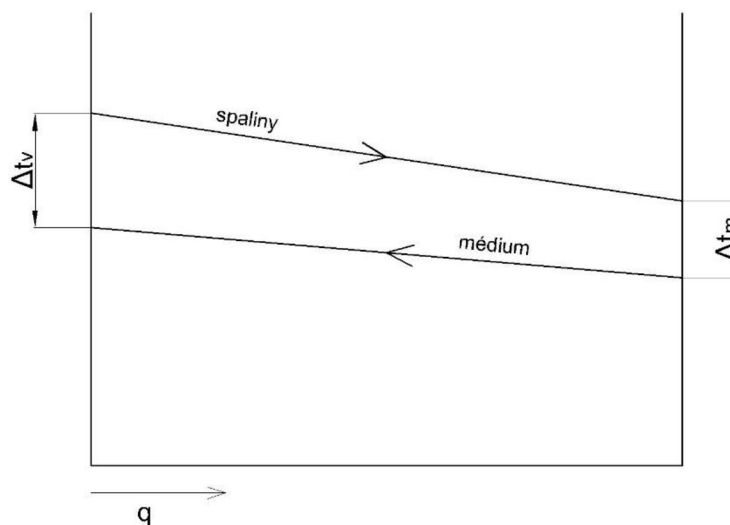
$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,117 \cdot 987,01^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{801,49}{987,01}\right)^4}{1 - \frac{801,49}{987,01}} = 17,32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.5.6 Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 63,48 + 17,32 = 80,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.474)$$

5.9.5.7 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1} = \frac{80,8}{1 + \left(0,007 + \frac{1}{2305,2}\right) \cdot 80,8} = 50,48 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.475)$$

5.9.5.8 Teplotní spád

Obrázek 37. Teplotní spád SH2

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{288,45 - 263,78}{\ln \frac{288,45}{263,78}} = 275,93 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.476)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{out} = 755,95 - 467,5 = 288,45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.477)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{in} = 671,78 - 408 = 263,78 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.478)$$

5.9.5.9 Skutečný tepelný výkon přehříváku SH2

$$Q_{SH2}^{skut} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{SH2} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.479)$$

kde: $\xi = 0,82$ [–] – součinitel využití pro SH2 při spalování hnědého uhlí (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{SH2}^{skut} = 0,82 \cdot 275,93 \cdot 50,48 \cdot 757,14 \cdot 10^{-3} = 8647,71 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{SH2}^{skut} - Q_{SH2}}{Q_{SH2}} \cdot 100 = \frac{8647,71 - 8634,52}{8634,52} \cdot 100 = 0,15 \% < 2\% \quad (5.480)$$

5.9.6 Doplnková plocha v prostoru SH2

5.9.6.1 Parametry média

Střední tlak média

$p_{p,d}^{str} = p_{EV} = 9,95 \text{ MPa}$ – tlak výparníku dán firemními podklady (viz Tab. 11)

Střední teplota média

$t_{p,d}^{str} = t_{EV} = 310,63 \text{ °C}$ – dáno teplotou nasycení pro p_{EV} (viz Tab. 11)

5.9.6.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

- u doplnkové plochy uvažují pouze podélné proudění spalin

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\gamma} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.481)$$

kde: $\lambda = 0,0832 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kinemat. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,61$ [–] – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$c_t = 1$ – opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn (odečten z [1])

$$\alpha_{k,po} = 0,023 \cdot \frac{0,0832}{6,47} \cdot \left(\frac{7,1 \cdot 6,47}{1,15 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,8} \cdot 0,61^{0,4} \cdot 1 = 7,35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.6.3 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.482)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.483)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s – účinná tloušťka sálové vrstvy [m]

$$s = 3,6 \cdot \frac{V}{S_{\text{d}}^{\text{SH}_2}} = 3,6 \cdot \frac{67,18}{47,42} = 5,1 \text{ m} \quad (5.484)$$

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,07}{3,16 \cdot \sqrt{0,205 \cdot 5,1}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{987,01}{1000} \right) = 5,5 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,205$ [-] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.35)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}^2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{987,01^2 \cdot 20^2}} = 0,059 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.485)$$

kde: $d_s = 20 \mu\text{m}$ – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 4,53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.41)

$$k_{\text{celk}} = (5,5 \cdot 0,205 + 0,059 \cdot 4,53) = 1,39 \quad [-]$$

$p = 0,1 \text{ MPa}$ – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-1,39 \cdot 0,1 \cdot 5,1} = 0,509 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_{\text{p,d}}^{\text{str}} + \varepsilon \cdot \frac{Q_{\text{d}}^{\text{SH}_2}}{S_{\text{d}}^{\text{SH}_2}} \cdot 10^3 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.486)$$

kde: $\varepsilon = 0,0043 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1]

$Q_{\text{d}}^{\text{SH}_4} = 160 \text{ kW}$ – odhadovaný výkon doplňkové plochy v prostoru SH2

$$t_z = 310,63 + 0,0043 \cdot \frac{160}{47,42} \cdot 10^3 = 325,47 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.487)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [-] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,509 \cdot 987,01^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{598,62}{987,01}\right)^4}{1 - \frac{598,62}{987,01}} = 55,18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

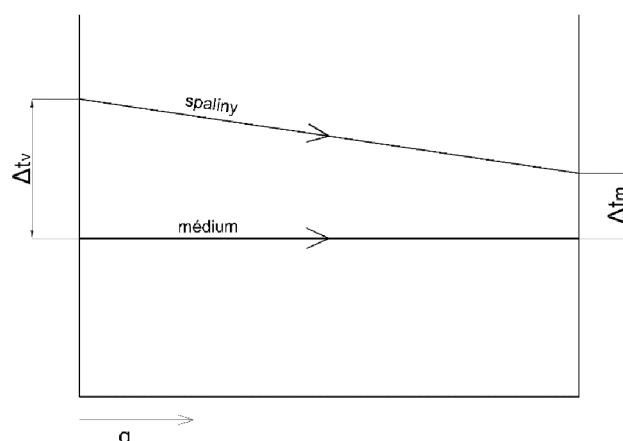
5.9.6.4 Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_{1,d} = \alpha_{k,po} + \alpha_s = 7,35 + 55,18 = 62,53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.488)$$

5.9.6.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \omega \cdot \alpha_{1,d} = 0,35 \cdot 62,53 = 21,75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.489)$$

kde: $\omega = 0,35$ [-] – součinitel omývání desek určen dle firemních zkušeností

5.9.6.6 Teplotní spád

Obrázek 38. Teplotní spád doplňkové plochy SH2

$$\Delta t_d^{SH4} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{445,32 - 361,15}{\ln \frac{445,32}{361,15}} = 401,77 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.490)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_{EV} = 755,95 - 310,63 = 445,32 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.491)$$

$$\Delta t_v = t_{sp}^{out} - t_{EV} = 671,78 - 310,63 = 361,15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.492)$$

5.9.6.7 Tepelný výkon doplňkové plochy v prostoru SH2

$$Q_{d,SH2} = \bar{\Psi} \cdot \Delta t_d^{SH2} \cdot k \cdot S_d^{SH2} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.493)$$

kde: $\bar{\Psi}$ [-] – součinitel tepelné efektivity stěn dle rovnice (4.16)

$$Q_{d,SH2} = 0,45 \cdot 401,77 \cdot 21,75 \cdot 47,42 \cdot 10^{-3} = 157,08 \text{ kW}$$

5.9.6.8 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru SH2

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak ± 50 °C od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$\begin{aligned} i_{SH2}^{out} &= \frac{(i_{SH2}^{in} \cdot M_{pv}) - (Q_{SH2}^{skut} + Q_{d,SH2})}{M_{pv}} = \frac{(9667,78 \cdot 7,4) - (8647,71 + 157,08)}{7,4} = \\ &= 8477,95 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (5.494)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 670,1 \text{ °C} - \text{určeno z Graf 3 pro } i_{SH2}^{out} \text{ při } \alpha = 1,35$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 671,78 - 670,1 = 1,68 \text{ °C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.495)$$

5.9.7 Výparníková mříž

5.9.7.1 Parametry spalin

Návrhová teplota spalin na výstupu z výparníkové mříže

$$i_{\text{MRIZ}}^{\text{out}} = \frac{(i_{\text{SH2}}^{\text{out}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{MRIZ}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(8477,95 \cdot 7,4) - 1800}{7,4} = 8234,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.496)$$

kde: $Q_{\text{MRIZ}} = 1800 \text{ kW}$ – návrhový výkon výparníkové mříže

$t_{\text{sp}}^{\text{out}} = 652,36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – odečteno z *Graf 3* pro $i_{\text{MRIZ}}^{\text{out}}$, $\alpha=1,35$

Střední teplota spalin

$$t_{\text{sp}}^{\text{str}} = \frac{t_{\text{sp}}^{\text{in}} + t_{\text{sp}}^{\text{out}}}{2} = \frac{670,1 + 652,36}{2} = 661,23 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.497)$$

kde: $t_{\text{sp}}^{\text{in}}$ [$^{\circ}\text{C}$] – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z SH2 dle rovnice (5.494))

Objemový průtok spalin

$$V_{\text{sp}} = M_{\text{pv}} \cdot O_{\text{sp}} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}^{\text{str}} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.498)$$

kde: $O_{\text{sp}} = 8,61 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$ – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,35$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{\text{sp}} = 7,4 \cdot 8,61 \cdot (1 - 0,0314) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{661,23 + 273,15}{273,15} \right) = 211,42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost spalin

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}}}{F_{\text{sp}}} = \frac{211,42}{31,81} = 6,65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.499)$$

5.9.7.2 Parametry média

Střední tlak páry

$$p_p^{\text{str}} = 9,95 \text{ MPa} = p_{\text{EV}}$$

Střední teplota média

$t_p^{\text{str}} = 310,63 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – dána teplotou nasycení při tlaku p_p^{str}

5.9.7.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalin. Trubky výparníkové mříže jsou uspořádané vystřídane.

$$\alpha_k = c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.500)$$

kde: $c_s = 0,275 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} [-]$ – oprava na uspořádání svazku

$$\text{kde: } \varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2' - 1} [-] \text{ – poměrná příčná rozteč} \quad (5.501)$$

$$\text{kde: } \sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,17}{0,0603} = 2,82 [-] \quad (5.502)$$

$$\sigma_2' = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} [-] \quad (5.503)$$

$$\text{kde: } \sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,075}{0,0603} = 1,24 [-] \quad (5.504)$$

$$\sigma_2' = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 2,82^2 + 1,24^2} = 1,88 [-]$$

$$\varphi_\sigma = \frac{2,82 - 1}{1,88 - 1} = 2,07 [-]$$

$$c_s = 0,275 \cdot 2,07^{0,1} = 0,395 [-]$$

$$c_z = 3,12 \cdot n_{rad}^{0,05} - 2,5 = 3,12 \cdot 3^{0,05} - 2,5 = 0,796 [-] \quad (5.505)$$

$\lambda = 0,0787 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 1,05 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kin. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,614 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_k = 0,395 \cdot 0,796 \cdot \frac{0,0787}{0,0603} \cdot \left(\frac{6,65 \cdot 0,0603}{1,05 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,614^{0,33} = 49,34 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.9.7.4 Součinitel přestupu tepla sálánímStupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.506)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.507)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}{1000} \right) \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s [m] – účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad [\text{m}] \quad (5.508)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,075}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,188 \text{ m}$$

$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,07$ [-] – objemová část vodní páry dle rovnice (2.39)

$p_{\text{sp}} = 0,0205$ MPa – celkový parciální tlak dle rovnice (4.36)

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,07}{3,16 \cdot \sqrt{0,0205 \cdot 0,188}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{934,38}{1000} \right) = 32,3 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,205$ [-] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.35)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{934,38^2 \cdot 20^2}} = 0,0611 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.509)$$

kde: $d_s = 20$ μm – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 4,53$ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.41)

$$k_{\text{celk}} = (32,3 \cdot 0,205 + 0,0611 \cdot 4,53) = 6,9 \quad [-]$$

$p = 0,1$ MPa – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-6,9 \cdot 0,1 \cdot 0,188} = 0,122 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p^{\text{str}} + \varepsilon \cdot \frac{Q_{\text{MRIZ}}}{S_{\text{MRIZ}}} \cdot 10^3 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.510)$$

kde: $\varepsilon = 0,0095$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1] pro vystřídané uspořádání a w_{sp}

$$t_z = 310,63 + 0,0095 \cdot \frac{1800}{159,84} \cdot 10^3 = 417,61 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.511)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [-] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,122 \cdot 934,38^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{690,76}{934,38}\right)^4}{1 - \frac{690,76}{934,38}} = 13,69 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.7.5 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

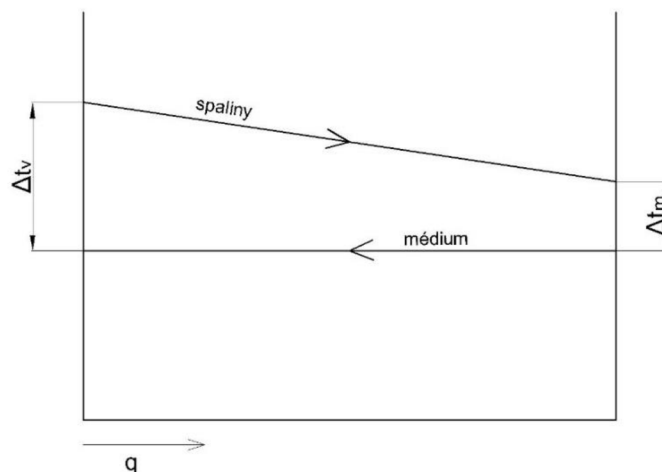
$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 49,34 + 13,69 = 63,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.512)$$

5.9.7.6 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.513)$$

kde: $\frac{1}{\alpha_2} = 0$ – termický odpor na vnitřní straně média lze zanedbat, je-li splněna podmínka $\alpha_2 \gg \alpha_1$ [1]

$$k = \frac{63,03}{1 + (0,0095 + 0) \cdot 63,03} = 39,42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.7.7 Teplotní spád

Obrázek 39. Teplotní spád výparníkové mříže

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{359,47 - 341,73}{\ln \frac{359,47}{341,73}} = 350,53 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.514)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{out} = 670,1 - 310,63 = 359,47 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.515)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{in} = 652,36 - 310,63 = 341,73 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.516)$$

5.9.7.8 Skutečný tepelný výkon výparníkové mříže

$$Q_{\text{MRIZ}}^{\text{skut}} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{\text{SH2}} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.517)$$

kde: $\xi = 0,8$ [-] – součinitel využití pro výparníkovou mříž při spalování hnědého uhlí (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{\text{MRIZ}}^{\text{skut}} = 0,8 \cdot 350,53 \cdot 39,42 \cdot 159,84 \cdot 10^{-3} = 1767,04 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{\text{MRIZ}}^{\text{skut}} - Q_{\text{MRIZ}}}{Q_{\text{MRIZ}}} \cdot 100 = \frac{1767,04 - 1800}{1800} \cdot 100 = 1,83 \% < 2\% \quad (5.518)$$

5.9.7.9 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru mříže

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak ± 50 °C od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$\begin{aligned} i_{\text{MRIZ}}^{\text{out}} &= \frac{(i_{\text{SH2}}^{\text{out}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{MRIZ}}^{\text{skut}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(8477,95 \cdot 7,4) - 1767,04}{7,4} = \\ &= 8239,16 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (5.519)$$

$$t_{\text{sp}}^{\text{out,skut}} = 652,68 \text{ °C} - \text{určeno z Graf 3 pro } i_{\text{MRIZ}}^{\text{out}} \text{ při } \alpha = 1,35$$

$$t_{\text{sp}}^{\text{out}} - t_{\text{sp}}^{\text{out,skut}} = 661,23 - 652,68 = 8,55 \text{ °C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.520)$$

5.9.8 Přehřívák SH1

5.9.8.1 Parametry spalín

Návrhová teplota spalín na výstupu z SH1

$$i_{SH1}^{out} = \frac{(i_{MRIZ}^{out} \cdot M_{pv}) - Q_{SH1}}{M_{pv}} = \frac{(8239,16 \cdot 7,4) - 20510,83}{7,4} = 5467,42 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.521)$$

kde: Q_{SH1} [kW] – návrhový tepelný výkon SH1 dle rovnice (5.17)

$t_{sp}^{out} = 444,63 \text{ }^\circ\text{C}$ – odečteno z Graf 3 pro i_{SH1}^{out} , $\alpha=1,35$

Střední teplota spalín

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{652,68 + 444,63}{2} = 548,66 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.522)$$

kde: t_{sp}^{in} [$^\circ\text{C}$] – vstupní teplota spalín (výstupní teplota z MRÍŽ dle rovnice (5.519))

Průtok spalín

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.523)$$

kde: $O_{sp} = 8,61 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$ – skutečné množství spalín pro $\alpha=1,35$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 7,4 \cdot 8,61 \cdot (1 - 0,0314) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{548,66 + 273,15}{273,15} \right) = 185,95 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost spalín

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{185,95}{16,3} = 11,41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.524)$$

5.9.8.2 Parametry média

Střední teplota páry

$$t_p^{str} = \frac{t_p^{in} + t_p^{out}}{2} = \frac{310,63 + 408}{2} = 359,315 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.525)$$

kde: t_p^{in} , t_p^{out} [$^\circ\text{C}$] – vstupní, výstupní teplota páry pro SH1 odečtena z Tab. 12

Střední tlak páry

$$p_p^{str} = \frac{p_p^{in} + p_p^{out}}{2} = \frac{9,95 + 9,75}{2} = 9,85 \text{ MPa} \quad (5.526)$$

kde: p_p^{in} , p_p^{out} [MPa] – vstupní, výstupní tlak páry pro SH1 odečten z Tab. 12

Rychlost páry

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pp}^{SH1} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{trubek}^{SH1}} = \frac{4 \cdot (55,56 - 0,545 - 3,8) \cdot 0,0236}{\pi \cdot 0,029^2 \cdot 93} = 19,68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.527)$$

kde: v – měrný objem pro t_p^{str} a p_p^{str} určen pomocí aplikace SteamProperty [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

$$v = 0,0236 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

5.9.8.3 Součinitel přestupu tepla na straně média

$$\alpha_2 = \alpha_N \cdot c_d [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.528)$$

kde: α_N – nomogramový součinitel odečten z [1] pro w_p , d a p_p^{str}

$$\alpha_N = 3280 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

c_d – opravný koeficient na vnitřní průměr trubky odečten z [1]

$$c_d = 1 [-]$$

$$\alpha_2 = 3280 \cdot 1 = 3280 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.8.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalín. Trubky přehříváku SH1 jsou uspořádané za sebou pro snížení opotřebení materiálu spalínami.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.529)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \text{ – oprava na uspořádání svazku} \quad (5.530)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,085}{0,038} = 2,24 [-] \quad (5.531)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,63 [-] \quad (5.532)$$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 2,24 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,63}{2}\right)^3]^{-2} = 1,1 [-]$$

$\lambda = 0,0692 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 0,847 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kin. viskozity spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,625 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot \frac{0,0692}{0,038} \cdot \left(\frac{11,41 \cdot 0,038}{0,847 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,625^{0,33} = 81,81 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.8.5 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} [-] \quad (5.533)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_p \cdot \mu) [-] \quad (5.534)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}{1000} \right) [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s [m] – účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) [\text{m}] \quad (5.535)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,085 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1 \right) = 0,222 \text{ m}$$

$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,07[-]$ – objemová část vodní páry dle rovnice (2.39)

$p_{\text{sp}} = 0,0205 \text{ MPa}$ – celkový parciální tlak dle rovnice (4.36)

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,07}{3,16 \cdot \sqrt{0,0205 \cdot 0,222}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{821,81}{1000} \right) = 28,47 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,205 [-]$ – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.35)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{821,81^2 \cdot 20^2}} = 0,0665 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.536)$$

kde: $d_s = 20 \text{ } \mu\text{m}$ – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 4,53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.41)

$$k_{\text{celk}} = (28,47 \cdot 0,205 + 0,0665 \cdot 4,53) = 6,14$$

$p = 0,1 \text{ MPa}$ – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-6,14 \cdot 0,1 \cdot 0,222} = 0,127 [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p^{\text{str}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{\text{SH1}}}{S_{\text{SH1}}} \cdot 10^3 [\text{ }^\circ\text{C}] \quad (5.537)$$

kde: $\varepsilon = 0,0055 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1] pro w_{sp}

$$t_z = 359,315 + \left(0,0055 + \frac{1}{3280} \right) \cdot \frac{20748,06}{2269,33} \cdot 10^3 = 412,85 \text{ }^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.538)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [-] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

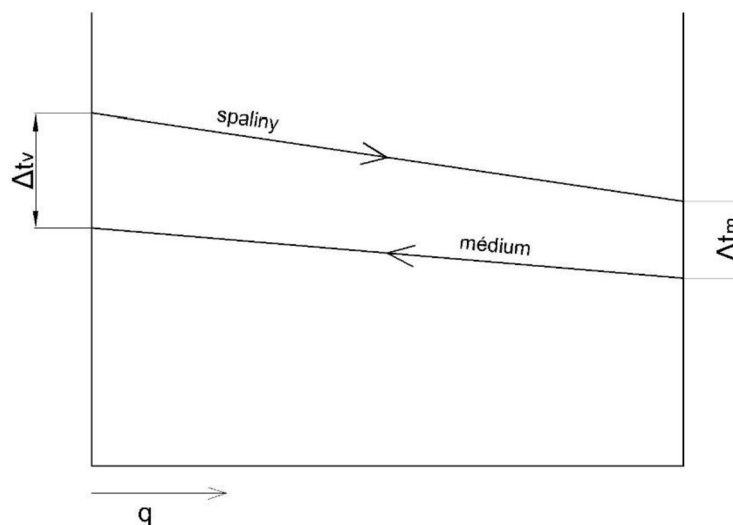
$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,127 \cdot 821,81^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{632,47}{821,81}\right)^4}{1 - \frac{632,47}{821,81}} = 11,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.8.6 Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 88,32 + 11,3 = 99,62 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.539)$$

5.9.8.7 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1} = \frac{99,62}{1 + \left(0,0055 + \frac{1}{3280}\right) \cdot 99,62} = 62,96 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.540)$$

5.9.8.8 Teplotní spád

Obrázek 40. Teplotní spád SH1

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{244,68 - 134}{\ln \frac{244,68}{134}} = 183,82 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.541)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{out} = 652,68 - 418 = 244,68 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.542)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{in} = 444,63 - 310,63 = 134 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.543)$$

5.9.8.9 Skutečný tepelný výkon přehříváku SH1

$$Q_{SH1}^{skut} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{SH1} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.544)$$

kde: $\xi = 0,79$ [-] – součinitel využití pro SH1 při spalování hnědého uhlí (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{SH1}^{skut} = 0,79 \cdot 183,82 \cdot 62,96 \cdot 2269,33 \cdot 10^{-3} = 20748,06 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{SH1}^{skut} - Q_{SH1}}{Q_{SH1}} \cdot 100 = \frac{20748,06 - 20510,83}{20510,83} \cdot 100 = 1,16 \% < 2\% \quad (5.545)$$

5.9.8.10 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru SH1

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak ± 50 °C od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$\begin{aligned} i_{SH1}^{out,skut} &= \frac{(i_{MRIZ}^{out} \cdot M_{pv}) - Q_{SH1}^{skut}}{M_{pv}} = \frac{(8477,95 \cdot 7,4) - 20748,06}{7,4} = \\ &= 5435,37 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (5.546)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 442,18 \text{ °C} - \text{určeno z Graf 3 pro } i_{SH1}^{out,skut} \text{ při } \alpha = 1,35$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 444,63 - 442,18 = 2,45 \text{ °C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.547)$$

5.9.9 Ekonomizér (ohřívák vody) ECO2

5.9.9.1 Parametry spalín

Návrhová teplota spalín na výstupu z ECO2

$$i_{\text{ECO2}}^{\text{out}} = \frac{(i_{\text{SH1}}^{\text{out,skut}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{ECO2}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(5435,37 \cdot 7,4) - 10625,9}{7,4} = 3999,43 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.548)$$

kde: Q_{ECO2} [kW] – návrhový tepelný výkon dle rovnice (5.19)

$t_{\text{sp}}^{\text{out}} = 330,49 \text{ }^\circ\text{C}$ – odečteno z Graf 3 pro $i_{\text{ECO2}}^{\text{out}}$, $\alpha=1,35$

Střední teplota spalín

$$t_{\text{sp}}^{\text{str}} = \frac{t_{\text{sp}}^{\text{in}} + t_{\text{sp}}^{\text{out}}}{2} = \frac{442,18 - 330,49}{2} = 386,34 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.549)$$

kde: $t_{\text{sp}}^{\text{in}}$ [$^\circ\text{C}$] – vstupní teplota spalín (výstupní teplota z SH1 dle rovnice (5.546))

Průtok spalín

$$V_{\text{sp}} = M_{\text{pv}} \cdot O_{\text{sp}} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}^{\text{str}} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.550)$$

kde: $O_{\text{sp}} = 8,61 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$ – skutečné množství spalín pro $\alpha=1,35$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{\text{sp}} = 7,4 \cdot 8,61 \cdot (1 - 0,0314) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{386,34 + 273,15}{273,15} \right) = 149,22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost spalín

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}}}{F_{\text{sp}}} = \frac{149,22}{17,64} = 8,46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.551)$$

5.9.9.2 Parametry média

Střední teplota páry

$$t_{\text{p}}^{\text{str}} = \frac{t_{\text{p}}^{\text{in}} + t_{\text{p}}^{\text{out}}}{2} = \frac{179 + 225}{2} = 202 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.552)$$

kde: t_{p}^{in} , $t_{\text{p}}^{\text{out}}$ [$^\circ\text{C}$] – vstupní, výstupní teplota páry pro ECO2 odečtena z Tab. 12

Střední tlak páry

$$p_{\text{p}}^{\text{str}} = \frac{p_{\text{p}}^{\text{in}} + p_{\text{p}}^{\text{out}}}{2} = \frac{10,05 + 9,95}{2} = 10 \text{ MPa} \quad (5.553)$$

kde: p_{p}^{in} , $p_{\text{p}}^{\text{out}}$ [MPa] – vstupní, výstupní tlak páry pro ECO2 odečten z Tab. 12

5.9.9.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalin. Trubky přehříváku ECO2 jsou uspořádány za sebou.

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.554)$$

kde: $c_z = 1$ [-] – oprava na počet podélných řad dle [1]

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} \text{ [-]} \text{ – oprava na uspořádání svazku} \quad (5.555)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,08}{0,03} = 2,5 \text{ [-]} \quad (5.556)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,08}{0,03} = 2,5 \text{ [-]} \quad (5.557)$$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 2,5 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,5}{2}\right)^3]^{-2} = 1,07 \text{ [-]}$$

$\lambda = 0,0554 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 0,582 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kin. viskozity spalin pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,64$ [-] – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 1,07 \cdot \frac{0,0554}{0,032} \cdot \left(\frac{8,46 \cdot 0,032}{0,582 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,64^{0,33} = 77,18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.9.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k_{\text{celk}} \cdot p \cdot s} \quad [-] \quad (5.558)$$

$$\text{kde: } k_{\text{celk}} = (k_{\text{sp}} \cdot r_{\text{sp}} + k_p \cdot \mu) \quad [-] \quad (5.559)$$

$$\text{kde: } k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{sp}} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{sp}}^{\text{str}}}{1000} \right) \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$$

kde: s [m] – účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad [\text{m}] \quad (5.560)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,08 \cdot 0,08}{0,032^2} - 1 \right) = 0,2 \text{ m}$$

$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,07$ [-] – objemová část vodní páry dle rovnice (2.39)

$p_{\text{sp}} = 0,0205$ MPa – celkový parciální tlak dle rovnice (4.36)

$$k_{\text{sp}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,07}{3,16 \cdot \sqrt{0,0205 \cdot 0,2}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{659,49}{1000} \right) = 32,6 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$r_{\text{sp}} = 0,205$ [-] – objemová část tříatomových plynů dle rovnice (4.35)

$$k_p = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{\text{sp}}^{\text{str}2} \cdot d_s^2}} = \frac{43}{\sqrt[3]{659,49^2 \cdot 20^2}} = 0,077 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \quad (5.561)$$

kde: $d_s = 20$ μm – střední efekt. průměr popílku (odečten z [1])

$\mu = 4,53$ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ – koncentrace popílku ve spalinách dle rovnice (2.41)

$$k_{\text{celk}} = (32,6 \cdot 0,205 + 0,077 \cdot 4,53) = 7,03$$

$p = 0,1$ MPa – určeno z [1] pro podtlakové ohniště

$$a = 1 - e^{-7,03 \cdot 0,1 \cdot 0,2} = 0,131 \quad [-]$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$t_z = t_p^{\text{str}} + \varepsilon \cdot \frac{Q_{\text{ECO}_2}}{S_{\text{ECO}_2}} \cdot 10^3 \quad [^\circ\text{C}] \quad (5.562)$$

kde: $\varepsilon = 0,0071$ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ – součinitel zanešení odečten z [1] pro w_{sp}

$$t_z = 202 + 0,0071 \cdot \frac{10625,9}{1162,46} \cdot 10^3 = 271,25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{sp}^{str3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{sp}^{str}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{sp}^{str}}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.563)$$

kde: $a_{st} = 0,8$ [-] – stupeň černosti povrchu stěn (odečten z [1])

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,131 \cdot 659,49^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{544,4}{659,49}\right)^4}{1 - \frac{544,4}{659,49}} = 5,94 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

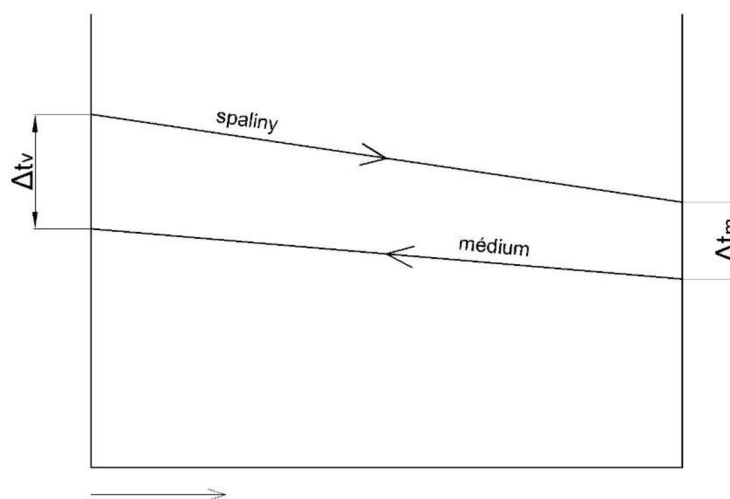
5.9.9.5 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 77,18 + 5,94 = 83,12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.564)$$

5.9.9.6 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \cdot \alpha_1} = \frac{83,12}{1 + (0,0071 + 0) \cdot 83,12} = 52,27 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.565)$$

kde: $\frac{1}{\alpha_2} = 0$ – termický odpor na vnitřní straně média lze zanedbat, je-li splněna podmínka $\alpha_2 \gg \alpha_1$ [1]

5.9.9.7 Teplotní spád

Obrázek 41. Teplotní spád ECO2

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{217,18 - 151,49}{\ln \frac{217,18}{151,49}} = 182,37 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.566)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{out} = 442,18 - 225 = 217,18 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.567)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{in} = 330,49 - 179 = 151,49 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.568)$$

5.9.9.8 Skutečný tepelný výkon ECO2

$$Q_{\text{ECO2}}^{\text{skut}} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{\text{ECO2}} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.569)$$

kde: $\xi = 0,96$ [-] – součinitel využití pro ECO2 při spalování hnědého uhlí (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{\text{ECO2}}^{\text{skut}} = 0,96 \cdot 182,37 \cdot 52,27 \cdot 1162,46 \cdot 10^{-3} = 10638,03 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{\text{ECO2}}^{\text{skut}} - Q_{\text{ECO2}}}{Q_{\text{ECO2}}} \cdot 100 = \frac{10638,03 - 10625,9}{10625,9} \cdot 100 = 0,11 \% < 2\% \quad (5.570)$$

5.9.9.9 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru ECO2

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak ± 50 °C od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$i_{\text{ECO2}}^{\text{out,skut}} = \frac{(i_{\text{SH1}}^{\text{out,skut}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{ECO2}}^{\text{skut}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(5435,37 \cdot 7,4) - 10638,03}{7,4} = 3997,79 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.571)$$

$$t_{\text{sp}}^{\text{out,skut}} = 330,37 \text{ °C} - \text{určeno z Graf 3 pro } i_{\text{ECO2}}^{\text{out,skut}} \text{ při } \alpha = 1,35$$

$$t_{\text{sp}}^{\text{out}} - t_{\text{sp}}^{\text{out,skut}} = 330,49 - 330,37 = 0,12 \text{ °C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.572)$$

5.9.9.10 Kontrola rychlosti vody

V ekonomizéru je nutno zajistit, aby rychlost proudění vody nebyla nižší jak $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ při plném výkonu. Tím se zabezpečí proudění vody všemi trubkami i při sníženém výkonu kotle. Při nízkých rychlostech by nedocházelo k odtržení vzniklých bublinek od stěny trubky a tím by hrozilo „ucpání“ trubky párou. Při zahlcení trubky párou může dojít k poškození materiálu trubek ekonomizéru vysokými teplotami (dochází k omezení chlazení stěn trubek).

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{\text{pp}}^{\text{ECO2}} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\text{trubek}}} = \frac{4 \cdot (55,56 - 0,545 - 3,8 + 0,56) \cdot 1,16 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 99} = 1,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.573)$$

kde: v – měrný objem pro t_p^{str} a p_p^{str} určen pomocí aplikace SteamProperty [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

$$v = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

5.9.10 Ohřívák vzduchu AH2

5.9.10.1 Parametry spalin

Návrhová teplota spalin na výstupu z AH2

$$i_{AH2}^{out} = \frac{(i_{ECO2}^{out,skut} \cdot M_{pv}) - Q_{AH2}}{M_{pv}} = \frac{(3997,79 \cdot 7,4) - 4196,4}{7,4} = 3657,63 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.574)$$

kde: Q_{AH2} [kW] – návrhový tepelný výkon dle rovnice (5.21)

$t_{sp}^{out} = 301,72 \text{ }^\circ\text{C}$ – odečteno z *Graf 3* pro i_{AH2}^{out} , $\alpha=1,36$

Střední teplota spalin

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{330,37 - 301,72}{2} = 316,04 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.575)$$

kde: t_{sp}^{in} [°C] – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z ECO2 dle (5.575))

Objemový průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.576)$$

kde: O_{sp} [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$] – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,36$ [-]

$$\begin{aligned} O_{sp} &= O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin} = \\ &= 6,46 + (1,36 - 1) \cdot 6,13 = 8,67 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \end{aligned} \quad (5.577)$$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 7,4 \cdot 8,67 \cdot (1 - 0,0314) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{316,04 + 273,15}{273,15} \right) = 134,19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{134,19}{15,56} = 8,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.578)$$

5.9.10.2 Parametry média

Střední teplota vzduchu

$$t_{vz}^{str} = \frac{t_{vz}^{in} + t_{vz}^{out}}{2} = \frac{115 + 220}{2} = 167,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.579)$$

kde: t_{vz}^{in} , t_{vz}^{out} [°C] – vstupní, výstupní teplota vzduchu pro AH2 odečtena z Tab. 12

Objemový průtok vzduchu

$$V_{vz} = M_{pv} \cdot O_{vzmin} \cdot x_{sek} \cdot \beta \cdot \left(\frac{t_{vz}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.580)$$

kde: $O_{vzmin} = 6,13 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ – min. objem vzduchu, viz rovnice (2.27)

$\beta = 1,3 [-]$ – přebytek vzduchu v ohříváku

$$V_{vz} = 7,4 \cdot 6,13 \cdot 0,315 \cdot 1,3 \cdot \left(\frac{167,5 + 273,15}{273,15} \right) = 29,86 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost vzduchu

$$w_{vz} = \frac{4 \cdot V_{vz}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{trubek}} = \frac{4 \cdot 29,86}{\pi \cdot 0,0395^2 \cdot 2520} = 9,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.581)$$

5.9.10.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalín, trubky ohříváku vzduchu AH2 jsou uspořádané za sebou.

$$\alpha_{k,sp} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.582)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \text{ – oprava na uspořádání svazku} \quad (5.583)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,068}{0,0445} = 1,53 [-] \quad (5.584)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,095}{0,0445} = 2,13 [-] \quad (5.585)$$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 1,53 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,13}{2}\right)^3]^{-2} = 1 [-]$$

$\lambda = 0,0495 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 0,481 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kin. viskozity spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,65 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_{k,sp} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0495}{0,0445} \cdot \left(\frac{8,63 \cdot 0,0445}{0,481 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,65^{0,33} = 66,21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.10.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu

$$\alpha_{k,vz} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{vz} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.586)$$

kde: $\lambda = 0,0363 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ - součinitel tepel. vodivosti vzduchu pro t_{vz}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 29,83 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - součinitel kin. viskozity vzduchu pro t_{vz}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,714[-]$ - Prandtlovo číslo vzduchu pro t_{vz}^{str} (určeno z [1])

$c_t [-]$ - opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn (odečten z [1])

$$c_t = \left(\frac{T_{vz}^{str}}{\frac{T_{vz}^{str} + T_{sp}^{str}}{2}} \right)^{0,5} = \left(\frac{440,65}{\frac{440,65 + 589,06}{2}} \right)^{0,5} = 0,925 [-] \quad (5.587)$$

$$\alpha_{k,vz} = 0,023 \cdot \frac{0,0363}{0,0395} \cdot \left(\frac{9,67 \cdot 0,0395}{29,83 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,714^{0,4} \cdot 0,925 = 33,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.10.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_{k,sp} \cdot \alpha_{k,vz}}{\alpha_{k,sp} + \alpha_{k,vz}} = \frac{66,21 \cdot 33,0}{66,21 + 33,0} = 22,02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.588)$$

5.9.10.6 Součinitel ψ pro křížové prouděníParametr P

$$P = \frac{t_{sp}^{in} - t_{sp}^{out}}{t_{sp}^{in} - t_{vz}^{in}} = \frac{330,37 - 301,45}{330,37 - 115} = 0,13 [-] \quad (5.589)$$

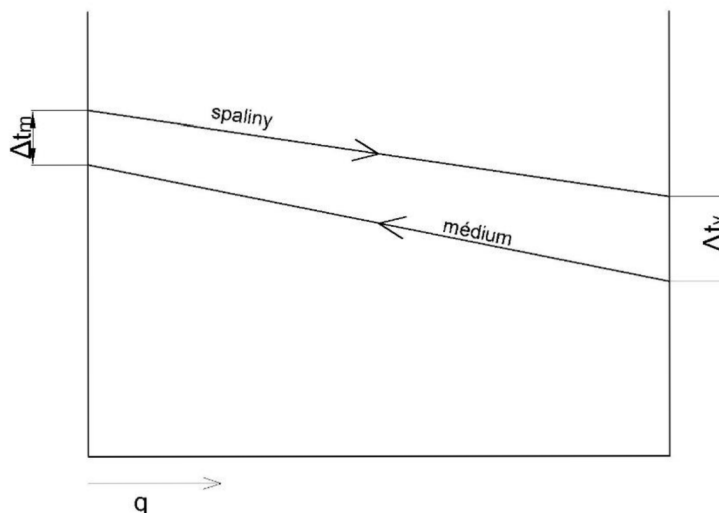
Parametr R

$$R = \frac{t_{vz}^{out} - t_{vz}^{in}}{t_{sp}^{in} - t_{sp}^{out}} = \frac{220 - 115}{330,37 - 301,45} = 3,63 [-] \quad (5.590)$$

Součinitel ψ_{kr}

$\psi_{kr} = 0,89 [-]$ - odečteno z nomogramu z [1] pro parametry P a R

5.9.10.7 Teplotní spád



Obrázek 42. Teplotní spád AH2

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} \cdot \psi_{kr} = \frac{186,45 - 110,37}{\ln \frac{186,45}{110,37}} \cdot 0,89 = 129,14 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.591)$$

$$\text{kde: } \Delta t_m = t_{sp}^{in} - t_{vz}^{out} = 330,37 - 220 = 110,37 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.592)$$

$$\Delta t_v = t_{sp}^{out} - t_{vz}^{in} = 301,45 - 115 = 186,45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.593)$$

5.9.10.8 Skutečný tepelný výkon AH2

$$Q_{AH2}^{skut} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{AH2} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.594)$$

kde: $\xi = 0,7$ [-] – součinitel využití pro AH2 při spalování hnědého uhlí (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{AH2}^{skut} = 0,7 \cdot 129,14 \cdot 22,02 \cdot 1285,89 \cdot 10^{-3} = 2560,19 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{AH2}^{skut} - Q_{AH2}}{Q_{AH2}} \cdot 100 = \frac{2560,19 - 2541,79}{2541,79} \cdot 100 = 0,72 \% < 2\% \quad (5.595)$$

5.9.10.9 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru AH2

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak $\pm 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$\begin{aligned} i_{AH2}^{out,skut} &= \frac{(i_{ECO2}^{out,skut} \cdot M_{pv}) - Q_{AH2}^{skut}}{M_{pv}} = \frac{(3997,82 \cdot 7,4) - 2560,19}{7,4} = \\ &= 3651,85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (5.596)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 301,25 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ – určeno z Graf 3 pro } i_{AH2}^{out,skut} \text{ při } \alpha = 1,36$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 301,45 - 301,25 = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.597)$$

5.9.11 Ekonomizér (ohřívák vody) ECO1

5.9.11.1 Parametry spalin

Návrhová teplota spalin na výstupu z ECO1

$$i_{\text{ECO1}}^{\text{out}} = \frac{(i_{\text{AH2}}^{\text{out,skut}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{ECO1}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(3651,85 \cdot 7,4) - 10890,98}{7,4} = 2180,09 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.598)$$

kde: $Q_{\text{ECO1}} = 10890,98 \text{ kW}$ – návrhový tepelný výkon dle rovnice (5.20)

$$t_{\text{sp}}^{\text{out}} = 182,41 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ – odečteno z Graf 3 pro } i_{\text{ECO1}}^{\text{out}}, \alpha=1,36$$

Střední teplota spalin

$$t_{\text{sp}}^{\text{str}} = \frac{t_{\text{sp}}^{\text{in}} + t_{\text{sp}}^{\text{out}}}{2} = \frac{301,25 - 182,41}{2} = 241,83 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.599)$$

kde: $t_{\text{sp}}^{\text{in}}$ [$^{\circ}\text{C}$] – vstupní teplota spalin (výstupní teplota z AH2 dle rovnice (5.596) (5.294))

Objemový průtok spalin

$$V_{\text{sp}} = M_{\text{pv}} \cdot O_{\text{sp}} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}^{\text{str}} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.600)$$

kde: O_{sp} [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$] – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,36$ [-]

$$\begin{aligned} O_{\text{sp}} &= O_{\text{spmin}} + (\alpha - 1) \cdot O_{\text{vzmin}} = \\ &= 6,46 + (1,36 - 1) \cdot 6,13 = 8,67 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \end{aligned} \quad (5.601)$$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{\text{sp}} = 7,4 \cdot 8,67 \cdot (1 - 0,0314) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{241,83 + 273,15}{273,15} \right) = 117,29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost spalin

$$w_{\text{sp}} = \frac{V_{\text{sp}}}{F_{\text{sp}}} = \frac{117,29}{17,37} = 6,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.602)$$

5.9.11.2 Parametry média

Střední teplota páry

$$t_{\text{p}}^{\text{str}} = \frac{t_{\text{p}}^{\text{in}} + t_{\text{p}}^{\text{out}}}{2} = \frac{130 + 179}{2} = 154,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.603)$$

kde: $t_{\text{p}}^{\text{in}}, t_{\text{p}}^{\text{out}}$ [$^{\circ}\text{C}$] – vstupní, výstupní teplota páry pro ECO1 odečtena z Tab. 12

Střední tlak páry

$$p_p^{\text{str}} = \frac{p_p^{\text{in}} + p_p^{\text{out}}}{2} = \frac{10,05 + 10,25}{2} = 10,15 \text{ MPa} \quad (5.604)$$

kde: $p_p^{\text{in}}, p_p^{\text{out}}$ [MPa] – vstupní, výstupní tlak páry pro ECO1 odečten z Tab. 12

5.9.11.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k = 0,105 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{s_z} \cdot \left(\frac{d}{s_z}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z}{s_z}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{\text{sp}} \cdot s_z}{\gamma}\right)^{0,72} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.605)$$

kde: $c_z = 1$ [-] – opravný koeficient na počet příčných řad ve svazku

$c_s = 1$ [-] – opravný koeficient na uspořádání trubek ve svazku

$\lambda = 0,0433 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalin pro $t_{\text{sp}}^{\text{str}}$ (určeno z [1])

$\gamma = 3,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – součinitel kin. viskozity spalin pro $t_{\text{sp}}^{\text{str}}$ (určeno z [1])

$$\alpha_k = 0,105 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0433}{0,0125} \cdot \left(\frac{0,0248}{0,0125}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,01}{0,0125}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{6,75 \cdot 0,0125}{3,82 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,72} = 66,21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.11.4 Redukovaný součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{1r} = \left(\frac{S_z}{S} \cdot E + \frac{S_h}{S}\right) \cdot \frac{\Psi_z \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \Psi_z \cdot \alpha_k} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.606)$$

$$\text{kde: } \frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z}{D} - \frac{\delta_z}{D}\right)} = \frac{\left(\frac{0,052}{0,032}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0,052}{0,032}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0,0125}{0,032} - \frac{0,001}{0,032}\right)} = 0,695 [-]$$

E [-] – součinitel efektivnosti žebra, určuje se v závislosti $\beta \cdot h_z$ a $\frac{D_z}{D}$ z nomogramu [1]

$$\beta \cdot h_z = \sqrt{\frac{2 \cdot \Psi_z \cdot \alpha_k}{\delta_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \Psi_z \cdot \alpha_k)}} \cdot h_z [-] \quad (5.607)$$

kde: $\Psi_z = 0,85$ [-] – koeficient charakterizující nerovnoměrné rozdělení α_k po povrchu žebra, odečteno z [-]

$\lambda_z = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti žebek (odečten z firemních podkladů)

$\varepsilon = 0,0114$ [-] – součinitel znečištění (odečten z [1] pro w_{sp} a pro žebrované trubky)

$$\beta \cdot h_z = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 66,21}{0,001 \cdot 25 \cdot (1 + 0,0114 \cdot 0,85 \cdot 66,21)}} \cdot 0,01 = 0,53 [-]$$

$$\frac{D_z}{D} = \frac{0,052}{0,032} = 1,625 [-] \quad (5.608)$$

$$E = 0,95 [-]$$

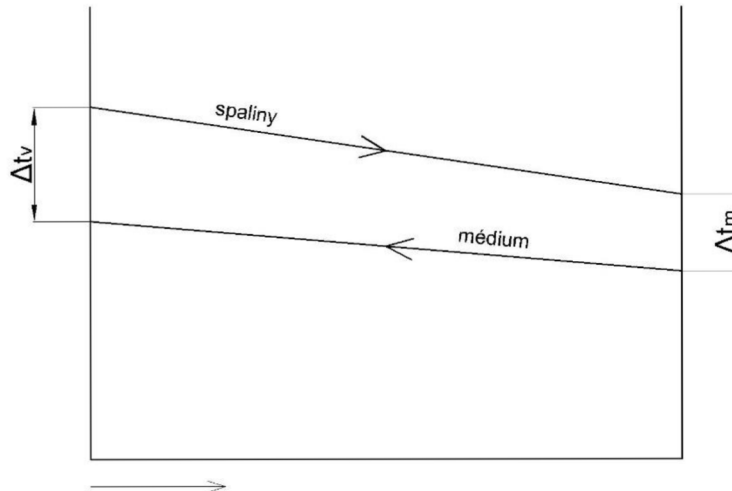
$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S} = 1 - 0,695 = 0,305 [-] \quad (5.609)$$

$$\alpha_{1r} = (0,695 \cdot 0,95 + 0,305) \cdot \frac{0,85 \cdot 66,21}{1 + 0,0114 \cdot 0,85 \cdot 66,21} = 33,09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.11.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \alpha_{1r} = 33,09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

5.9.11.6 Teplotní spád



Obrázek 43. Teplotní spád ECO1

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{122,25 - 52,41}{\ln \frac{122,25}{52,41}} = 82,46 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.610)$$

$$\text{kde: } \Delta t_v = t_{sp}^{in} - t_p^{out} = 301,25 - 179 = 122,25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.611)$$

$$\Delta t_m = t_{sp}^{out} - t_p^{in} = 182,41 - 130 = 52,41 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.612)$$

5.9.11.7 Skutečný tepelný výkon

$$Q_{ECO1}^{skut} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{ECO1} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.613)$$

kde: $\xi = 0,9$ [-] – součinitel využití pro ECO1 při spalování hnědého uhlí (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{ECO1}^{skut} = 0,9 \cdot 82,46 \cdot 33,09 \cdot 4458,75 \cdot 10^{-3} = 10950,08 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{ECO1}^{skut} - Q_{ECO1}}{Q_{ECO1}} \cdot 100 = \frac{10950,08 - 10890,98}{10890,98} \cdot 100 = 0,54 \% < 2\% \quad (5.614)$$

5.9.11.8 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru ECO1

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak ± 50 °C od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$i_{\text{ECO1}}^{\text{out,skut}} = \frac{(i_{\text{AH2}}^{\text{out,skut}} \cdot M_{\text{pv}}) - Q_{\text{ECO1}}^{\text{skut}}}{M_{\text{pv}}} = \frac{(3651,85 \cdot 7,4) - 10950,08}{7,4} =$$

$$= 2172,11 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.615)$$

$$t_{\text{sp}}^{\text{out,skut}} = 181,75 \text{ °C} - \text{určeno z Graf 3 pro } i_{\text{ECO1}}^{\text{out,skut}} \text{ při } \alpha = 1,36$$

$$t_{\text{sp}}^{\text{out}} - t_{\text{sp}}^{\text{out,skut}} = 182,41 - 181,75 = 0,66 \text{ °C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.616)$$

5.9.11.9 Kontrola rychlosti vody

V ekonomizéru je nutno zajistit, aby rychlost proudění vody nebyla nižší jak $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ při plném výkonu. Tím se zabezpečí proudění vody všemi trubkami i při sníženém výkonu kotle. Při nízkých rychlostech by nedocházelo k odtržení vzniklých bublinek od stěny trubky a tím by hrozilo „ucpání“ trubky párou. Při zahlcení trubky párou může dojít k poškození materiálu trubek ekonomizéru vysokými teplotami (dochází k omezení chlazení stěn trubek).

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{\text{pp}}^{\text{ECO1}} \cdot v}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\text{trubek}}} = \frac{4 \cdot (55,56 - 0,545 - 3,8 + 0,56) \cdot 1,09 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,0248^2 \cdot 44} =$$

$$= 2,66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde: v – měrný objem pro t_p^{str} a p_p^{str} určen pomocí aplikace SteamProperty [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

$$v = 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

5.9.12 Ohřívák vzduchu AH1

5.9.12.1 Parametry spalin

Návrhová teplota spalin na výstupu z AH1

$$i_{AH1}^{out} = \frac{(i_{ECO1}^{out,skut} \cdot M_{pv}) - Q_{AH1}}{M_{pv}} = \frac{(2172,11 \cdot 7,4) - 2999,02}{7,4} = 1766,84 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.618)$$

kde: Q_{AH1} [kW] – návrhový tepelný výkon dle rovnice (5.22)

$$t_{sp}^{out} = 146,29 \text{ }^\circ\text{C} - \text{odečteno z Graf 3 pro } i_{AH1}^{out}, \alpha=1,38$$

- návrhová teplota spalin na výstupu z kotle je o víc jak $10 \text{ }^\circ\text{C}$ nižší jak předpokládaná teplota ($160 \text{ }^\circ\text{C}$). Pro snížení výkonu ohříváku je nutno předeřhřívát vzduch před vstupem v kaloriferu na vyšší teplotu (kalorifer je navrhnut na maximální ohřátí vzduchu na 100°C)

Návrhový tepelný výkon AH1 při ohřívání vzduchu před vstupem na $87,5 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{AH1} = M_{pv} \cdot \beta \cdot (I_{vzmin}^{115^\circ\text{C}} - I_{vzmin}^{87,5^\circ\text{C}}) \text{ [kW]} \quad (5.619)$$

kde: $I_{vzmin}^{87,5^\circ\text{C}}$ - entalpie minimálního množství vzduchu pro $t_{AH1}^{in} = 87,5 \text{ }^\circ\text{C}$ odečtena z Graf 3
 $I_{vzmin}^{87,5^\circ\text{C}} = 699 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$Q_{AH1} = 7,4 \cdot 1,3 \cdot (921,47 - 699) = 2061,83 \text{ kW}$$

Návrhová teplota spalin na výstupu z AH1 při ohřívání vzduchu před vstupem na $87,5 \text{ }^\circ\text{C}$

$$i_{AH1}^{out} = \frac{(i_{ECO1}^{out,skut} \cdot M_{pv}) - Q_{AH1}}{M_{pv}} = \frac{(2172,11 \cdot 7,4) - 2061,83}{7,4} = 1893,48 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.620)$$

kde: $t_{sp}^{out} = 156,62 \text{ }^\circ\text{C}$ – odečteno z Graf 3 pro $i_{AH1}^{out}, \alpha=1,38$

Střední teplota spalin

$$t_{sp}^{str} = \frac{t_{sp}^{in} + t_{sp}^{out}}{2} = \frac{181,75 - 156,62}{2} = 169,19 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.621)$$

kde: t_{sp}^{in} [$^\circ\text{C}$] – vstupní teplota spalin (výstupní teplota spalin z ECO1)

Objemový průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot O_{sp} \cdot (1 - z_c) \cdot \left(\frac{p_b}{p_b - \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{t_{sp}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.622)$$

kde: $O_{sp} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$ – skutečné množství spalin pro $\alpha=1,38 [-]$

$$O_{sp} = O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin} = \quad (5.623)$$

$$= 6,46 + (1,38 - 1) \cdot 6,13 = 8,79 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}$$

$\Delta p = 150 \text{ Pa}$ – podtlak v ohništi (dle firemních podkladů)

$p_b = 101\,325 \text{ Pa}$ – atmosférický tlak [1]

$$V_{sp} = 7,4 \cdot 8,79 \cdot (1 - 0,0314) \cdot \left(\frac{101325}{101325 - 150} \right) \cdot \left(\frac{169,19 + 273,15}{273,15} \right) = 102,17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{sp}} = \frac{102,17}{9,72} = 10,51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.624)$$

5.9.12.2 Parametry médiaStřední teplota vzduchu

$$t_{vz}^{str} = \frac{t_{vz}^{in} + t_{vz}^{out}}{2} = \frac{87,5 + 115}{2} = 101,25 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.625)$$

kde: $t_{vz}^{out} [^\circ\text{C}]$ – výstupní teplota vzduchu pro AH2 odečtena z Tab. 12

Objemový průtok vzduchu

$$V_{vz} = M_{pv} \cdot O_{vzmin} \cdot \beta \cdot \left(\frac{t_{vz}^{str} + 273,15}{273,15} \right) [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.626)$$

kde: $O_{vzmin} = 6,13 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ – min. objem vzduchu, viz rovnice (2.27)

$\beta = 1,3 [-]$ – přebytek vzduchu v ohříváku

$$V_{vz} = 7,4 \cdot 6,13 \cdot 1,3 \cdot \left(\frac{101,25 + 273,15}{273,15} \right) = 77,99 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost vzduchu

$$w_{vz} = \frac{4 \cdot V_{vz}}{\pi \cdot d^2 \cdot n_{trubek}} = \frac{4 \cdot 77,99}{\pi \cdot 0,0395^2 \cdot 3596} = 17,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.627)$$

5.9.12.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je uvažováno příčné proudění spalín, trubky ohříváku vzduchu AH1 jsou uspořádané za sebou.

$$\alpha_{k,sp} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.628)$$

kde: $c_z = 1 [-]$ – oprava na počet podélných řad dle [1]

$$c_s = [1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3]^{-2} [-] \text{ – oprava na uspořádání svazku} \quad (5.629)$$

kde: σ_1 – poměrná příčná rozteč [-]

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,068}{0,0445} = 1,53 [-] \quad (5.630)$$

σ_2 – poměrná podélná rozteč [-]

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,095}{0,0445} = 2,13 [-] \quad (5.631)$$

$$c_s = [1 + (2 \cdot 1,53 - 3) \cdot \left(1 - \frac{2,13}{2}\right)^3]^{-2} = 1 [-]$$

$\lambda = 0,0372 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 0,293 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kin. viskozity spalín pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,676 [-]$ – Prandtlovo číslo pro t_{sp}^{str} (určeno z [1])

$$\alpha_{k,sp} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0372}{0,0445} \cdot \left(\frac{10,51 \cdot 0,0445}{0,293 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,65} \cdot 0,676^{0,33} = 79,11 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.9.12.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu

$$\alpha_{k,vz} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{vz} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.632)$$

kde: $\lambda = 0,0307 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ – součinitel tepel. vodivosti vzduchu pro t_{vz}^{str} (určeno z [1])

$\gamma = 22,5 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ – součinitel kin. viskozity vzduchu pro t_{vz}^{str} (určeno z [1])

$Pr = 0,73 [-]$ – Prandtlovo číslo vzduchu pro t_{vz}^{str} (určeno z [1])

$c_t [-]$ – opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn (odečten z [1])

$$c_t = \left(\frac{T_{vz}^{str}}{\frac{T_{vz}^{str} + T_{sp}^{str}}{2}} \right)^{0,5} = \left(\frac{374,4}{\frac{374,4 + 442,34}{2}} \right)^{0,5} = 0,958 [-] \quad (5.633)$$

$$\alpha_{k,vz} = 0,023 \cdot \frac{0,0307}{0,0395} \cdot \left(\frac{17,7 \cdot 0,0395}{22,5 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,73^{0,4} \cdot 0,958 = 58,98 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

5.9.12.5 Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_{k,sp} \cdot \alpha_{k,vz}}{\alpha_{k,sp} + \alpha_{k,vz}} = \frac{79,11 \cdot 58,98}{79,11 + 58,98} = 33,79 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.634)$$

5.9.12.6 Součinitel ψ pro křížové proudění

Parametr P

$$P = \frac{t_{sp}^{in} - t_{sp}^{out}}{t_{sp}^{in} - t_{vz}^{in}} = \frac{181,75 - 156,62}{181,75 - 87,5} = 0,27 [-] \quad (5.635)$$

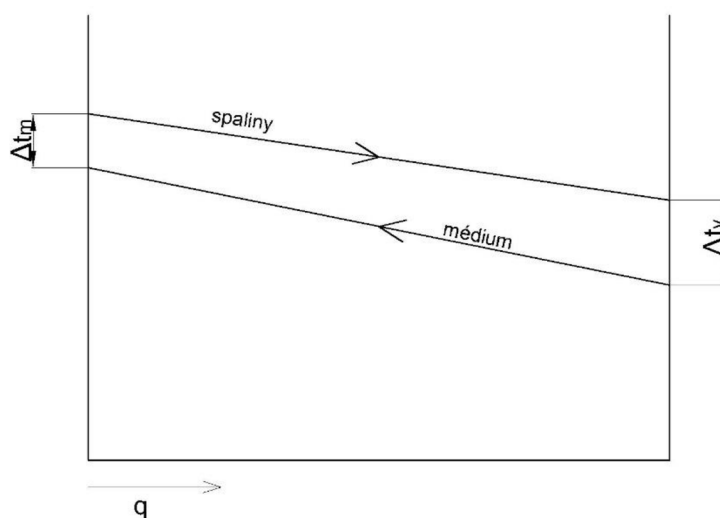
Parametr R

$$R = \frac{t_{vz}^{out} - t_{vz}^{in}}{t_{sp}^{in} - t_{sp}^{out}} = \frac{115 - 87,5}{181,75 - 156,62} = 1,1 [-] \quad (5.636)$$

Součinitel ψ_{kr}

$\psi_{kr} = 0,9 [-]$ – odečteno z nomogramu z [1] pro parametry P a R

5.9.12.7 Teplotní spád



Obrázek 44. Teplotní spád AH2

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} \cdot \psi_{kr} = \frac{69,12 - 66,75}{\ln \frac{69,12}{66,75}} \cdot 0,9 = 60,19 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.637)$$

$$\text{kde: } \Delta t_m = t_{sp}^{in} - t_{vz}^{out} = 181,75 - 115 = 66,75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.638)$$

$$\Delta t_v = t_{sp}^{out} - t_{vz}^{in} = 156,62 - 87,5 = 69,12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.639)$$

5.9.12.8 Skutečný tepelný výkon

$$Q_{AH1}^{skut} = \xi \cdot \Delta t \cdot k \cdot S_{AH1} \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (5.640)$$

kde: $\xi = 0,7$ [-] – součinitel využití pro AH1 při spalování hnědého uhlí (odečten z firemních podkladů)

$$Q_{AH1}^{skut} = 0,7 \cdot 60,19 \cdot 33,79 \cdot 1508,17 \cdot 10^{-3} = 2068,7 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{AH1}^{skut} - Q_{AH1}}{Q_{AH1}} \cdot 100 = \frac{2068,7 - 2061,83}{2068,7} \cdot 100 = 0,33 \% < 2\% \quad (5.641)$$

5.9.12.9 Skutečná teplota spalin na výstupu z prostoru AH1

- skutečná teplota spalin se nesmí lišit o víc jak ± 50 °C od návrhové, jinak by se musel výpočet opakovat

$$i_{AH1}^{out,skut} = \frac{(i_{ECO1}^{out,skut} \cdot M_{pv}) - Q_{AH1}^{skut}}{M_{pv}} = \frac{(2172,11 \cdot 7,4) - 2068,7}{7,4} = 1892,55 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5.642)$$

$$t_{sp}^{out,skut} = 156,6 \text{ °C} - \text{určeno z Graf 3 pro } i_{AH1}^{out,skut} \text{ při } \alpha = 1,38$$

$$t_{sp}^{out} - t_{sp}^{out,skut} = 156,62 - 156,6 = 0,02 \text{ °C} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.643)$$

- vypočtená teplota spalin na konci kotle při spalování hnědého uhlí vyhovuje s dostatečnou přesností požadovaným parametrům a zohledňuje rosný bod spalin

5.9.13 Výparník

5.9.13.1 Celkový výkon výparníku

$$Q_{EV}^{skut} = \bar{q} \cdot (S_{ús} - S_2) + Q_{d,SH3}^{skut} + Q_{d,SH4}^{skut} + Q_{d,SH2}^{skut} + Q_{MRIZ}^{skut} \text{ [kW]} \quad (5.644)$$

kde: $\bar{q} = 116,03 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ – tepelné zatížení stěn ohniště dle rovnice (4.43)

$S_{ús} = 786,02 \text{ m}^2$ – aktivní plocha stěn ohniště pro převzetí tepla dle rovnice (4.6)

$S_2 = 47,53 \text{ m}^2$ - plocha výstupního otvoru dle rovnice (4.3)

$$Q_{EV}^{skut} = 116,03 \cdot (786,02 - 47,53) + 1861,2 + 319,66 + 157,06 + 1766,9 = 89770,83 \text{ kW}$$

Kontrola výkonu

- výkon se nesmí lišit o víc jak 2 % od návrhového tepelného výkonu

$$\frac{Q_{EV}^{skut} - Q_{EV}}{Q_{EV}} \cdot 100 = \frac{89770,83 - 90016,67}{90016,67} \cdot 100 = -0,27 \% < 2\% \quad (5.645)$$

kde: $Q_{EV} = 90016,67 \text{ kW}$ – návrhový tepelný výkon výparníku dle rovnice (5.18)

5.9.14 Kontrola výpočtu

5.9.14.1 Celkový tepelný výkon kotle

$$Q_{\text{celk}} = Q_{\text{EV}}^{\text{skut}} + Q_{\text{SH3}}^{\text{skut}} + Q_{\text{SH4}}^{\text{skut}} + Q_{\text{SH2}}^{\text{skut}} + Q_{\text{SH1}}^{\text{skut}} + Q_{\text{ECO2}}^{\text{skut}} + Q_{\text{ECO1}}^{\text{skut}} \text{ [kW]} \quad (5.646)$$

$$Q_{\text{celk}} = 89770,83 + 9741,81 + 9865,81 + 8646,61 + 20745,53 + 10638,4 + 10950,08 = \\ = 160\,359,07 \text{ kW}$$

Kontrola celkového tepelného výkonu kotle

- celkový tepelný výkon kotle se nesmí lišit od výrobního tepla páry o víc jak 0,5 % (tato hodnota je tolerovaná při garančních zkouškách kotle)

$$\Delta Q = \frac{Q_V - Q_{\text{celk}}}{Q_V} \cdot 100 = \frac{160551 - 160\,359,07}{160\,359,07} \cdot 100 = 0,12 \% < 0,5 \% \quad (5.647)$$

kde: $Q_V = 160551 \text{ kW}$ – výrobní teplo páry dle rovnice (3.16)

5.9.14.2 Účinnost kotle

$$\eta_k^{\text{skut}} = \frac{Q_{\text{celk}} \cdot \left(1 - \frac{z_c}{100}\right)}{Q_p^p \cdot M_{pv}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (5.648)$$

kde: $Q_p^p \text{ [kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$ – teplo přivedené do kotle při předehřátí vzduchu na 87,5 °C

$$Q_p^p = Q_i^r + Q_{vzv} = 23000 + 620,69 = 23620,69 \text{ kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1} \quad (5.649)$$

$$\text{kde: } Q_{vzv} = \beta \cdot \Delta I_{vzmin} \cdot (1 - (0,35 - x_{\text{AH2}})) \text{ [kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}] \quad (5.650)$$

$$\text{kde: } \Delta I_{vzmin} = (I_{vzmin}^{87,5^\circ} - I_{vzmin}^{25^\circ}) \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.651)$$

kde: $I_{vzmin}^{87,5^\circ} = 699 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ – odečteno z Graf 3

$$\Delta I_{vzmin} = 699 - 202,9 = 496,1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q_{vzv} = 1,3 \cdot 496,1 \cdot (1 - (0,35 - 0,315)) = 620,69 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

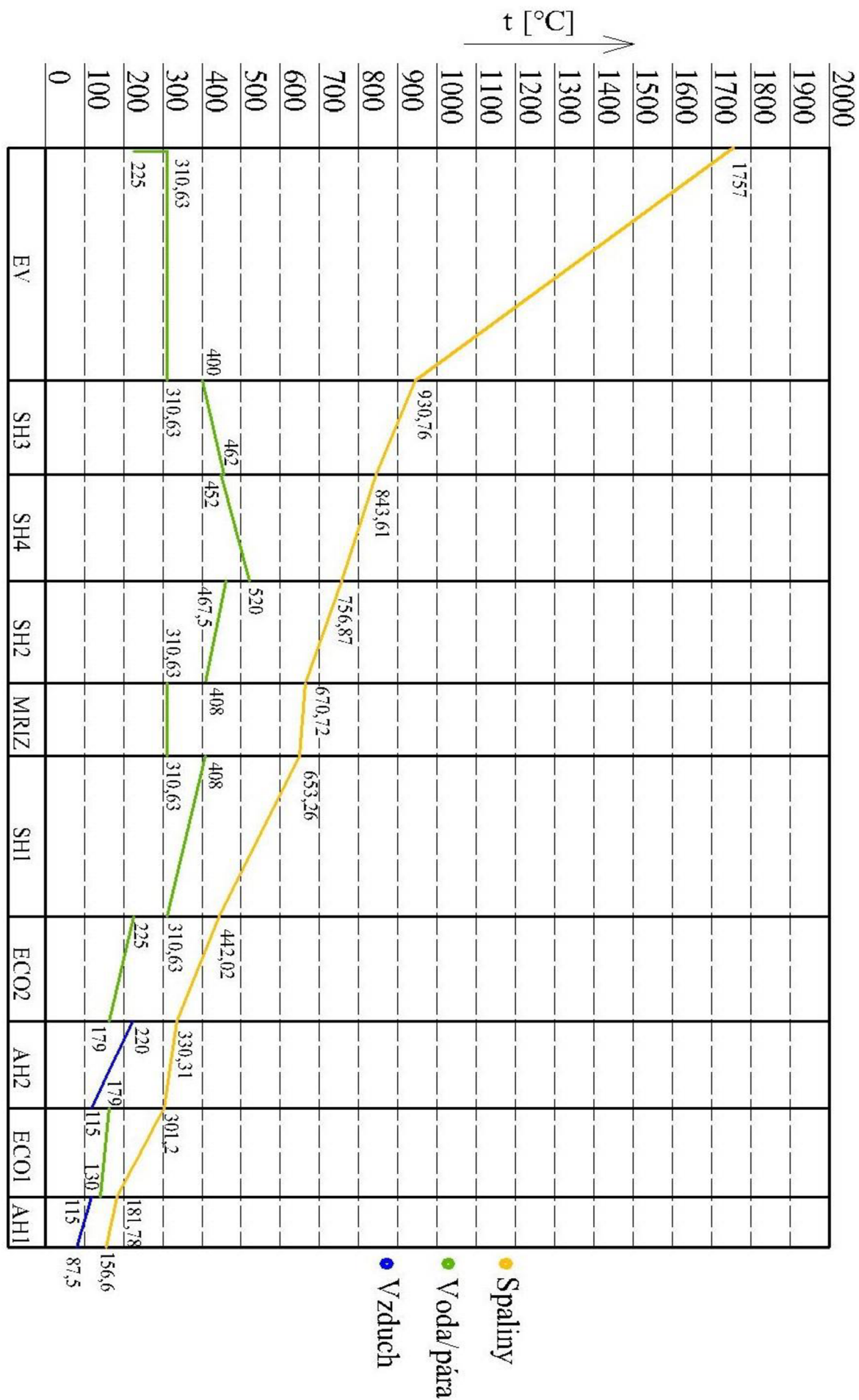
$$\eta_k^{\text{skut}} = \frac{160359,07 \cdot \left(1 - \frac{3,14}{100}\right)}{23620,69 \cdot 7,4} \cdot 100 = 88,94 \%$$

Kontrola účinnosti kotle

- u správného výpočtu by se účinnost vypočtena ze skutečných tepelných výkonů konvekčních ploch neměla lišit o víc jak 0,5 % od navrhnuté účinnosti určené nepřímou metodou

$$\Delta \eta = \eta_k - \eta_k^{\text{skut}} = 89,3 - 88,94 = 0,36 \% < 0,5 \% \quad (5.652)$$

5.9.15 Skutečný pilový diagram – Hnědé uhlí



Obrázek 45 Skutečný pilový diagram - Hnědé uhlí

6 Závěr

V první kapitole je dle zadaného složení paliva vypočteno potřebné množství vzduchu a množství vzniklých spalin pro spálení 1 kg paliva. Dále je z entalpií jednotlivých složek spalin určena entalpie spalin a minimálního množství vzduchu. Jelikož se v tahu kotle mění přebytek vzduchu, je entalpie spalin vypočtena i pro jednotlivé přebytky. Závislost entalpií minimálního množství vzduchu a spalin s jednotlivými přebytky vzduchu na teplotě jsou vyneseny do grafu k použití pro další výpočet.

V další kapitole je pomocí nepřímé metody vypočtena účinnost kotle pro jednotlivá paliva. Účinnost kotle při spalování hnědého uhlí je o 1,78 % nižší, což je způsobeno hlavně ztrátou mechanickým nedopalem kvůli vyššímu procentu popela v palivu. Dle vypočtených účinností je určeno skutečné množství spáleného paliva. Díky vyšší výhřevnosti je potřebné množství skutečně spáleného hnědého uhlí o $3,28 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ nižší od dřevní štěpky.

Ve výpočtu spalovací komory jsou uvažovány rozměry komory dané firemními podklady. Výstupem výpočtu je teplota spalin na konci ohniště a tepelné zatížení stěn ohniště pro jednotlivá paliva. Výstupní teplota spalin z ohniště je vstupní teplota pro první výhřevnou plochu (deskový přehřívák SH3). Hodnota tepelného zatížení stěn ohniště je v další kapitole použita pro výpočet tepelného výkonu předaného v prostoru ohniště do membránových stěn výparníku.

Na začátku výpočtu konvekčních ploch jsou navrženy vstupní a výstupní teploty teplotnosného média. Při návrhu těchto teplot je uvažováno s regulací vstřikem pomocí napájecí vody za přehřívákem SH2 a SH3. Regulace přehřáté páry vstříky zabezpečí požadované rozložení tepelného výkonu jednotlivých ploch a předchází poškození materiálu trubek posledních přehříváků při najíždění kotle. Dle návrhových vstupních a výstupních teplot teplotnosného média jsou vypočtena množství vstříků a návrhové tepelné výkony ploch. V další kapitole jsou dle návrhových tepelných výkonů ploch vypočteny vstupní a výstupní teploty spalin pro jednotlivé plochy. Pro hodnoty teplot teplotnosného média a spalin jsou zpracovány návrhové pilové diagramy.

Výpočet skutečného tepelného výkonu začíná návrhem geometrických rozměrů plochy. Pro tyto rozměry je vypočten součinitel prostupu tepla a teplotní spád dle vztahů z [1]. Vypočtený skutečný tepelný výkon se nesmí lišit od návrhového o víc jak 2 %, jinak by se musel výpočet opakovat s úpravou některých členů. Výpočet tepelného výkonu je zakončen určením výstupní teploty spalin z prostoru plochy. Tato teplota je uvažována jako vstupní pro další plochu. Na konci kotle musí teplota zohledňovat rosný bod spalin jednotlivých paliv. Proto musí být upravena návrhová vstupní teplota vzduchu do ohříváku (zvýšení výstupní teploty vzduchu z kaloriferu). Nízký obsah síry v dřevní štěpce dovoluje ochlazení spalin na teplotu nižší ($150,1 \text{ }^\circ\text{C}$), než u spalování hnědého uhlí ($156,6 \text{ }^\circ\text{C}$).

Celkový skutečný tepelný výkon kotle se u obou paliv neliší o víc jak 0,5 % od požadovaného tepelného výkonu. U navrženého kotle jsou tedy při spalování obou paliv zabezpečené požadované parametry a množství výstupní přehřáté páry při teplotě napájecí vody $130 \text{ }^\circ\text{C}$. Skutečné účinnosti se od účinností navržených neliší o víc jak 0,5 %. Pro skutečné teploty spalin a média v tahu kotle jsou zpracovány pilové diagramy.

Seznam použitých zdrojů

- [1] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet*. 4. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 4337939941
- [2] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků: podklady pro tepelný výpočet*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-010-2035-5
- [3] Firemní literatura Bilfinger Babcock CZ s.r.o.
- [4] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle a spalovací zařízení: vysokošk. učebnice pro strojní fakulty*. Praha: SNTL, 1975. Řada strojírenské literatury. ISBN 80-010-2035-5

Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Legenda	Jednotka
A	Šířka výhřevné plochy	[m]
a	Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu	[-]
a ₀	Stupeň černosti ohniště	[-]
AH	Ohřívák vzduchu	-
a _p	Efektivní stupeň černosti plamene	[-]
A _r	Obsah popela	[%]
a _{st}	Stupeň černosti povrchu stěn	[-]
b	Délka	[m]
B	Výška plochy	[m]
b	Hloubka tahu	[m]
B ₀	Boltzmannovo číslo	[-]
c	Šířka zúžení	[m]
C ₁	Příčná šířka desky SH3	[m]
C ₂	Podélná šířka desky SH3	[m]
C _d	Opravný koeficient na vnitřní průměr trubky	[-]
C _f	Měrná tepelná kapacita tuhých zbytků	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
CH ₂ O	Měrná tepelná kapacita vodní páry	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
Cl ^r	Obsah chloru	[%]
(CO ₂) _{max}	Maximální množství CO ₂ ve spalinách	[%]
C ^r	Obsah uhlíku	[%]
C _{vz,s}	Měrná tepelná kapacita suchého vzduchu	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
C _s	Opravný koeficient na uspořádání svazku	[-]
C _{sp}	Měrná tepelná kapacita spalin za kotlem	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
C _t	Opravný koeficient pro teplotu proudu a stěn	[-]
C _z	Opravný koeficient na počet podélných řad	[-]
d _{vz}	Obsah vody ve vzduchu	[g · kg _{vz} ⁻¹]
D	Vnější průměr	[m]
d	Vnitřní průměr	[m]
d _e	Ekvivalentní průměr	[m]
d _p	Střední průměr částicek popílku	[m]
d _s	Střední efektivní průměr popílku	[m]
D _ž	Průměr žeber	[m]
E	Součinitel efektivnosti žeber	[-]
ECO	Ohřívák vody	-
EV	Výparník	-
f	Součinitel podílu vodní páry	[-]
F _{in}	Vstupní průřez	[m ²]
F _{out}	Výstupní průřez	[m ²]
F _{sp}	Spalinový průřez	[m ²]
F _{str}	Střední průřez	[m ²]
h	Výška	[m]
H	Šířka (výška) tahu	[m]
H ^r	Obsah vodíku	[%]
H _{str}	Střední průřez	[m ²]
h _ž	Výška žeber	[m]

Označení	Legenda	Jednotka
i	Entalpie	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
i'	Entalpie syté kapaliny	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
i''	Entalpie syté páry	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$i_{\text{sp}}^{\text{in}}$	Vstupní entalpie spalin	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$i_{\text{sp}}^{\text{out}}$	Výstupní entalpie spalin	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
i^{in}	Vstupní entalpie média v trubkách	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
i_{nv}	Entalpie napájecí vody	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
i_o	Entalpie syté kapaliny v bubnu	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
i^{out}	Výstupní entalpie média v trubkách	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
i^{PP}	Entalpie páry na výstupu z kotle	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
I_{sp}	Entalpie spalin	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
I_{spmin}	Entalpie spalin při minimálním množství vzduchu	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
I_u	Užitečné teplo uvolněné v ohništi	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
I_{vzmin}	Entalpie minimálního množství vzduchu	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
k	Součinitel prostupu tepla	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
k_b	Boltzmannova konstanta	$[\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$
k_{celk}	Součinitel zeslabení sálání	$[\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$
k_k	Součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi	$[\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$
k_p	Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi	$[\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$
k_{sp}	Součinitel zeslabení sálání nespítivými třiatom. plyny	$[\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$
M_{IN1}	Množství vstříkované vody ve vstříku 1	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
M_{IN2}	Množství vstříkované vody ve vstříku 2	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
M_p	Množství paliva	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
M_{pp}	Množství páry	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
M_{pv}	Skutečně spálené palivo	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
MRIZ	Výparníková mříž	-
n_{desek}	Počet desek	[-]
N^r	Obsah dusíku	[%]
$n_{\text{řad}}$	Počet řad	[-]
n_{trubek}	Počet trubek	[-]
$n_{\text{ž}}$	Počet žeber	[-]
O_{spmin}^s	Minimální množství suchých spalin	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
O_{vzmin}^s	Minimální množství suchého vzduchu	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
O_{ar}	Objem vzácných plynů ve spalinách	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
O_{CO2}	Objem CO2 ve spalinách	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
O_{H2O}	Skutečný objem vodní páry ve spalinách	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
O_{H2Omin}	Minimální objem vodní páry ve spalinách	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
O_{N2}	Objem N2 ve spalinách	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
O_{O2min}	Minimální množství kyslíku	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
O^r	Obsah kyslíku	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
O_{SO2}	Objem SO2 ve spalinách	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
O_{sp}	Skutečné množství spalin	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
$\overline{O_{\text{sp}} \cdot c}$	Střední celkové měrné teplo spalin	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
O_{spmin}	Minimální množství vlhkých spalin	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
O_{vz}	Skutečné množství vzduchu	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$
O_{vzmin}	Minimální množství vlhkého vzduchu	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{paliva}}^{-1}]$

Označení	Legenda	Jednotka
P	Parametr P	[-]
p''	Absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti	[MPa]
p_b	Atmosférický tlak	[MPa]
p_c	Celkový absolutní tlak vzduchu	[MPa]
p_{in}	Vstupní tlak média	[MPa]
p_{out}	Výstupní tlak média	[MPa]
p_p	Tlak páry	[MPa]
Pr	Prandtlovo číslo	[-]
p_{sp}	Celkový parciální tlak tříatomových plynů	[MPa]
Q	Tepelný výkon	[W]
\bar{q}	Střední tepelné zatížení stěn ohniště	[W·m ⁻²]
Q_i^r	Výhřevnost	[kJ·kg ⁻¹]
Q_p^p	Teplo přivedené do kotle	[kJ · kg _{paliva} ⁻¹]
q_R	Střední měrný tepelný tok roštu	[kW · m ⁻²]
Q_{st}	Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn	[kJ · kg _{paliva} ⁻¹]
Q_s	Sálavé teplo z ohniště	[kW]
Q_{sp}	Tepelný výkon předaný spaliny	[kW]
q_{sv}	Tepelný tok vycházející výstupním průřezem ohniště	[kW · m ⁻²]
Q_v	Výrobní teplo páry	[kW]
q_v	Objemové tepelné zatížení ohniště	[kW · m ⁻³]
Q_{vz}	Teplo přivedené do kotle vzduchem	[kJ · kg _{paliva} ⁻¹]
Q_{vzv}	Teplo přivedené ohřátím vzduchu vnějším zdrojem	[kJ · kg _{paliva} ⁻¹]
R	Parametr R	[-]
r_{RO2}, r_{sp}	Objemová část tříatomových plynů	[-]
s	Účinná tloušťka sálavé vsrty	[m]
S	Velikost výhřevné plochy	[m ²]
s_1	Příčná rozteč	[m]
S_{1m}	Plocha 1 m trubky	[m ²]
S_2	Plocha výstupního otvoru ohniště	[m ²]
s_2	Podélná rozteč	[m]
S_D	Plocha vlezového otvoru ohniště	[m ²]
SH	Přehřívák	-
S_h	Plocha volné části trubky bez žeber	[m ²]
S^r	Obsah síry	[%]
S_R	Plocha roštu	[m ²]
S_{ST}	Povrch stěn ohniště	[m ²]
$S_{ús}$	Aktivní plocha stěn pro převzetí tepla	[m ²]
$s_ž$	Rozteč žeber	[m]
$S_ž$	Plocha žeber	[m ²]
t	Teplota	[° C]
T	Teplota	[K]
t_{in}^{sp}	Vstupní teplota spalín	[° C]
t_{out}^{sp}	Výstupní teplota spalín	[° C]
t_{str}^{sp}	Střední teplota spalín	[° C]
t_o	Teplota spalín na konci ohniště	[° C]
t_a	Adiabatická teplota plamene	[° C]
t_r	Teplota tuhých zbytků pod roštem	[° C]

Označení	Legenda	Jednotka
t_{in}	Vstupní teplota média v trubkách	[° C]
t_{out}	Výstupní teplota média v trubkách	[° C]
t_p	Teplota páry	[° C]
t_z	Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách	[° C]
V_0	Aktivní objem ohniště	[m ³]
V_{sp}	Průtok spalin	[m ³ ·s ⁻¹]
W_{ξ}^r	Obsah celkové vody	[%]
W_p	Rychlost páry	[m·s ⁻¹]
W_{sp}	Rychlost spalin	[m·s ⁻¹]
x	Výška zúžení	[m]
$X_{25^{\circ}C}$	Množství vzduchu o teplotě 25°C	[-]
X_{AH2}	Množství vzduchu přes ohřívák AH2	[-]
X_p	Procento popela v úletu	[%]
X_{st}	Úhlový součinitel	[-]
y_h	Součinitel tepelné nerovnomernosti stěn	[-]
z_c	Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích	[%]
z_{co}	Ztráta hořlavinou ve spalinách	[%]
z_{cs}	Ztráta mechan. nedopalem ve škváře nebo v strusce	[%]
$z_{cú}$	Ztráta mechanickým nedopalem v úletu	[%]
z_f	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	[%]
z_{fs}	Ztráta fyz. tep. tuhých zbytků ve škváře nebo strusce	[%]
$z_{fú}$	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v úletu	[%]
z_k	Ztráta citelným teplem spalin	[%]
z_{so}	Ztráta sdílením tepla do okolí	[%]
α	Přebytek vzduchu	[-]
α_0	Přebytek vzduchu za spalovací komorou	[-]
α_1	Součinitel přestupu tepla na straně spalin	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_{1r}	Redukovaný součinitel přestupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_2	Součinitel přestupu tepla na straně média	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_k	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_N	Nomogramový součinitel přestupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_s	Součinitel přestupu tepla sáláním	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
β	Přebytek vzduchu v ohříváku	[-]
γ	Součinitel kinematické viskozity	[m ² ·s ⁻¹]
δ	Součinitel podílu tepel. toku výst. průřezem a do stěn	[-]
Δp	Podtlak v ohništi	[MPa]
Δp_o	Podtlak v ohništi	[MPa]
Δp_z	Tlaková ztráta	[MPa]
Δt	Teplotní spád	[° C]
Δt_v	Větší teplotní spád na konci plochy	[° C]
Δt_m	Menší teplotní spád na konci plochy	[° C]
δ_z	Tloušťka žeber	[m]
$\Delta\alpha_0$	Přisávání falešného vzduchu v ohništi	[-]
ε	Součinitel zanešení	[-]
η_k	Tepelná účinnost kotle	[%]
κ_1	Součinitel závislý na druhu paliva	[-]
κ_2	Součinitel závislý na způsobu spalování	[-]
λ	Součinitel tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]

Označení	Legenda	Jednotka
λ_z	Součinitel tepelné vodivosti žeber	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
μ	Hmotová koncentrace popílku ve spalinách	$[g \cdot m^{-3}]$
v	Měrný objem	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$
ξ	Součinitel využití ploch	[-]
σ_1	Poměrná příčná rozteč	[m]
σ_2	Poměrná podélná rozteč	[m]
φ	Relativní vlhkost vzduchu	[%]
ϕ	Součinitel uchování tepla	[-]
ϕ_{0-sv}	Úhlový součinitel ohniště	[-]
ψ_{kr}	Součinitel zohledňující křížové proudění	[-]
ψ	Střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn	[-]
ψ_{sv}	Součinitel tepelné efektivity svazku	[-]
ψ_z	Koef. char. nerovnoměrné rozdělení α_k po povrchu	[-]
ω	Součinitel omývání desek	[-]
ω_{CO}	Požadovaný maximální objem CO ve spalinách	[%]

Seznam příloh

Příloha A Výkresová dokumentace kotle