



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE

ROŠTOVÝ KOTEL NA SPALOVÁNÍ
BIOMASY - 88 T/H; 9,6 MPA; 520 °C
GRATE BIOMASS BOILER - 88 T/H; 9.6 MPA; 520 °C

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Josef Střecha

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Martin Lisý, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Josef Střecha
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Martin Lisý, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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

Roštový kotel na spalování biomasy - 88 t/h; 9,6 MPa; 520 °C

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracujte tepelný výpočet dle detailního zadání a rozměrový návrh kotle na spalování biomasy, který bude respektovat rosný bod podle obsahu síry v palivu. Biomasa je spalována na vibračním roštu moderní konstrukce. Množství vzduchu a umístění sekundárního vzduchu ve spalovací komoře je dáno dodavatelem roštu. Navrhněte provedení kotle s trubkovým ohřívákem vzduchu a popište regulaci teploty spalin za kotlem pomocí parního předehřátí vzduchu.

Cíle diplomové práce:

- Provést stechiometrický a tepelný výpočet kotle.
- Provést základní rozměrový návrh kotle.
- Nakreslit schéma bilance vstříků kotle.
- Stanovit dosaženou účinnost kotle.

Seznam literatury:

DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 9788001037577.

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 9788021447707.

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

ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. Parní kotle. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem roštového kotle na spalování biomasy. Jako hlavní body této práce jsou stechiometrický výpočet spalování, určení rosného bodu spalin, výpočet ztrát, které slouží k určení účinnosti kotle, rozměrový návrh a detailní tepelný výpočet teplosměnných ploch. V poslední kapitole práce je vyčíslena celková bilance a skutečná tepelná účinnost kotle.

Klíčová slova

roštový kotel, rosný bod, účinnost, biomasa, přehřívák, výparník, ekonomizér, ohřívák vzduchu

Abstract

This master's thesis deals with the design of stoker-fired boiler for combustion of biomass. The main points of work are stoichiometry calculation of combustion, determining the dew point of flue gas, calculation of losses, which ones serves for determination of boiler efficiency, dimension design and detail calculation of thermosetting surfaces. In the last chapter is numbered total balance and real thermal efficiency of boiler.

Key words

stoker-fired boiler, dew point, efficiency, biomass, super heater, evaporator, economizer, air heater

Bibliografická citace

STŘECHA, J. *Roštový kotel na spalování biomasy - 88 t/h; 9,6 MPa; 520 °C*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 141 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně na základě svých znalostí, odborných konzultací, s použitím odborné literatury a dalších podkladů, které jsou uvedeny v seznamu zdrojů.

Datum

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Mírku Hudečkovi, CSc. za cenné rady při vypracovávání této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Lisému, PhD. za vedení při tvorbě této práce a v neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za podporu při studiu.

Obsah

1	Úvod	19
2	Stechiometrické výpočty	20
2.1	Teoretické množství spalovacího vzduchu a vniklých spalin	20
2.2	Skutečné množství spalovacího vzduchu a vzniklých spalin	22
2.3	Entalpie vzduchu a vzniklých spalin	23
3	Tepelná bilance kotle.....	25
3.1	Teplo přivedené do kotle	25
3.2	Ztráty kotle a tepelná účinnost	27
3.3	Výrobní teplo páry.....	29
3.4	Množství paliva	29
3.5	Rosný bod spalin	29
3.5.1	Rosný bod spalin – první varianta.....	29
3.5.2	Rosný bod spalin – druhá varianta.....	30
4	Návrh spalovací komory	32
4.1	Rozměrový výpočet spalovací komory	32
4.2	Tepelný výpočet spalovací komory.....	33
5	Návrh teplosměnných ploch.....	38
5.1	Rozvržení jednotlivých teplosměnných ploch a jejich tlakové ztráty	38
5.2	Bilance ze strany média.....	39
5.2.1	Přehřívák IV	39
5.2.2	Přehřívák III a bilance vstříku 2.....	39
5.2.3	Přehřívák II a bilance vstříku 1	40
5.2.4	Přehřívák I.....	41
5.2.5	Výparník.....	42
5.2.6	Ekonomizér III	42
5.2.7	Ekonomizér I,II	42
5.2.8	Celkový parovodní výkon	43
5.2.9	Ohřívák vzduchu IV	44
5.2.10	Ohřívák vzduchu I,II,III	44
5.3	Bilance ze strany spalin	45
6	Tepelný výpočet	48
6.1	Fyzikální vlastnosti spalin	48
6.2	Fyzikální vlastnosti vzduchu	48
6.3	Přehřívák III	49

6.4	Přehřívák PIIIA.....	50
6.4.1	Návrh geometrie	50
6.4.2	Parametry spalin	51
6.4.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	52
6.4.4	Parametry média	52
6.4.5	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry	53
6.4.6	Sálavý výkon z ohniště	53
6.4.7	Součinitel přestupu tepla sáláním	55
6.4.8	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	56
6.4.9	Výkon předaný přehřívákem PIIIA	56
6.4.10	Bilance přehříváku PIIIA.....	57
6.5	Doplňkové plochy v místě přehříváku PIIIA.....	58
6.5.1	Geometrie	58
6.5.2	Parametry spalin	59
6.5.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	59
6.5.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	60
6.5.5	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	61
6.5.6	Výkon předaný doplňkovými plochami	61
6.6	Přehřívák PIIIB	62
6.6.1	Návrh geometrie	62
6.6.2	Parametry spalin	63
6.6.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	64
6.6.4	Parametry média	64
6.6.5	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry	65
6.6.6	Sálavý výkon z ohniště	65
6.6.7	Součinitel přestupu tepla sáláním	67
6.6.8	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	67
6.6.9	Výkon předaný přehřívákem PIIIB	67
6.6.10	Bilance přehříváku PIIIB.....	68
6.7	Doplňkové plochy v místě přehříváku PIIIB	69
6.7.1	Geometrie	69
6.7.2	Parametry spalin	70
6.7.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	70
6.7.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	72
6.7.5	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	72

6.7.6	Výkon předaný doplňkovými plochami.....	72
6.8	Přehřívák PIV.....	73
6.8.1	Návrh geometrie.....	73
6.8.2	Parametry spalin.....	74
6.8.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	75
6.8.4	Parametry média	75
6.8.5	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry	76
6.8.6	Sálavé teplo	76
6.8.7	Součinitel přestupu tepla sáláním	76
6.8.8	Součinitel přestupu tepla na straně spalin	78
6.8.9	Výkon předaný přehřívákem PIV	78
6.8.10	Bilance přehříváku PIV.....	79
6.9	Doplňkové plochy v místě přehříváku PIV.....	80
6.9.1	Geometrie.....	80
6.9.2	Parametry spalin.....	80
6.9.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	81
6.9.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	81
6.9.5	Součinitel přestupu tepla sáláním	82
6.9.6	Součinitel přestupu tepla na straně spalin	82
6.9.7	Výkon předaný doplňkovými plochami.....	82
6.10	Přehřívák PII.....	84
6.10.1	Návrh geometrie.....	84
6.10.2	Parametry spalin.....	84
6.10.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	85
6.10.4	Parametry média	86
6.10.5	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry	86
6.10.6	Součinitel přestupu tepla sáláním	87
6.10.7	Součinitel přestupu tepla na straně spalin	88
6.10.8	Výkon předaný přehřívákem PII.....	88
6.10.9	Bilance přehříváku PII	89
6.11	Doplňkové plochy v místě přehříváku PII	90
6.11.1	Geometrie.....	90
6.11.2	Parametry spalin.....	90
6.11.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	91
6.11.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	91

6.11.5	Součinitel přestupu tepla sáláním	92
6.11.6	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	92
6.11.7	Výkon předaný doplňkovými plochami	92
6.12	Kotlová mříž	94
6.12.1	Návrh geometrie	94
6.12.2	Parametry spalin	94
6.12.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	95
6.12.4	Součinitel přestupu tepla sáláním	96
6.12.5	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	97
6.12.6	Výkon předaný kotlovou mříží.....	97
6.13	Přehřívák PI	99
6.13.1	Návrh geometrie	99
6.13.2	Parametry spalin	99
6.13.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	100
6.13.4	Parametry média	101
6.13.5	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry	101
6.13.6	Součinitel přestupu tepla sáláním	101
6.13.7	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	103
6.13.8	Výkon předaný přehřívákem PI.....	103
6.13.9	Bilance přehříváku PI	104
6.14	Ekonomizér EKOIII.....	105
6.14.1	Návrh geometrie	105
6.14.2	Parametry spalin	105
6.14.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	106
6.14.4	Parametry média	107
6.14.5	Součinitel přestupu tepla sáláním	107
6.14.6	Součinitel přestupu tepla na straně spalin.....	109
6.14.7	Výkon předaný ekonomizérem EKOIII	109
6.14.8	Bilance ekonomizéru EKOIII.....	110
6.15	Ohřívák vzduchu OVZIV	111
6.15.1	Návrh geometrie	111
6.15.2	Parametry spalin	111
6.15.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin.....	112
6.15.4	Parametry media.....	113
6.15.5	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu	113

6.15.6	Součinitel přestupu tepla sáláním	114
6.15.7	Součinitel přestupu tepla na straně spalin	116
6.15.8	Výkon předaný ohřívákem vzduchu OVZIV	116
6.15.9	Bilance ohříváku vzduchu OVZIV	117
6.16	Ekonomizér EKOI,II	118
6.16.1	Návrh geometrie.....	118
6.16.2	Parametry spalin.....	119
6.16.3	Součinitel přestupu tepla na straně spalin	120
6.16.4	Parametry média	121
6.16.5	Výkon předaný ekonomizérem EKOI,II	121
6.16.6	Bilance ekonomizéru EKOI,II	122
6.17	Ohřívák vzduchu OVZI,II,III	123
6.17.1	Návrh geometrie.....	123
6.17.2	Parametry spalin.....	123
6.17.3	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin	124
6.17.4	Parametry vzduchu.....	125
6.17.5	Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu	125
6.17.6	Součinitel přestupu tepla na straně spalin	126
6.17.7	Výkon předaný ohřívákem vzduchu OVZI,II,III	126
6.17.8	Bilance ohříváku vzduchu OVZI,II,III	127
6.18	Výparník.....	128
6.18.1	Tepelný výkon výparníku	128
6.18.2	Bilance výparníku	128
7	Celková bilance kotle.....	129
7.1	Skutečná tepelná účinnost kotle	129
7.2	Celkový výkon z tepelného výpočtu	129
7.3	Bilance kotle.....	130
	Závěr	131
	Seznam použitých zdrojů	132
	Seznam použitých zkratk a symbolů	133
	Seznam příloh	141

1 Úvod

Energetika se v dnešní době zabývá hledáním náhrad za fosilní paliva. Biomasa je jednou z možností, jak získat ekologičtější energii. Výhoda energetického zpracování biomasy je, že při spalování biomasy vznikají nízké emise oxidů síry, na rozdíl od spalování tuhých fosilních paliv. Dále je to hledisko produkce množství oxidu uhličitého, kterého vzniká při spalování přibližně stejně, jako ho energetické plodiny během růstu zpracovávají při fotosyntéze. Jedno z důležitých omezení je však množství získané biomasy pro energetické využití.

Kotle na spalování biomasy mají budoucnost v nahrazování energetických bloků využívajících tuhá fosilní paliva, jak už elektrárenských či teplárenských. Jedno z omezení je výkon takovýchto zařízení. Kotel o parním výkonu 88 t/h navrhovaný v této práci patří již mezi větší zdroje využívající tento druh paliva. Pro kotle těchto rozměrů musí být zajištěn dostatečný přísun paliva, které má většinou charakter odpadu ze dřevozpracujícího průmyslu nebo cíleně pěstované biomasy. A jak už je zmíněno výše, zdroje paliva jsou omezené. Není možné získávat z přírody takové množství biomasy jako uhlí, a proto největší kotle na spalování biomasy u nás dosahují parních výkonů jen v desítkách t/h. To znamená, že biomasa je jednou z cest jak nahradit fosilní zdroje středních a malých výkonů, jako jsou například městské teplárny či výtopny. Snaha o budování takovýchto zdrojů je podporována i státem v podobě tzv. zelených bonusů, kdy je cenově zvýhodněn prodej energie z obnovitelných zdrojů.

Zadané hodnoty

Palivo je čistá dřevní štěpka

výhřevnost	$Q_i^r = 10800 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
obsah celkové vody	$W_t^r = 40 \%$
obsah popela	$A^r = 2 \%$

Složení hořlaviny surového paliva (hmotnostní):

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

Teplota vzduchu okolí	25 °C
Teplota vzduchu před spalínovým ohřívákem vzduchu	40 °C
Teplota napájecí vody	154 °C
Teplota výstupní páry	520 °C
Tlak výstupní páry	9,6 MPa
Parní výkon kotle	88 t/hod

2 Stechiometrické výpočty

Cílem stochiometrických výpočtů je určení množství objemu vzduchu potřebného pro spalování jednotkového množství paliva a objemu spalin, které při spalování vznikají. Vychází se při tom z chemických reakčních rovnic. Při stochiometrickém výpočtu se vychází ze složení paliva v hmotnostních podílech pro původní stav. Vypočtené objemy jsou označovány jako minimální a obvykle se vyjadřují v Nm³ (normálních metrech krychlových pro T_n = 273 K, p_n = 101,325 kPa) na kg spáleného paliva [1].

Tabulka 2.1 Složení paliva

Složení hořlaviny surového paliva		Procentuální podíl
obsah uhlíku	C ^r	31,72
obsah vodíku	H ^r	3,42
obsah dusíku	N ^r	0,23
obsah kyslíku	O ^r	22,62
obsah síry	S ^r	0,009

2.1 Teoretické množství spalovacího vzduchu a vniklých spalin

Minimální objem kyslíku pro spálení 1 kg paliva

$$O_{O_{2min}} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (2.1)$$

$$O_{O_{2min}} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{31,72}{12,01} + \frac{3,42}{4,032} + \frac{0,23}{32,06} - \frac{22,62}{32} \right) = 0,62306 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Objemové složení suchého vzduchu [1]:

kyslík	21 %
dusík	78,05 %
argon	0,92 % (včetně vzácných plynů)
oxid uhličitý	0,03 %

Minimální objem suchého vzduchu

$$O_{vzmin}^S = \frac{100}{21} \cdot O_{O_{2min}} \quad (2.2)$$

$$O_{vzmin}^S = \frac{100}{21} \cdot 0,62306 = 2,96694 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Objem vodní páry na 1 Nm³ suchého vzduchu

$$V_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p''}{p_c - \varphi \cdot p''} \quad (2.3)$$
$$V_{H_2O} = 0,7 \cdot \frac{3700}{99590 - 0,7 \cdot 3170} = 0,02279$$

kde φ – je relativní vlhkost vzduchu, dle odborné konzultace voleno 0,7 [-]
 p'' – je tlak nasycených par při dané teplotě 25 °C, odečteno z [2] [Pa]
 p_c – je absolutní tlak vlhkého vzduchu, dle odborné konzultace voleno 99590 Pa

Součinitel f

$$f = 1 + \varphi \cdot \frac{p''}{p_c - \varphi \cdot p''} \quad (2.4)$$
$$f = 1 + 0,7 \cdot \frac{3170}{99590 - 0,7 \cdot 3170} = 1,02279$$

Minimální objem vlhkého vzduchu

$$O_{vzmin} = f \cdot O_{vzmin}^S \quad (2.5)$$
$$O_{vzmin} = 1,02279 \cdot 2,96694 = 3,03456 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Minimální objem suchých spalin

$$O_{spmin}^S = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad (2.6)$$

Objem CO₂ ve spalinách

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{vzmin}^S \quad (2.7)$$
$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{31,72}{12,01} + 0,0003 \cdot 2,96694 = 0,58881 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Objem SO₂ ve spalinách

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S^r}{32,06} \quad (2.8)$$
$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,009}{32,06} = 0,00006 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Objem N₂ ve spalinách

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{vzmin}^S \quad (2.9)$$
$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{0,23}{28,016} + 0,7805 \cdot 2,96694 = 2,31754 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Objem Ar ve spalinách

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{vzmin}^S \quad (2.10)$$
$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot 2,96694 = 0,02730 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Minimální objem suchých spalin

$$O_{spmin}^S = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar}$$

$$O_{spmin}^S = 0,59681 + 0,00006 + 2,31704 + 0,02730 = 2,93370 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2.11)$$

Maximální množství CO₂ ve spalinách

$$(CO_2)_{max} = \frac{O_{CO_2}}{O_{spmin}^S} \cdot 100$$

$$(CO_2)_{max} = \frac{0,58881}{2,93370} \cdot 100 = 20,07 \% \quad (2.12)$$

Minimální objem vodní páry

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

$$O_{H_2Omin} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{0,0342}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{0,4}{18,016} + (1,02279 - 1) \cdot 2,96694$$

$$O_{H_2Omin} = 0,94495 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2.13)$$

Minimální objem vlhkých spalin

$$O_{spmin} = O_{spmin}^S + O_{H_2Omin}$$

$$O_{spmin} = 2,93370 + 0,94495 = 3,86603 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2.14)$$

2.2 Skutečné množství spalovacího vzduchu a vzniklých spalin

Všechny předchozí výpočty byly vztaženy ke stechiometrickému množství spalovacího vzduchu (ideální chemické reakce). Jelikož však spalování neprobíhá ideálně, je potřeba do spalovací komory zavést nadstechiometrické množství vzduchu, aby byla umožněna spalování paliva s co nejvyšší účinností. Po odborné konzultaci je zvolen přebytek vzduchu v přívodu do spalovací komory $\alpha = 1,274$.

Skutečné množství vzduchu

$$O_{vz} = \alpha \cdot O_{vzmin}$$

$$O_{vz} = 1,274 \cdot 3,03456 = 3,86667 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2.15)$$

Skutečné množství spalin

$$O_{sp} = O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}$$

$$O_{sp} = 3,86603 + (1,274 - 1) \cdot 3,03456 = 4,71012 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2.16)$$

Zvolené přebytky vzduchu

Navrhovaný kotel je volený jako podtlakový. Tím pádem při cestě spalin ze spalovací komory je netěsnostmi kotle nasáván falešný vzduch. Tento falešný vzduch postupně zvyšuje počáteční přebytek. Podle odborné konzultace byly navrženy hodnoty přebytku vzduchu podle následující tabulky 2.2.

Tabulka 2.2 Jednotlivé přebytky vzduchu

Místo	α
Přívod do spalovací komory	1,274
Za spalovací komorou	1,324
Za kotlem	1,356

2.3 Entalpie vzduchu a vzniklých spalin

Pro stanovení entalpie spalin je zapotřebí znát, jak entalpie jednotlivých složek spalin za daných teplot, tak i jejich objemové zastoupení. Jak v případě spalin, tak i při výpočtu entalpie vzduchu je třeba brát v úvahu vlhkost přiváděného spalovacího vzduchu. U entalpie spalin pak hraje roli i vlhkost paliva.

Tabulka 2.3 Entalpie vzduchu a produktů hoření pro jednotlivé teploty [2]

t [°C]	CO ₂ [kJ/Nm ³]	SO ₂ [kJ/Nm ³]	N ₂ [kJ/Nm ³]	Ar [kJ/Nm ³]	H ₂ O [kJ/Nm ³]	Suchý vzduch [kJ/Nm ³]	O ₂ [kJ/Nm ³]	Popílek [kJ/kg]
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	41,6	46,8	32,5	23,3	39,1	32,5	32,8	20,2
100	170,0	189,0	130,0	93,0	150,0	130,0	132,0	80,8
200	357,0	392,0	260,0	186,0	304,0	261,4	267,0	169,0
300	559,0	610,0	392,0	278,8	463,0	395,1	407,0	264,0
400	772,0	836,0	527,0	372,0	626,0	531,6	551,0	360,0
500	994,0	1070,0	666,0	465,0	795,0	671,5	699,0	458,0
600	1225,0	1310,0	804,0	557,0	969,0	813,6	850,0	560,0
700	1462,0	1550,0	948,0	650,0	1149,0	959,7	1004,0	662,0
800	1705,0	1800,0	1094,0	743,0	1334,0	1107,2	1160,0	767,0
900	1952,0	2050,0	1242,0	834,0	1526,0	1258,2	1318,0	874,0
1000	2204,0	2305,0	1392,0	928,0	1723,0	1410,0	1477,0	984,0
1500	3504,0	3590,0	2166,0	1390,0	2779,0	2193,9	2294,0	1758,0
1600	3796,0	3838,0	2325,0	1577,0	3002,0	2403,0	2465,0	2061,0

Entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg paliva

$$I_{sp} = I_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot I_{vzmin} + I_p \quad (2.17)$$

Entalpie spalin při $\alpha = 1$

$$I_{spmin} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2Omin} \cdot i_{H_2O} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad (2.18)$$

Entalpie vlhkého vzduchu

$$I_{vzmin} = O_{vzmin}^s \cdot i_{vz}^s + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O} \quad (2.19)$$

Entalpie popílku ve spalinách I_p

Pro započítání entalpie popílku do výsledné entalpie spalin musí být splněná nerovnost

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_I^r}{41,8 \cdot x_p}$$

$$2 > \frac{6 \cdot 10800}{41,8 \cdot 70} \quad (2.20)$$

$2 > 22,1462$ nerovnost neplatí, tudíž entalpie popílku se do entalpie spalin nezapočítá

Příklad výpočtu entalpie vlhkého vzduchu pro teplotu 200 °C

$$I_{vzmin} = O_{vzmin}^{200} \cdot i_{vz}^{200} + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^{200}$$

$$I_{vzmin} = 2,96694 \cdot 266,2 + 0,06761 \cdot 304,5 = 810,39 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2.21)$$

Příklad výpočtu spalin pro $\alpha = 1$ a teplotu 200 °C

$$I_{spmin} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^{200} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^{200} + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^{200} + O_{H_2Omin} \cdot i_{H_2O}^{200} + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^{200}$$

$$I_{spmin} = 0,58881 \cdot 357,5 + 0,00006 \cdot 394,1 + 2,31754 \cdot 259,9 + 0,94495 \cdot 304,5 + 0,02730 \cdot 186$$

$$I_{spmin} = 1105,13 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2.22)$$

Příklad výpočtu spalin pro přebytek vzduchu $\alpha = 1,274$ a teplotu 200 °C

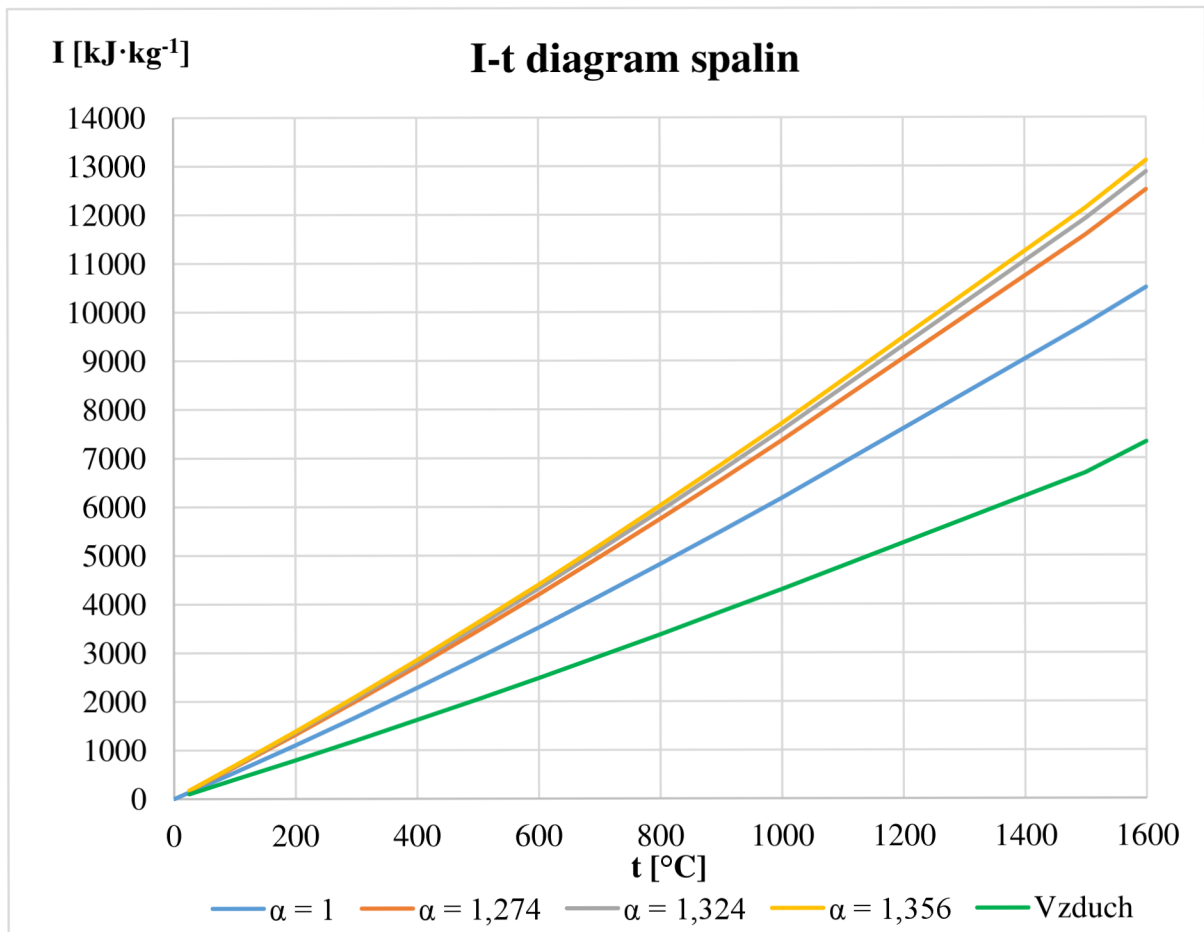
$$I_{sp} = I_{spmin}^{200} + (\alpha - 1) \cdot I_{vzmin}^{200}$$

$$I_{sp} = 1108,3 + (1,274 - 1) \cdot 796,11 = 1323,26 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2.23)$$

Tabulka 2.4 Entalpie spalin pro zvolené teploty a přebytky vzduchu

t °C	I_{spmin} [kJ/kg]	I_{vzmin} [kJ/kg]	$I_{sp} = I_{spmin} + (\alpha-1) \cdot I_{vzmin} + I_p$ [kJ/kg]		
			1,274	1,324	1,356
0	0	0	0	0	0
25	137,48	99,28	164,68	169,65	172,83
100	545,67	395,84	654,13	673,92	686,59
200	1 105,13	796,11	1 323,26	1 363,07	1 388,55
300	1 682,78	1203,54	2 012,55	2 072,73	2 111,24
400	2 277,65	1619,55	2 721,40	2 802,38	2 854,21
500	2 892,75	2046,06	3 453,37	3 555,67	3 621,14
600	3 515,53	2479,42	4 194,89	4 318,86	4 398,20
700	4 161,45	2925,06	4 962,91	5 109,17	5 202,77
800	4 820,26	3375,20	5 745,06	5 913,82	6 021,83
900	5 492,62	3836,19	6 543,73	6 735,54	6 858,30
1000	6 177,36	4299,89	7 355,53	7 570,53	7 708,12
1500	9 747,14	6697,08	11 582,14	11 917,00	12 131,30
1600	10 503,41	7332,54	12 512,52	12 879,15	13 113,79

I-t diagram spalín



Obrázek 2.1 I-t diagram spalín.

3 Tepelná bilance kotle

Kapitola tepelné bilance kotle obsahuje výpočet skutečného tepla přiváděného do kotle ve formě paliva, dále pak všechny druhy ztrát kotle. Tyto výpočty však stanovují hlavně celkovou účinnost kotle, množství vyrobené páry a potřebné množství přiváděného paliva. V poslední části této kapitoly je ověření rosného bodu spalín.

3.1 Teplo přivedené do kotle

$$Q_p^p = Q_i^r + i_p + Q_{vzd} \quad (3.1)$$

kde Q_i^r – je výhřevnost paliva [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]

i_p – je fyzické teplo paliva [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]

Q_{vzd} – je teplo přehřátého přivedeného vzduchu [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]

Výhřevnost paliva

Výhřevnost paliva je dána ze zadání

$$Q_i^r = 10800 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.2)$$

Fyzické teplo paliva

$$i_p = c_p \cdot t_p \quad (3.3)$$

Fyzické teplo paliva se uvažuje, jen pokud je palivo přehříváno mimo kotel nebo, když obsahuje větší množství vody a je tak splněna nerovnost [3].

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

$$40 \geq \frac{10800}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \quad (3.4)$$

40 ≥ 17,18377 nerovnost je splněna, takže fyzické teplo paliva bude započítáno

Měrné teplo paliva

$$c_p = c_w \cdot \frac{W_t^r}{100} + c_{su} \cdot \frac{100 - W_t^r}{100} \quad (3.5)$$

kde c_{su} – je měrné teplo sušiny, po odborné konzultaci zvoleno

$$c_{su} = 1,13 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

c_w – je měrné teplo vody $c_w = 4,19 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$$c_p = 4,19 \cdot \frac{40}{100} + 1,13 \cdot \frac{100 - 40}{100} = 2,354 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Fyzické teplo paliva

$$i_p = c_p \cdot t_p = 2,354 \cdot 25 = 58,85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Teplo přehřátého přivedeného vzduchu

$$Q_{vzd} = \alpha \cdot (I_{vz}^{40} - I_{vz}^{25}) \quad (3.6)$$

kde I_{vz40} – je entalpie přehřátého vzduchu o teplotě 40 °C

I_{vz25} – je entalpie okolního vzduchu o teplotě 25 °C

α – je přebytek vzduchu na vstupu do kotle [-]

Entalpie přehřátého vzduchu o teplotě 40 °C

$$I_{vz}^{40} = (40 - 25) \cdot \frac{I_{vz}^{100} - I_{vz}^{25}}{75} + I_{vz25} = 15 \cdot \frac{395,84 - 99,28}{75} + 99,28$$

$$I_{vz}^{40} = 158,59 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.7)$$

Teplo přehřátého přivedeného vzduchu

$$Q_{vzd} = \alpha \cdot (I_{vz}^{40} - I_{vz}^{25}) = 1,274 \cdot (158,59 - 99,28) = 75,57 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Teplo přivedené do kotle

$$Q_p^p = 10800 + 58,85 + 75,57 = 10934,42 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

3.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

Tepelná účinnost kotle se dá určit dvěma způsoby, přímou metodou nebo metodou nepřímou. Při početním určení tepelné účinnosti kotle je možné využít obě tyto metody. Avšak v technické praxi je zjištění tepelné účinnosti kotle přímou metodou problematické, protože je při jejím výpočtu zapotřebí znát hmotnostní tok paliva do kotle, který není jednoduché zjistit. Toto je jeden z důvodů, proč se využívá spíše nepřímá metoda, která vychází ze ztrát.

$$\eta_k = 100 - \sum Z = 100 - Z_c - Z_{co} - Z_f - Z_{sv} - Z_k - Z_n \quad (3.8)$$

kde η_k – je tepelná účinnost kotle [%]

Z_c – je ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (ztráta mechanickým nedopalem) [%]

Z_{co} – je ztráta hořlavinou ve spalínách (ztráta chemickým nedopalem) [%]

Z_f – je ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků [%]

Z_{sv} – je ztráta sáláním do okolí [%]

Z_k – je ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta) [%]

Z_n – je nepočitatelná ztráta [%]

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

$$Z_c = \left(\frac{C_{p-s}}{100 - C_{p-s}} \cdot \frac{X_{p-s}}{100} + \frac{C_{pop}}{100 - C_p} \cdot \frac{X_p}{100} \right) \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot Q_{ci} \quad (3.9)$$

kde C_{p-s} – je procento hořlaviny v propadu a škváře, podle odborné konzultace se tyto dva tuhé zbytky berou dohromady z důvodu odvodu do stejné svodky, podle odborné konzultace voleno 46 %

X_{p-s} – je procentuální zastoupení propadu a škváry v tuhých zbytcích, podle odborné konzultace voleno 30 %

C_{pop} – je procento hořlaviny v popílku, podle odborné konzultace voleno 41 %

X_p – je procentuální zastoupení popílku, podle odborné konzultace voleno 70 %

Q_{ci} – je výhřevnost uhlíku 32600 kJ·kg⁻¹

$$Z_c = \left(\frac{46}{100 - 46} \cdot \frac{30}{100} + \frac{41}{100 - 41} \cdot \frac{70}{100} \right) \cdot \frac{2}{10934,32} \cdot 32600 = 4,4244 \%$$

Ztráta hořlavinou ve spalínách

$$Z_{co} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{spmin}^S \cdot 100}{(21 - O_{2ref}) \cdot Q_p^p} \quad (3.10)$$

kde $mgCO$ – je emisní limit CO ve spalínách, podle odborné konzultace voleno 200 mg·Nm⁻³

O_{2ref} – je obsah kyslíku pro referenční stav spalin, podle odborné konzultace voleno 6 %

$$Z_{co} = \frac{0,2116 \cdot 200 \cdot 2,93370 \cdot 100}{(21 - 6) \cdot 10934,32} = 0,0757 \%$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = \left(\frac{X_{p-s}}{100 - C_{p-s}} \right) \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_{p-s} \cdot t_{p-s} + \left(\frac{X_p}{100 - C_p} \right) \cdot \frac{A^r}{Q_p^p} \cdot c_{pop} \cdot t_{pop} \quad (3.11)$$

kde t_{p-s} – je teplota škváry a propadu, podle odborné konzultace voleno 250 °C

c_{p-s} – je měrné teplo škváry a propadu, získané podle teploty uvedené výše z [1], hodnota je 0,8625 kJ·kg⁻¹·K⁻¹

t_{pop} – je teplota popílku, která je volena podle odborné konzultace 191 °C, stejně jako teplota odchozích spalin

c_{pop} – je měrné teplo popílku, získané podle teploty uvedené výše z [1], hodnota je 0,8426 kJ·kg⁻¹·K⁻¹

$$Z_f = \left(\frac{30}{100 - 46} \right) \cdot \frac{2}{10934,32} \cdot 0,8625 \cdot 250 + \left(\frac{70}{100 - 41} \right) \cdot \frac{2}{10934,32} \cdot 0,8426 \cdot 191$$

$$Z_f = 0,0569 \%$$

Ztráta sáláním do okolí

Ztráta sáláním do okolí je závislá na druhu spalovaného paliva a velikosti respektive výkonu kotle, podle odborné konzultace a s využitím literatury [4] je volena ztráta sáláním $Z_{sv} = 0,8 \%$.

Ztráta fyzickým teplem spalin

$$Z_k = (100 - Z_c) \cdot \frac{I_{sp}^{191} - I_{vz}^{25}}{Q_p^p} = (100 - 4,4244) \cdot \frac{1325,37 - 99,28}{10934,32} \quad (3.12)$$

$$Z_k = 10,4081 \%$$

kde I_{sp}^{191} – je entalpie spalin při odchozí teplotě 191 °C a přebytku vzduchu za kotlem [kJ·kg⁻¹]

I_{vz}^{25} – je entalpie vzduchu při teplotě okolí a přebytku vzduchu za kotlem [kJ·kg⁻¹]

Nepočitatelná ztráta

Tato ztráta bere v úvahu ztráty nepostihnutelné výpočtem, podle odborné konzultace je volena tato ztráta $Z_n = 0,2 \%$.

Tepelná účinnost kotle

$$\eta_k = 100 - \sum Z = 100 - 4,4244 - 0,0757 - 0,0569 - 10,4081 - 0,2$$

$$\eta_k = 84,0349 \%$$

3.3 Výrobní teplo páry

$$Q_v = m_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + m_o \cdot (i'_w - i_{nv}) \quad (3.13)$$

kde m_{pp} – je hmotnostní tok ostré páry respektive parní výkon kotle [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

i_{pp} – je entalpie ostré páry, podle [5] je $i_{pp} = 3430,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

i_{nv} – je entalpie napájecí vody, podle [5] je $i_{nv} = 656,28 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ při odhadovaném tlaku $p_{nv} = 11,55 \text{ MPa}$

m_o – je hmotnostní tok odluhu, podle odborné konzultace je volen odluh 0,5 % parního výkonu

i'_w – je entalpie odluhu při odhadovaném tlaku v bubnu $p_w = 11,2 \text{ MPa}$, podle [5] je $i'_w = 1458,58 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$Q_v = \frac{88000}{3600} \cdot (3430,82 - 656,28) + \frac{88000}{3600} \cdot 0,005 \cdot (1458,58 - 656,28)$$

$$Q_v = 67920,22 \text{ kW}$$

3.4 Množství paliva

Skutečné množství paliva přivedeného do kotle

$$M_p = \frac{Q_v}{Q_p^p \cdot \eta_k} \cdot 100 = \frac{67920,22}{10934,32 \cdot 84,0349} \cdot 100 = 7.392 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.14)$$

Skutečné množství spáleného paliva

$$M_{pv} = M_p \cdot \frac{(1 - Z_c)}{100} = 7,392 \cdot \frac{(100 - 4,4244)}{100} = 7,065 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.15)$$

3.5 Rosný bod spalin

Výpočet rosného bodu spalin bude pouze ověřeno, jestli je navržená teplota odchozích spalin 191°C dostatečně vysoká, aby nedocházelo k nízkoteplotní korozi.

3.5.1 Rosný bod spalin – první varianta

První varianta výpočtu rosného bodu je počítána podle dostupné literatury [3].

$$t_{r1} = t_k + \frac{\beta \cdot \sqrt[3]{S_r}}{1,05^{4,19 \cdot X_p \cdot A_r}} \quad (3.16)$$

kde β – je koeficient závislý na přebytku vzduchu, voleno 208 [-]

t_k – je teplota sytosti páry při parciálním tlaku vodní páry ve spalinách [$^\circ\text{C}$]

S_r – je redukovaný obsah síry v surovém palivu [$\% \cdot \text{kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$]

A_r – je redukovaný obsah popela v surovém palivu [$\% \cdot \text{kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$]

X_p – je poměrný obsah popele v úletu [-]

Parciální tlak vodní páry

Podle [2] je parciální tlak jednotlivých složek směsi (v tomto případě spaliny) roven jejich objemovému zastoupení. Jako celkový tlak je brán tlak okolí. Celkový objem pak tvoří spaliny na výstupu z kotle.

$$\begin{aligned} \frac{p_{H_2O}}{p_c} &= \frac{O_{H_2O}}{O_{sp}} = \frac{O_{H_2Omin} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}^s}{O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}^s} \\ p_{H_2O} &= \frac{O_{H_2Omin} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}^s}{O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}^s} \cdot p_c \\ p_{H_2O} &= \frac{0,94495 + (1,02279 - 1) \cdot (1,356 - 1) \cdot 2,96694}{3,87865 + (1,356 - 1) \cdot 3,03456} \cdot 99590 \\ p_{H_2O} &= 19460,73 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (3.17)$$

kde p_{H_2O} – je parciální tlak vodní páry ve spalinách [Pa], tomuto tlaku odpovídá podle [5] teplota sytosti páry $t_k = 59,56$ °C

p_c – tlak okolí [Pa]

α – je přebytek vzduchu za kotlem [-]

O_{H_2O} – je objem vodní páry ve spalinách [$\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

Redukovaný obsah síry

$$S_r = \frac{S^r}{Q_i^r} = \frac{0,009}{10,8} = 0,00083 \% \cdot \text{kg} \cdot \text{MJ}^{-1} \quad (3.18)$$

Redukovaný obsah popela

$$A_r = \frac{A^r}{Q_i^r} = \frac{2}{10,8} = 0,18519 \% \cdot \text{kg} \cdot \text{MJ}^{-1} \quad (3.19)$$

Rosný bod spalin - první varianta

$$t_{r1} = 59,56 + \frac{208 \cdot \sqrt[3]{0,00083}}{1,2266^{0,7 \cdot 0,18519}} = 78,62 \text{ °C}$$

3.5.2 Rosný bod spalin – druhá varianta

Druhá varianta výpočtu rosného bodu je počítána podle firemní literatury [6].

$$\begin{aligned} t_{r2} &= \frac{9366}{22,169 - 0,4343 \cdot \ln \left(\frac{\omega_{H_2O}}{100 - \omega_{SO_2} \cdot \omega_{SO_3}} \cdot \frac{\omega_{SO_2} \cdot \omega_{SO_3}}{1 - \omega_{SO_2} \cdot \omega_{SO_3}} \cdot 100000 \right)} - \\ &\quad - 273,15 \\ t_{r2} &= \frac{9366}{22,169 - 0,4343 \cdot \ln(R_{H_2O} \cdot OB \cdot 100000)} - 273,15 \end{aligned} \quad (3.20)$$

kde ω_{H_2O} – je objemový obsah vodní páry ve spalinách [%]

ω_{SO_2} – je objemový obsah oxidu siřičitého ve spalinách [%]

ω_{SO_3} – je objemový obsah oxidu sírového ve spalinách [%]

Objemový obsah SO₂ ve spalinách

$$\omega_{SO_2} = \frac{O_{SO_2}}{O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}} \cdot 100 \quad (3.21)$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{0,00006}{3,87865 + (1,356 - 1) \cdot 3,03456} \cdot 100 = 12,39 \cdot 10^{-4} \%$$

Objemový obsah SO₃ ve spalinách

$$\omega_{SO_3} = 0,02 \cdot \omega_{SO_2} = 0,25 \cdot 10^{-4} \% \quad (3.22)$$

dle odborné konzultace bylo zvoleno, že 2 % oxidu siřičitého zoxiduje na oxid sírový

Objemový obsah H₂O ve spalinách

$$\omega_{H_2O} = \frac{O_{H_2Omin} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}^s}{O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}} \cdot 100 \quad (3.23)$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{0,94495 + (1,02279 - 1) \cdot (1,356 - 1) \cdot 2,96694}{3,87865 + (1,356 - 1) \cdot 3,03456} = 19,46 \%$$

Koeficient R_{H₂O}

$$R_{H_2O} = \frac{\omega_{H_2O}}{100 - \omega_{SO_2} \cdot \omega_{SO_3}} = \frac{19,46}{100 - 12,39 \cdot 10^{-4} \cdot 0,25 \cdot 10^{-4}} \quad (3.24)$$

$$R_{H_2O} = 0,19541 Nm^3 \cdot Nm^{-3}$$

Koeficient OB

$$OB = \frac{\omega_{SO_2} \cdot \omega_{SO_3}}{1 - \omega_{SO_2} \cdot \omega_{SO_3}} = \frac{12,39 \cdot 10^{-4} \cdot 0,25 \cdot 10^{-4}}{1 - 12,39 \cdot 10^{-4} \cdot 0,25 \cdot 10^{-4}} = 3,07 \cdot 10^{-8} \% \quad (3.25)$$

Rosný bod spalin – druhá varianta

$$t_{r2} = \frac{9366}{22,169 - 0,4343 \cdot \ln(0,19541 \cdot 3,07 \cdot 10^{-8} \cdot 100000)} - 273,15 \quad (3.26)$$

$$t_{r2} = 95,72 \text{ °C}$$

Shrnutí

Teplota rosného bodu stanovená oběma metodami vychází velice nízká, to je způsobeno malým obsahem síry ve spalinách. Je složité říci, která hodnota se více blíží skutečné hodnotě teploty rosného bodu. Je možné se domnívat, že korektnější hodnota je výsledkem druhé metody, dle firemní literatury [6], která je vhodná pro všechny typy paliva. Kdežto literatura [3] není přímo orientovaná na spalování biomasy. Navržená výstupní teplota spalin musí počítat i s dalšími zařízeními, které se nachází za výstupem kotle, kde může také vznikat koroze. Tyto zařízení jsou ve směru proudění spalin: elektrostatický odlučovač, spalinový ventilátor a další prvky spalinovodu. Teplota odchozích spalin byla na základě odborné konzultace zvolena na hodnotu 191 °C, což přináší dostatečnou rezervu v zabránění korozi v důsledku kondenzace síry ve spalinách. Dalším důvodem volby takto vysoké teploty je možné snižování výkonu kotle v provozu, kdy může teplota odchozích spalin klesat. Teplota odchozích spalin lze dále korigovat pomocí parního předehříváče vzduchu, který ohřívá vzduch o teplotě okolního prostředí na teplotu 40 °C. Takže při změně této teploty lze přímo ovlivnit výstupní teplotu spalin. Kdy například při větším předehřátí vzduchu dojde k menšímu ochlazení spalin, a tím vzroste jejich teplota a naopak.

4 Návrh spalovací komory

Základní tvar a rozměry spalovací komory jsou voleny na základě odborné konzultace. Cílem této kapitoly je určení množství tepla uvolněného v ohništi, avšak hlavním bodem je určení teploty spalín na konci ohniště.

4.1 Rozměrový výpočet spalovací komory

Základní rozměry jsou označeny dle následujícího obrázku 4.1.

$$a = 6,715 \text{ m}$$

$$b = 5,375 \text{ m}$$

$$c = 13,351 \text{ m}$$

$$d = 15,299 \text{ m}$$

$$e = 3,068 \text{ m}$$

$$f = 3,962 \text{ m}$$

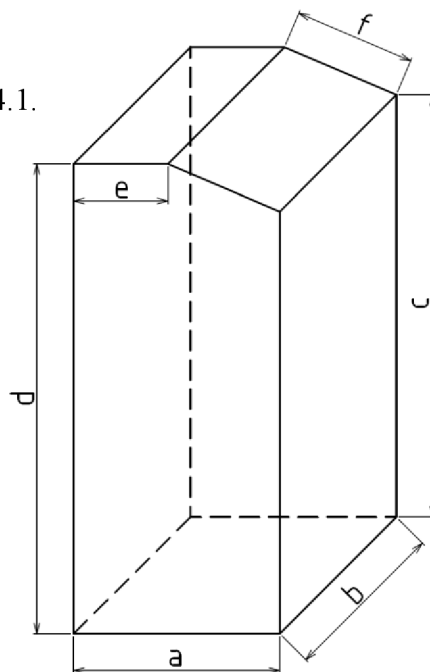
Plošný obsah ohniště

$$F_o = a \cdot b = 6,715 \cdot 5,375 = 36,093 \text{ m}^2 \quad (4.1)$$

Plošné tepelné zatížení ohniště

$$q_f = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{F_o} = \frac{7,392 \cdot 10800}{36,093} \quad (4.2)$$

$$q_f = 2114 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$$



Obrázek 4.1 Spalovací komora

Podle dostupné literatury [4] je vhodné rozmezí plošného tepelného zatížení roštu 700-1400 kW.m⁻², v tomto případě je však kotel vybaven roštem moderní konstrukce, který je konstruován i pro vyšší tepelné zatížení, takže výsledná hodnota vyhovuje zvolenému roštu.

Objem ohniště

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

$$V_o = 6,715 \cdot 5,375 \cdot 15,299 - (6,715 - 3,068) \cdot \frac{(15,299 - 13,351)}{2} \cdot 5,375 \quad (4.3)$$

$$V_o = 549,366 \text{ m}^3$$

Objemové tepelné zatížení ohniště

$$q_v = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{V_o} = \frac{7,392 \cdot 10800}{549,366} = 139 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.4)$$

Podle dostupné literatury [7] je vhodné rozmezí objemového tepelného zatížení roštového ohniště 100-400 kW.m⁻³. Výsledná hodnota doporučeným parametrům vyhovuje.

Povrch stěn ohniště

$$\begin{aligned}
 F_{st} &= a \cdot b + b \cdot d + b \cdot c + e \cdot b + f \cdot b + 2 \cdot a \cdot d - (d - c) \cdot (a - e) \\
 F_{st} &= 6,715 \cdot 5,375 + 5,375 \cdot 15,299 + 5,375 \cdot 13,351 + 3,068 \cdot 5,375 + \\
 &\quad + 3,962 \cdot 5,375 + 2 \cdot 6,715 \cdot 15,299 - (15,299 - 13,351) \cdot \\
 &\quad \cdot (6,715 - 3,068) \\
 F_{st} &= 429,843 \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

4.2 Tepelný výpočet spalovací komory

Poměrná teplota spalin

$$\theta_0 = \frac{T_{ok}}{T_{np}} = \frac{1}{1 + M \cdot \left(\frac{\alpha_0}{B_0}\right)^{0,6}} \tag{4.6}$$

kde T_{ok} – je absolutní teplota spalin na konci ohniště [K]

T_{np} – je absolutní teplota nechlazeného plamene [K]

M – je součinitel závislý na spalovaném palivu a rozložení teplot v ohništi [-]

α_0 – je stupeň černosti ohniště [-]

B_0 – je Boltzmannovo číslo [-]

Součinitel M

$$\begin{aligned}
 M &= 0,59 - 0,5 \cdot x_0 \text{ podle odborné konzultace voleno } x_0 = 0,14 \text{ [-]} \\
 M &= 0,59 - 0,5 \cdot 0,14 = 0,52
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Boltzmannovo číslo

$$B_0 = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{sp}} \cdot c}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \bar{\Psi} \cdot F_{st}} \tag{4.8}$$

kde φ – je součinitel uchování tepla [-]

$\overline{O_{sp}} \cdot c$ – je střední celkové měrné teplo spalin [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$]

$\bar{\Psi}$ – je součinitel tepelné efektivity stěn [-]

Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{Z_{sv}}{\eta_k + Z_{sv}} = 1 - \frac{0,8}{84,0349 + 0,8} = 0,9906 \tag{4.9}$$

Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_u = Q_p^p \cdot \frac{100 - Z_c - Z_{co} - Z_f}{100 - Z_c} + Q_{vz} - Q_{vzv} \tag{4.10}$$

Teplo přivedené do kotle se vzduchem

$$Q_{vz} = \alpha \cdot I_{vz}^{195} \cdot 0,65 + \alpha \cdot I_{vz}^{332} \cdot 0,35 + (\alpha_{ok} - \alpha) \cdot i_{vz}^{25}$$

$$Q_{vz} = 1,274 \cdot 775,74 \cdot 0,65 + 1,274 \cdot 1336,67 \cdot 0,35 + (1,324 - 1,274) \cdot 99,28 \quad (4.11)$$

$$Q_{vz} = 1243,38 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde α – je přebytek vzduchu na začátku spalovací komory [-]

α_{ok} – je přebytek vzduchu na konci spalovací komory [-]

0,65 a 0,35 – je dle odborné konzultace rozdělení primárního a sekundárního vzduchu, který má i rozdílnou teplotu

I_{vz}^{335} – je entalpie sekundárního vzduchu, získaná pomocí interpolace tabulky 2.4 [kJ·kg⁻¹]

I_{vz}^{198} – je entalpie primárního vzduchu získaná pomocí interpolace tabulky 2.4 [kJ·kg⁻¹]

Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_u = 10934,42 \cdot \frac{100 - 4,4244 - 0,0757 - 0,0569}{100 - 4,4244} + 1243,38 - 75,57 \quad (4.12)$$

$$I_u = 12087,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Střední celkové měrné teplo spalín

$$\overline{Q_{sp} \cdot c} = \frac{I_u - I_{ok}}{t_{np} - t_{ok}} \quad (4.13)$$

kde t_{np} – je teplota nechlazeného plamene, získaná interpolací tabulky 2.4 [°C]

odpovídající entalpii I_u , interpolací je získáno $t_{np} = 1517,68$ °C

t_{ok} – je teplota na konci ohniště, hodnota je volena $t_{ok} = 950$ °C

I_{ok} – je entalpie odpovídající teplotě t_{ok} získaná interpolací tabulky 2.4 [kJ·kg⁻¹]

$$\overline{Q_{sp} \cdot c} = \frac{12102,75 - 7161,38}{1519,31 - 951} = 8,69 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$$

Součinitel tepelné efektivity stěn

$$\overline{\Psi} = x \cdot \xi \quad (4.14)$$

kde x – je úhlový součinitel, pro membránové stěny $x = 1$ [-]

ξ – je součinitel zanesení stěn ohniště, podle odborné konzultace voleno $\xi = 0,6$ [-]

$$\overline{\Psi} = 1 \cdot 0,6 = 0,6$$

Boltzmannovo číslo

$$B_o = \frac{0,9906 \cdot 7,065 \cdot 8,69}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,6 \cdot 429,843} = 0,720$$

Stupeň černosti ohniště

$$a_o = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{R}{F_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \bar{\Psi}) \cdot (1 - \frac{R}{F_{st}})} \quad (4.15)$$

kde R – je plocha hořící vrstvy, velikost této plochy je volena po odborné konzultaci stejně velká jako je rozměr roštu, takže $R = F_o$ [m²]
 a_{pl} – je efektivní stupeň černosti plamene [-]

Efektivní stupeň černosti plamene

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (4.16)$$

kde k – je součinitel zeslabení sálání [MPa⁻¹·m⁻¹]
 p – je tlak v ohništi, u kotlů bez přetlaku se volí $p = 0,1$ MPa
 s – je účinná tloušťka sálavé vrstvy [m]

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{549,366}{429,843} = 4,601 \text{ m} \quad (4.17)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{ok}}{100} \right) \cdot r_{sp} \quad (4.18)$$

kde r_{sp} – je objemová část tříatomových plynů [-]
 p_{sp} – je parciální tlak tříatomových plynů [MPa]

Objemová část tříatomových plynů

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{spmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{vzmin}} + \frac{O_{H_2O}}{O_{spmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{vzmin}} \quad (4.19)$$

$$r_{sp} = \frac{0,58881 + 0,00006}{3,87865 + (1,324 - 1) \cdot 3,03456} + \frac{0,94495}{3,87865 + (1,324 - 1) \cdot 3,03456}$$

$$r_{sp} = 0,12112 + 0,19887 = 0,31999$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,31999 = 0,03199 \text{ MPa} \quad (4.20)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,19887}{3,16 \cdot \sqrt{0,03199 \cdot 4,601}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{273,15 + 950}{100} \right) \cdot 0,31999$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 1,446 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{ok}^2 \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (4.21)$$

kde μ – je střední hmotová koncentrace popílku ve spalínách [-]
 d – je střední efektivní průměr částiček popílku, pro roštové kotle podle [3] je
 $d = 20 \mu\text{m}$

Střední hmotová koncentrace popílku ve spalínách

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{spmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{vzmin}} \cdot \frac{X_p}{100} = \frac{10 \cdot 2}{3,87865 + (1,324 - 1) \cdot 3,03456} \cdot \frac{70}{100} \quad (4.22)$$

$$\mu = 2,880 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(950 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \cdot 2,880 = 0,147 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu + 10 \cdot k_k \cdot \chi_1 \cdot \chi_2 \quad (4.23)$$

kde k_k – je součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi, podle [3] je $k_k = 1$
 $[\text{MPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$

χ_1 – závisí na druhu paliva, podle [3] je $\chi_1 = 0,5$ [-]

χ_2 – závisí na druhu ohniště, podle [3] pro roštové ohniště je $\chi_2 = 0,03$ [-]

$$k = 1,446 + 0,147 + 10 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,03 = 1,743 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Efektivní stupeň černosti plamene

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-1,743 \cdot 0,1 \cdot 4,401} = 0,551$$

Stupeň černosti ohniště

$$a_o = \frac{0,551 + (1 - 0,551) \cdot \frac{36,093}{429,843}}{1 - (1 - 0,551) \cdot (1 - 0,6) \cdot \left(1 - \frac{36,093}{429,843}\right)} = 0,597$$

Poměrná teplota spalín

$$\theta_0 = \frac{T_{ok}}{T_{np}} = \frac{1}{1 + 0,52 \cdot \left(\frac{0,596}{0,720}\right)^{0,6}} = 0,683$$

Skutečná teplota spalín na konci ohniště

$$t_{ok} = \frac{t_{np} + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_o}{B_o}\right)^{0,6}} - 273,15 = \frac{1517,68 + 273,15}{1 + 0,52 \cdot \left(\frac{0,597}{0,719}\right)^{0,6}} - 273,15 = 949,80 \text{ °C} \quad (4.24)$$

Rozdíl mezi navrženou a skutečnou teplotou je pouze 0,20 °C, zvolené teplota je dostatečně přesná.

Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn

$$Q_s = \varphi \cdot (I_u - I_{ok}) = 0,9906 \cdot (12087,06 - 7153,03) = 4887,50 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (4.25)$$

Střední tepelné zatížení stěn ohniště

$$\bar{q} = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot (I_u - I_{ok})}{F_{sk}} \quad (4.26)$$

Skutečná sálavá plocha stěn ohniště

$$F_{sk} = F_{st} - F_o - F_n = 429,843 - 36,093 - 1,720 = 392,03 \text{ m}^2 \quad (4.27)$$

kde F_o – je plocha roštu respektive ohniště [m^2]

F_n – je plocha nechlazených prostorů, jako jsou průřezy nebo startovací hořáky [m^2]

Střední tepelné zatížení stěn ohniště

$$\bar{q} = \frac{0,9906 \cdot 7,065 \cdot (12087,06 - 7153,03)}{392,030} = 88,08 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \quad (4.28)$$

Výkon předaný výparníku ve spalovací komoře

$$Q_{vyp, kom}^{tep} = \bar{q} \cdot (F_{sk} - e \cdot b) = 88,08 \cdot (392,030 - 3,068 \cdot 5,375) \quad (4.29)$$

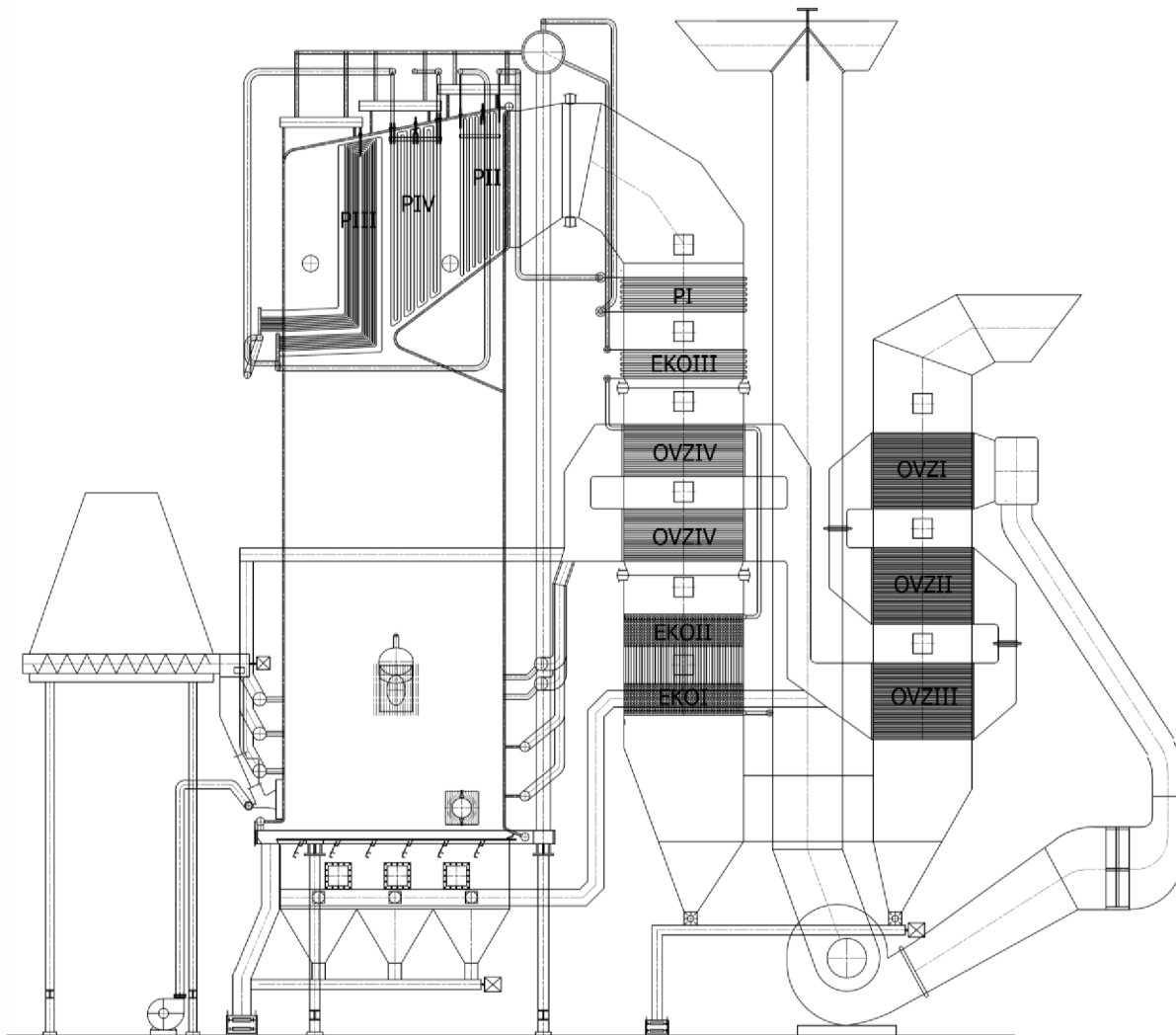
$$Q_{vyp, kom}^{tep} = 33076,05 \text{ kW}$$

kde e – je šířka výstupního otvoru spalovací komory [m]

b – je hloubka výstupního otvoru spalovací komory [m]

5 Návrh teplosměnných ploch

Ze zadání je znám stav páry na výstupu, teplota napájecí vody a teplota vzduchu přiváděného do ohříváku vzduchu. Z těchto hodnot bude vycházet následující návrh, který obsahuje rozdělení tlakových ztrát, teploty (páry, vody a vzduchu) a výkony jednotlivých ploch na straně média. Poslední část této kapitoly řeší návrh ze strany paliv.



Obrázek 5.1 Schéma rozdělení teplosměnných ploch

5.1 Rozvržení jednotlivých teplosměnných ploch a jejich tlakové ztráty

Na základě odborné konzultace byly jednotlivé teplosměnné plochy rozděleny následovně dle obrázku 5.1. V kotli se nachází čtyři stupně přehříváků, z toho třetí stupeň je šotový. Třístupňový ekonomizér, kde první a druhý stupeň je počítán jako jedna teplosměnná plocha. Dále pak čtyřstupeňový ohřívák vzduchu, kde první až třetí stupeň je počítán jako jedna teplosměnná plocha.

Tabulka 5.1 Rozdělení tlakových ztrát v jednotlivých plochách

Teplosměnná plocha	Tlaková ztráta [MPa]
Ekonomizér I, II	0,28
Ekonomizér III	0,07
Výparník	0
Přehřívák I	0,4
Přehřívák II	0,4
Přehřívák III	0,4
Přehřívák IV	0,4
Celková tlaková ztráta	1,95

5.2 Bilance ze strany média

5.2.1 Přehřívák IV

Výstupní parametry

$$\begin{aligned}
 t_{pIV}^{out} &= t_{pp} = 520 \text{ °C (zadaná hodnota)} \\
 p_{pIV}^{out} &= p_{pp} = 9,6 \text{ MPa} \\
 i_{pIV}^{out} &= i_{pp} = f(p_{pp}, t_{pp}) = 3430,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}
 \end{aligned}$$

Vstupní parametry

$$\begin{aligned}
 t_{pIV}^{in} &= 427 \text{ °C (navržená teplota)} \\
 p_{pIV}^{in} &= p_{pIV}^{out} + \Delta p_{pIV} = 9,6 + 0,4 = 10 \text{ MPa} \\
 i_{pIV}^{in} &= f(p_{pIV}^{in}, t_{pIV}^{in}) = 3177,73 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Parní výkon

$$Q_{pIV} = m_{pp} \cdot (i_{pIV}^{out} - i_{pIV}^{in}) = 24,44 \cdot (3430,82 - 3177,73) = 6186,76 \text{ kW} \tag{5.2}$$

5.2.2 Přehřívák III a bilance vstřiku 2

Na výstupu z přehříváku III je zařazen vstřik napájecí vody, teplota na výstupu z přehříváku III je zvolena na 478 °C. Z dalších výpočtů vyplynulo, že kvůli nízké rychlosti páry je zapotřebí rozdělit třetí díl přehříváku na dvě části, označeny jako část A a B. Podrobněji bude toto rozdělení popsáno v kapitole 6.3.

Výstupní parametry části B

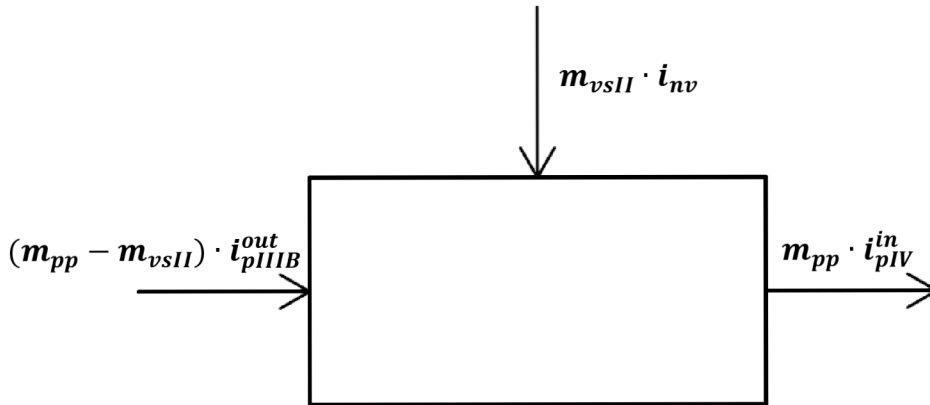
$$\begin{aligned}
 t_{pIIIB}^{out} &= 478 \text{ °C (navržená teplota)} \\
 p_{pIIIB}^{out} &= p_{pIV}^{in} = 10 \text{ MPa} \\
 i_{pIIIB}^{out} &= f(p_{pIIIB}^{out}, t_{pIIIB}^{out}) = 3317,62 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}
 \end{aligned}$$

Vstupní parametry části B a zároveň výstupní parametry části A

$$\begin{aligned}
 t_{pIIIB}^{in} &= t_{pIIIA}^{out} = 454 \text{ °C navržená teplota} \\
 p_{pIIIB}^{in} &= p_{pIIIA}^{out} = p_{pIIIB}^{out} + 0,5 \cdot \Delta p_{pIII} = 10 + 0,5 \cdot 0,4 = 10,2 \text{ MPa} \\
 i_{pIIIB}^{in} &= f(p_{pIIIB}^{in}, t_{pIIIB}^{in}) = f(p_{pIIIA}^{out}, t_{pIIIA}^{out}) = 3216,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Vstupní parametry části A

$$\begin{aligned}
 t_{pIII A}^{in} &= 404 \text{ °C (navržená teplota)} \\
 p_{pIII A}^{in} &= p_{pIII B}^{out} + \Delta p_{pIII} = 10 + 0,4 = 10,4 \text{ MPa} \\
 i_{pIII A}^{in} &= f(p_{pIII A}^{in}, t_{pIII A}^{in}) = 3072,63 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$



Obrázek 5.2 Bilanční schéma druhého vstříku

Bilanční rovnice vstříku 2

$$\begin{aligned}
 (m_{pp} - m_{vsII}) \cdot i_{pIII B}^{out} + m_{vsII} \cdot i_{nv} &= m_{pp} \cdot i_{pIV}^{in} \\
 m_{vsII} &= \frac{m_{pp} \cdot (i_{pIV}^{in} - i_{pIII B}^{out})}{i_{nv} - i_{pIII B}^{out}} = \frac{24,44 \cdot (3177,73 - 3317,62)}{656,28 - 3317,62} \\
 m_{vsII} &= 1,28 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

Parní výkon části A

$$\begin{aligned}
 Q_{pIII A} &= (m_{pp} - m_{vsII}) \cdot (i_{pIII A}^{out} - i_{pIII A}^{in}) \\
 Q_{pIII A} &= (24,44 - 1,28) \cdot (3216,82 - 3072,63) = 3339,50 \text{ kW}
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

Parní výkon části B

$$\begin{aligned}
 Q_{pIII B} &= (m_{pp} - m_{vsII}) \cdot (i_{pIII B}^{out} - i_{pIII B}^{in}) \\
 Q_{pIII B} &= (24,44 - 1,28) \cdot (3317,62 - 3216,82) = 2334,38 \text{ kW}
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

5.2.3 Přejhřívák II a bilance vstříku 1

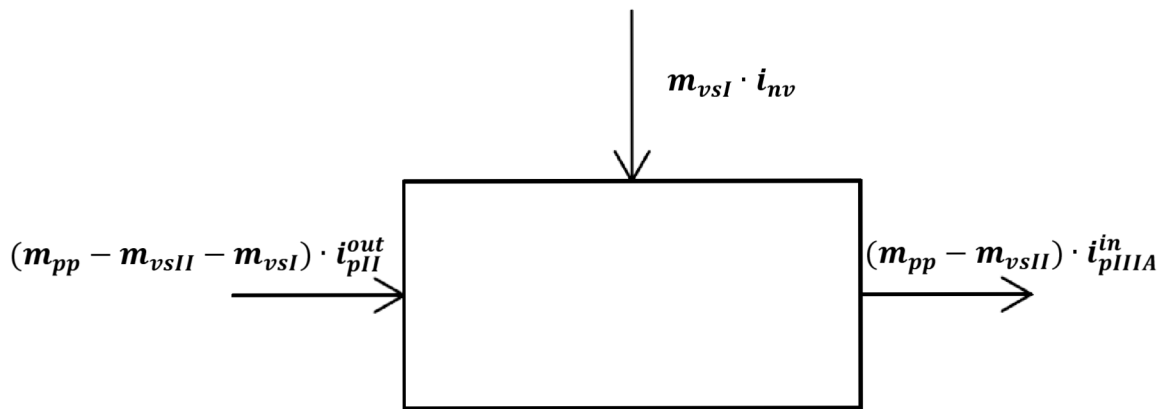
Na výstupu z přejhříváku II je zařazen vstřík napájecí vody, teplota na výstupu z přejhříváku II je zvolena na 412 °C.

Výstupní parametry

$$\begin{aligned}
 t_{pII}^{out} &= 412 \text{ °C (navržená teplota)} \\
 p_{pII}^{out} &= p_{pIII}^{in} = 10,4 \text{ MPa} \\
 i_{pII}^{out} &= f(p_{pII}^{out}, t_{pII}^{out}) = 3125,76 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}
 \end{aligned}$$

Vstupní parametry

$$\begin{aligned}
 t_{pII}^{in} &= 343 \text{ °C (navržená teplota)} \\
 p_{pII}^{in} &= p_{pII}^{out} + \Delta p_{pII} = 10,4 + 0,4 = 10,8 \text{ MPa} \\
 i_{pII}^{in} &= f(p_{pII}^{in}, t_{pII}^{in}) = 2863,53 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$



Obrázek 5.3 Bilanční schéma prvního vsříku

Bilanční rovnice vsříku 1

$$(m_{pp} - m_{vsII} - m_{vsI}) \cdot i_{pII}^{out} + m_{vsI} \cdot i_{nv} = (m_{pp} - m_{vsII}) \cdot i_{pIIIA}^{in}$$

$$m_{vsI} = \frac{(m_{pp} - m_{vsII}) \cdot (i_{pIIIA}^{in} - i_{pII}^{out})}{i_{nv} - i_{pII}^{out}} \quad (5.9)$$

$$m_{vsI} = \frac{(24,44 - 1,28) \cdot (3072,63 - 3125,76)}{656,28 - 3125,76} = 0,50 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Parní výkon

$$Q_{pII} = (m_{pp} - m_{vsII} - m_{vsI}) \cdot (i_{pII}^{out} - i_{pII}^{in})$$

$$Q_{pII} = (24,44 - 1,28 - 0,50) \cdot (3125,76 - 2863,53) = 5942,52 \text{ kW} \quad (5.10)$$

5.2.4 Přeřívák I

Výstupní parametry

$$t_{pl}^{out} = t_{pII}^{in} = 343 \text{ °C}$$

$$p_{pl}^{out} = p_{pII}^{in} = 10,8 \text{ MPa}$$

$$i_{pl}^{out} = f(p_{pl}^{out}, t_{pl}^{out}) = 2863,53 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Vstupní parametry

$$t_{pl}^{in} = 319,44 \text{ °C (teplota sytosti páry při tlaku } p_{pi}^{in})$$

$$p_{pl}^{in} = p_{pl}^{out} + \Delta p_{pl} = 10,8 + 0,4 = 11,2 \text{ MPa} \quad (5.11)$$

$$i_{pl}^{in} = f(p_{pl}^{in}, x = 1) = 2702,37 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Parní výkon

$$Q_{pl} = (m_{pp} - m_{vsII} - m_{vsI}) \cdot (i_{pl}^{out} - i_{pl}^{in})$$

$$Q_{pl} = (24,44 - 1,28 - 0,5) \cdot (2863,53 - 2702,37) = 3652,03 \text{ kW} \quad (5.12)$$

5.2.5 Výparník

Výstupní parametry

$$\begin{aligned}t_v^{out} &= t_{pl}^{in} = 319,44 \text{ °C} \\p_v^{out} &= p_{pl}^{in} = 11,2 \text{ MPa} \\i_v^{out} &= i_{pl}^{in} = 2702,37 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\end{aligned}$$

Vstupní parametry

$$\begin{aligned}t_v^{in} &= t_{ekoIII}^{out} = 252 \text{ °C (teplota navržená z nedohřevu ekonomizéru)} \\p_v^{in} &= p_v^{out} = 11,2 \text{ MPa} \\i_v^{in} &= f(p_v^{in}, t_v^{in}) = 1095,34 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\end{aligned}$$

Parní výkon

$$\begin{aligned}Q_{vyp} &= (m_{pp} - m_{vsII} - m_{vsI}) \cdot (i_v^{out} - i_v^{in}) + m_o \cdot (i'_w - i_{nv}) \\Q_{vyp} &= (24,44 - 1,28 - 0,50) \cdot (2702,37 - 1095,34) + 0,005 \cdot 24,44 \cdot \\&\quad \cdot (1458,58 - 656,28) \\Q_{vyp} &= 36461,78 \text{ kW}\end{aligned} \tag{5.13}$$

5.2.6 Ekonomizér III

Výstupní parametry

$$\begin{aligned}t_{ekoIII}^{out} &= 252 \text{ °C} \\p_{ekoIII}^{out} &= p_v^{in} = 11,2 \text{ MPa} \\i_{ekoIII}^{out} &= i_v^{in} = 1095,34 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\end{aligned}$$

Vstupní parametry

$$\begin{aligned}t_{ekoIII}^{in} &= 218 \text{ °C (navržená teplota)} \\p_{ekoIII}^{in} &= p_{ekoIII}^{out} + \Delta p_{ekoIII} = 11,2 + 0,07 = 11,27 \text{ MPa} \\i_{ekoIII}^{in} &= f(p_{ekoIII}^{in}, t_{ekoIII}^{in}) = 937,20 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\end{aligned} \tag{5.14}$$

Výkon

$$\begin{aligned}Q_{ekoIII} &= (m_{pp} - m_{vsII} - m_{vsI} + m_o) \cdot (i_{ekoIII}^{out} - i_{ekoIII}^{in}) \\Q_{ekoIII} &= (24,44 - 1,28 - 0,50 + 0,005 \cdot 24,44) \cdot (1095,34 - 937,20) \\Q_{ekoIII} &= 3603,06 \text{ kW}\end{aligned} \tag{5.15}$$

5.2.7 Ekonomizér I,II

Výstupní parametry

$$\begin{aligned}t_{ekoI,II}^{out} &= t_{ekoIII}^{in} = 218 \text{ °C} \\p_{ekoI,II}^{out} &= p_{ekoIII}^{in} = 11,27 \text{ MPa} \\i_{ekoI,II}^{out} &= i_{ekoIII}^{in} = 937,20 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\end{aligned}$$

Vstupní parametry

$$\begin{aligned}
 t_{ekol,II}^{in} &= t_{nv} = 154 \text{ °C (zadaná teplota)} \\
 p_{ekol,II}^{in} &= p_{ekol,II}^{out} + \Delta p_{ekol,II} = p_{nv} = 11,27 + 0,28 = 11,55 \text{ MPa} \\
 i_{ekol,II}^{in} &= i_{nv} = 656,28 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{5.16}$$

Výkon

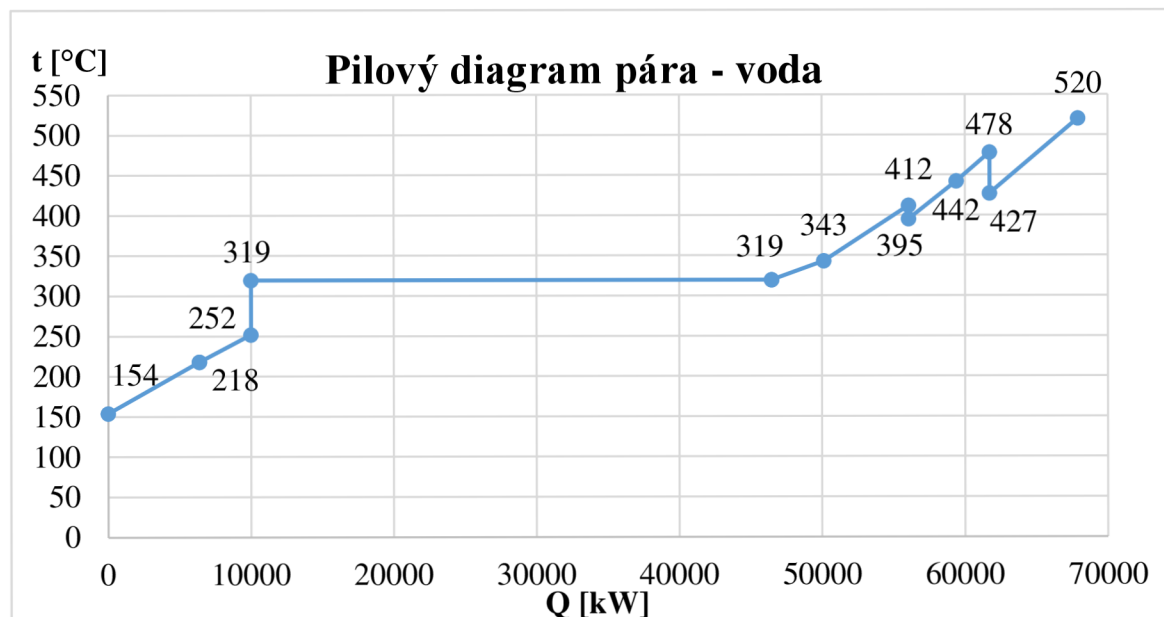
$$\begin{aligned}
 Q_{ekol,II} &= (m_{pp} - m_{vsII} - m_{vSI} + m_o) \cdot (i_{ekol,II}^{out} - i_{ekol,II}^{in}) \\
 Q_{ekol,II} &= (24,44 - 1,28 - 0,50 + 0,005 \cdot 24,44) \cdot (937,20 - 656,28) \\
 Q_{ekol,II} &= 6400,18 \text{ kW}
 \end{aligned}
 \tag{5.17}$$

5.2.8 Celkový parovodní výkon

$$\begin{aligned}
 Q_v &= Q_{pIV} + Q_{pIIIB} + Q_{pIIIA} + Q_{pII} + Q_{pI} + Q_v + Q_{ekoIII} + Q_{ekoII} \\
 Q_v &= 6186,76 + 2334,38 + 3339,50 + 5942,52 + 3652,03 + 36461,78 + \\
 &\quad + 3603,06 + 6400,18 \\
 Q_v &= 67920,22 \text{ kW}
 \end{aligned}
 \tag{5.18}$$

Tabulka 5.2 Shrnutí parního návrhu teplosměnných ploch

Teplosměnná plocha		Tlak [MPa]	Teplota [°C]	Entalpie [kJ·kg ⁻¹]	Entalpický spád [kJ·kg ⁻¹]	Výkon [kW]
Přehřívák IV	výstup	9,60	520,00	3430,82	253,09	6186,76
	vstup	10,00	427,00	3177,73		
Přehřívák IIIB	výstup	10,00	478,00	3317,62	100,80	2334,38
	vstup	10,20	442,00	3216,82		
Přehřívák IIIA	výstup	10,20	442,00	3216,82	144,20	3339,49
	vstup	10,40	395,00	3072,63		
Přehřívák II	výstup	10,40	412,00	3125,76	262,23	5942,52
	vstup	10,80	343,00	2863,53		
Přehřívák I	výstup	10,80	343,00	2863,53	161,16	3652,03
	vstup	11,20	319,44	2702,37		
Výparník	výstup	11,20	319,44	2702,37	1607,03	36461,78
	vstup	11,20	252,00	1095,34		
Ekonomizér III	výstup	11,20	252,00	1095,34	158,14	3603,06
	vstup	11,27	218,00	937,20		
Ekonomizér I,II	výstup	11,27	218,00	937,20	280,91	6400,18
	vstup	11,55	154,00	656,28		
Celkem						67920,22



Obrázek 5.4 Pilový diagram páry a vody

5.2.9 Ohřívák vzduchu IV

Výstupní parametry

$$t_{ovzIV}^{out} = 332^{\circ}C \text{ (navržená teplota)}$$

$$i_{ovzIV}^{out} = 1336,67 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ (hodnota získaná interpolací tabulky 2.4)}$$

Vstupní parametry

$$t_{ovzIV}^{in} = 195^{\circ}C \text{ (navržená teplota)}$$

$$i_{ovzIV}^{in} = 775,74 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ (hodnota získaná interpolací tabulky 2.4)}$$

Výkon

$$Q_{ovzIV} = x \cdot M_{pv} \cdot \alpha \cdot (i_{ovzIV}^{out} - i_{ovzIV}^{in}) \quad (5.19)$$

$$Q_{ovzIV} = 0,35 \cdot 7,065 \cdot 1,274 \cdot (1336,67 - 775,74) = 1766,99 \text{ kW}$$

kde x – je poměrné množství proudícího vzduchu v místě OVZIV [-]

α – je přebytku vzduchu proudícího do spalovací komory [-]

5.2.10 Ohřívák vzduchu I,II,III

Výstupní parametry

$$t_{ovzI,II,III}^{out} = t_{ovzIV}^{in} = 195^{\circ}C \quad (5.20)$$

$$i_{ovzI,II,III}^{out} = i_{ovzIV}^{in} = 775,74 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Vstupní parametry

$$t_{ovzI,II,III}^{in} = 40^{\circ}C \text{ (zadaná hodnota)}$$

$$i_{ovzI,II,III}^{in} = 158,59 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ (hodnota získaná interpolací tabulky 2.4)}$$

Výkon

$$Q_{ovzIV} = M_{pv} \cdot \alpha \cdot (i_{ovzIV}^{out} - i_{ovzIV}^{in}) \quad (5.21)$$

$$Q_{ovzIV} = 7,065 \cdot 1,274 \cdot (775,74 - 158,59) = 5554,59 \text{ kW}$$

5.3 Bilance ze strany spalin

Cílem bilance ze strany spalin je získání hodnoty entalpií spalin za každou teplosměnnou plochou. Vychází se z teploty spalin na konci ohniště, takže výpočet je uspořádán ve směru toku spalin až k výstupu kotle. V místě šotového přehříváku III a konvekčního přehříváku IV do bilance vstupuje ještě sálání spalin z ohniště, které je třeba započítat. Dále se pak v prostoru přehříváku III, IV a II nacházejí doplňkové plochy ve formě membránové stěny výparníku, které odvádí část tepelné energie spalin v daném prostoru. Výpočet jednotlivých bodů je proveden podle rovnice (5.21), do které se dosazuje na místo Q_{dp}^{tep} odhadnutý výkon doplňkových ploch a na místo $Q_{s,dp}$ odhadnutý výkon sálání z ohniště. Tyto odhadnuté hodnoty jsou posléze iteračně dopočítány. V tabulce 5.3 jsou zobrazeny výsledné hodnoty jednotlivých entalpií mezi teplosměnnými plochami a dále graficky znázorněné na obrázku 5.5 ve formě pilového diagramu. Tyto hodnoty jsou získané z postupného výpočtu dle kapitoly 6 [3].

$$Q + Q_{dp}^{tep} = M_{pv} \cdot \varphi \cdot (i_{in} - i_{out}) + Q_{s,dp}$$
$$i_{out} = i_{in} - \frac{Q + Q_{dp}^{tep} - Q_{s,dp}}{M_{pv} \cdot \varphi} \quad (5.22)$$

kde Q – je parní výkon teplosměnné plochy [kW]

Q_{dp}^{tep} – je výkon doplňkové plochy z tepelného výpočtu [kW]

$Q_{s,dp}$ – je výkon zachycený sáláním z ohniště v prostoru teplosměnné plochy [kW]

M_{pv} – je skutečné množství spáleného paliva [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]

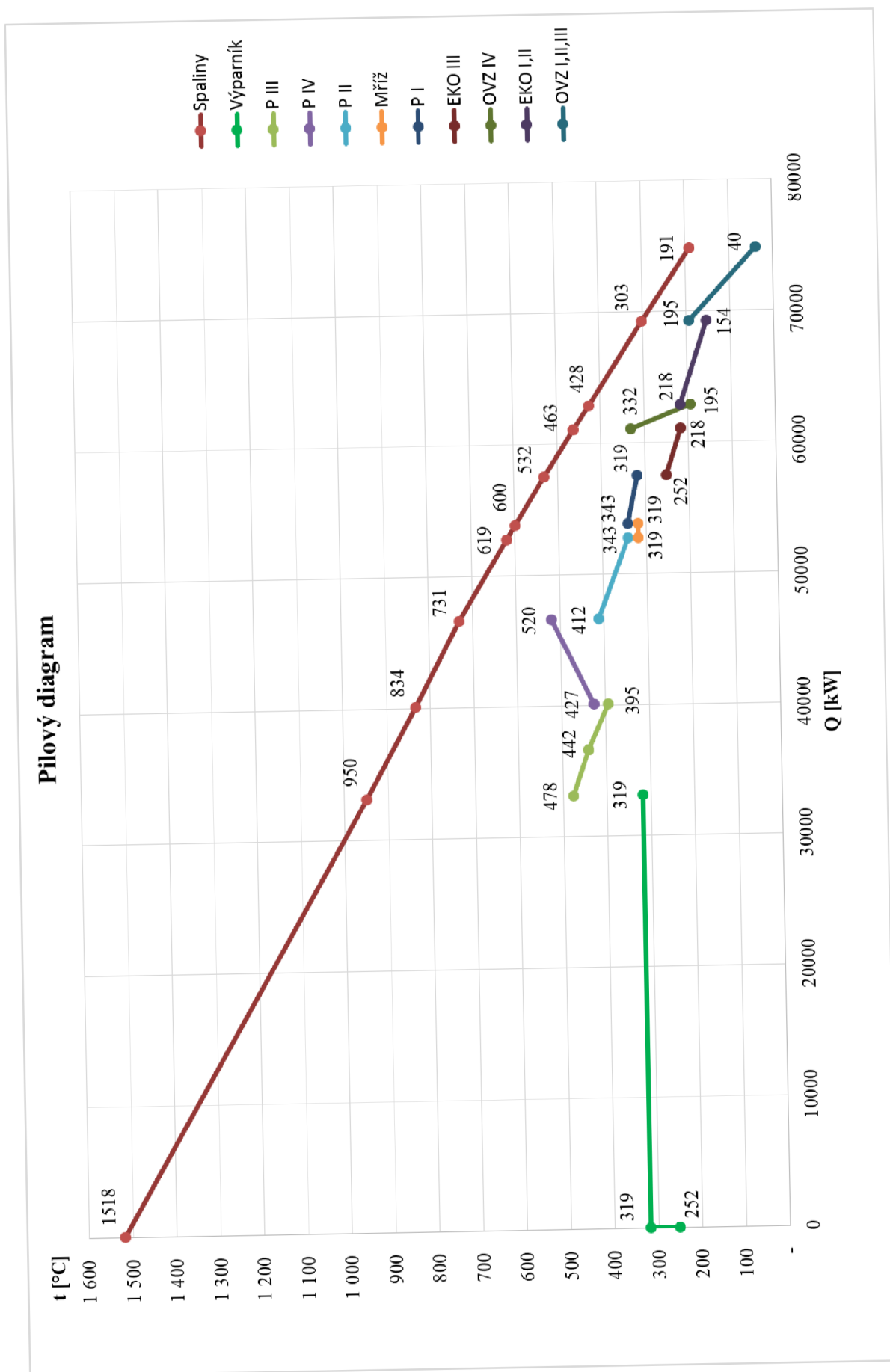
φ – součinitel uchování tepla [-]

i_{in} – entalpie spalin před teplosměnnou plochou [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]

i_{out} – entalpie spalin za teplosměnnou plochou [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]

Tabulka 5.3 Entalpie mezi jednotlivými plochami

Teplosměnná plocha		Entalpie [kJ·kg ⁻¹]	Teplota [°C]	Výkon spalin [kW]
Výparník	vstup	12087,06	1 517,68	34 528,47
	výstup	7 153,03	949,80	
Přehřívák IIIA	vstup	7 153,03	949,80	3 561,49
	výstup	6 134,61	826,94	
Přehřívák IIIB	vstup	7 153,03	949,80	3 161,38
	výstup	6 248,10	840,85	
Přehřívák IV	vstup	6 191,35	833,90	5 848,76
	výstup	5 355,30	730,75	
Přehřívák II	vstup	5 355,30	730,75	6 188,52
	výstup	4 470,97	619,41	
Kotlová mříž	vstup	4 470,97	619,41	1060,61
	výstup	4 322,00	600,24	
Přehřívák I	vstup	4 322,00	600,24	3 652,03
	výstup	3 800,13	531,86	
Ekonomizér III	vstup	3 800,13	531,86	3 603,06
	výstup	3 285,27	462,93	
Ohřívák vzduchu IV	vstup	3 285,27	462,93	1 766,99
	výstup	3 032,77	427,64	
Ekonomizér I, II	vstup	3 032,77	427,64	6 400,18
	výstup	2 118,20	302,72	
Ohřívák vzduchu I, II, III	vstup	2 118,20	302,72	5 554,59
	výstup	1 324,46	190,69	



Obrázek 5.5 Pilový diagram

6 Tepelný výpočet

Tato kapitola se zabývá konkrétním návrhem rozměrů a celkové geometrie jednotlivých teplosměnných ploch. Návrh každé jednotlivé plochy je zakončen bilancí, kdy se výkon z tepelného výpočtu může lišit od navrženého výkonu jen o $\pm 2\%$ [3]. Pro tepelný výpočet jsou zapotřebí různé fyzikální vlastnosti spalin, páry, vody a vzduchu. Fyzikální vlastnosti vody a páry jsou získané pomocí programu [5]. Vlastnosti spalin jsou získané z literatury [1] a [3].

6.1 Fyzikální vlastnosti spalin

V následující tabulce jsou zobrazeny jednotlivé parametry spalin pro objemový obsah vodní páry 20 %, který přibližně odpovídá stechiometrickému výpočtu.

Tabulka 6.1 Fyzikální vlastnosti spalin [3]

Teplota t [°C]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Součinitel kinematické viskozity ν [m ² ·s ⁻¹]	Prandtlovo číslo Pr [-]
100	0,0319	0,0000215	0,73
200	0,0413	0,0000326	0,71
300	0,0502	0,0000458	0,69
400	0,0596	0,0000607	0,67
500	0,0689	0,0000771	0,66
600	0,0783	0,0000952	0,65
700	0,0876	0,000114	0,64
800	0,0972	0,000135	0,63
900	0,106	0,000156	0,62
1000	0,116	0,000179	0,61

6.2 Fyzikální vlastnosti vzduchu

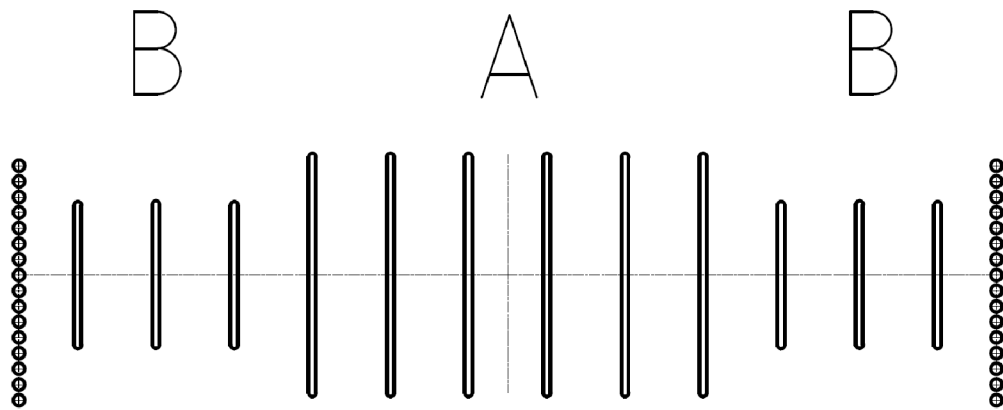
Následující tabulka zobrazuje fyzikální vlastnosti vzduchu středního složení.

Tabulka 6.2 Fyzikální vlastnosti vzduchu [1]

Teplota t [°C]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Součinitel kinematické viskozity ν [m ² ·s ⁻¹]	Prandtlovo číslo Pr [-]
100	0,0319	0,0000232	0,69
200	0,0390	0,0000348	0,69
300	0,0448	0,0000482	0,69
400	0,0505	0,0000629	0,7
500	0,0562	0,0000793	0,7

6.3 Přejhřívák III

Jak už bylo řečeno v předchozí kapitole, šotový přejhřívák je z důvodu nízké rychlosti páry rozdělen na dvě části A a B. Části jsou zapojeny sériově a to tak, že první část A ve středu tahu je tvořena 6 deskami a každá deska je dále tvořena 14 trubkami, po průchodu částí A směřuje pára do části B, která je po stranách tahu a je tvořena 6 deskami po 10 trubkách. Uspořádání je zobrazeno na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1 Rozdělení šotového přejhříváku III

6.4 Přeřivák PIIIA

6.4.1 Návrh geometrie

Vnější průměr trubek $D = 0,0337$ m

Vnitřní průměr trubek $d = 0,0237$ m

Počet trubek $n_{tr} = 14$

Počet desek $n_d = 6$

Výška desek $V_{1A} = 6,374$ m

Výška desek $V_{2A} = 6,55$ m

Střední výška desek $V_{stA} = 6,462$ m

Šířka desek $\check{S}_A = 1,322$ m

Šířka desek $\check{S}_{\check{S}A} = 2,833$ m

Mezera mezi hady $m_{\check{S}A} = 0,1$ m

Mezera mezi hady $m_{VA} = 0,2$ m

Podélná rozteč $S_{2A} = 0,047$ m

Příčná rozteč $S_{1A} = 0,425$ m

Rozměry vstupního kanálu

Šířka $a = 3,068$ m

Polovina hloubky tahu $b = 2,6875$ m

Plocha desek

$$S_{pIIIA} = 2 \cdot n_d \cdot (\check{S}_A \cdot V_{stA} + (\check{S}_{\check{S}A} - \check{S}_A) \cdot (\check{S}_A - m_{VA}) - m_{\check{S}A} \cdot (V_{stA} - \check{S}_A) - m_{VA} \cdot 0,5 \cdot \check{S}_A + V_{stA} \cdot D) \quad (6.1)$$

$$S_{pIIIA} = 2 \cdot 6 \cdot (1,322 \cdot 6,462 + (2,833 - 1,322) \cdot (1,322 - 0,2) - 0,1 \cdot (6,462 - 1,322) - 0,2 \cdot 0,5 \cdot 1,322 + 6,462 \cdot 0,0337) = 117,72 \text{ m}^2$$

Skutečná plocha desek

$$S_{pIIIA}^{skut} = x \cdot S_{pIIIA} = 0,8 \cdot 117,72 = 94,17 \text{ m}^2 \quad (6.2)$$

kde x – je úhlový součinitel desek, podle [3] $x = 0,8$ [-]

Střední průřez

$$F_{st} = \frac{2 \cdot F_{in} \cdot F_{out}}{F_{in} + F_{out}} \quad (6.3)$$

kde F_{in} – je vstupní průřez pro protékající spaliny [m^2]

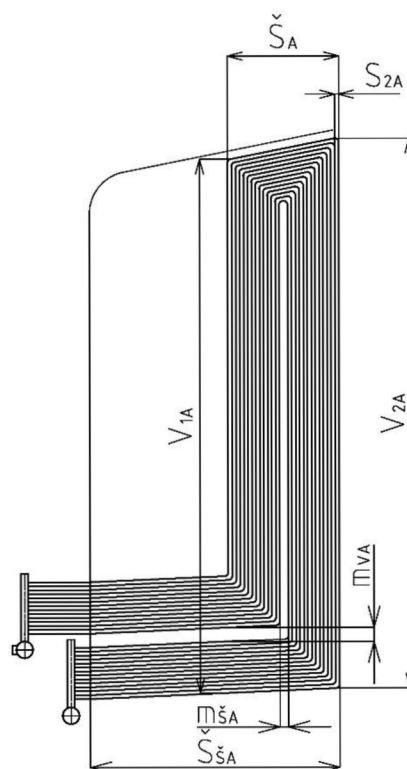
F_{out} – je výstupní průřez pro protékající spaliny [m^2]

Vstupní průřez

$$F_{in} = a \cdot b - n_d \cdot \check{S}_{\check{S}A} \cdot D = 3,068 \cdot 2,6875 - 6 \cdot 2,833 \cdot 0,0337 = 7,67 \text{ m}^2 \quad (6.4)$$

Výstupní průřez

$$F_{out} = V_{2A} \cdot b - n_d \cdot V_{1A} \cdot D = 6,55 \cdot 2,6875 - 6 \cdot 6,55 \cdot 0,0337 = 16,28 \text{ m}^2 \quad (6.5)$$



6.2 Přehřivák PIII část A

Střední průřez

$$F_{st} = \frac{2 \cdot 7,67 \cdot 16,28}{7,67 + 16,28} = 10,43 \text{ m}^2$$

6.4.2 Parametry spalín

Výstupní entalpie spalín

$$i_{outA} = i_{in} - \frac{Q_{pIII A} + Q_{pIII A,dp}^{tep} - Q_{s,dpA}}{\frac{M_{pv}}{2} \cdot \varphi} \quad (6.6)$$

$$i_{outA} = 7153,03 - \frac{3339,49 + 371,89 - 150,22}{\frac{7,065}{2} \cdot 0,991} = 6135,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde i_{in} – je entalpie na výstupu z ohniště, respektive na vstupu do PIII A [kJ·kg⁻¹]

$Q_{pIII A}$ – je parní výkon přehříváku PIII A [kW]

$Q_{pIII A,dp}^{tep}$ – je tepelný výkon doplňkových ploch, získaný podle rovnice (6.47) [kW]

$Q_{s,dpA}$ – je výkon sálání z ohniště, zachycený v prostoru PIII A, získaný dle rovnice (6.28) [kW]

Výstupní teplota spalín

Interpolací tabulky 2.4 pro entalpii i_{outA} je získána teplota spalín na výstupu z PIII A.

$$t_{outA} = 826,94 \text{ °C}$$

Střední teplota spalín

$$t_{střA}^{sp} = \frac{t_{inA} + t_{outA}}{2} = \frac{949,80 + 826,94}{2} = 888,37 \text{ °C} \quad (6.7)$$

kde t_{inA} – je teplota spalín na vstupu do šotů, je to zároveň i výstupní teplota z ohniště

Průtok spalín

$$V_{sp} = \frac{M_{pv}}{2} (O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}) \cdot \frac{t_{střA}^{sp} + 273,15}{273,15}$$

$$V_{sp} = \frac{7,065}{2} \cdot (3,88865 \cdot (1,324 - 1) \cdot 3,03456) \cdot \frac{888,37 + 273,15}{273,15} \quad (6.8)$$

$$V_{sp} = 73,03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde α – je přebytek vzduchu v místě šotů [-]

Rychlost spalín

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{st}} = \frac{73,3}{10,43} = 7,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.9)$$

Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,1050 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 0,0001536 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,621 [-]$

6.4.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Tento součinitel je počítán pouze pro převládající příčné proudění.

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (6.10)$$

kde c_z – je oprava pro počet podélných řad, podle [3] $c_z = 1 [-]$

c_s – je oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči σ_1 a poměrné podélné rozteči $\sigma_2 [-]$

Koeficient c_s

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} \quad (6.11)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_{1A}}{D} = \frac{0,425}{0,0337} = 12,61 \quad (6.12)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_{2A}}{D} = \frac{0,047}{0,0337} = 1,39 \quad (6.13)$$

Koeficient c_s

pro $\sigma_1 > 3$ a $\sigma_2 \leq 1,5$ se dosazuje $\sigma_1 = 3$

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,39}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,85$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,85 \cdot \frac{0,1050}{0,0337} \cdot \left(\frac{7,00 \cdot 0,0337}{0,0001536} \right)^{0,65} \cdot 0,621^{0,33}$$

$$\alpha_k^{sp} = 53,47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.4.4 Parametry média

Střední teplota páry

$$t_{stř}^p = \frac{t_{pIII}^{out} + t_{pIII}^{in}}{2} = \frac{442 + 395}{2} = 418,5 \text{ °C} \quad (6.14)$$

Střední tlak páry

$$p_{stř}^p = \frac{p_{pIII}^{in} + p_{pIII}^{out}}{2} = \frac{10,4 + 10,2}{2} = 10,3 \text{ MPa} \quad (6.15)$$

Fyzikální parametry Páry

Tyto parametry jsou získané pro střední tlak a teplotu pomocí programu [5].

Střední měrný objem $v = 0,0267 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0687 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 6,77 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Prandtlovo číslo $Pr = 1,098 [-]$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{(m_{pp} - m_{vSI}) \cdot v}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_d} = \frac{(24,44 - 1,28) \cdot 0,0267}{\frac{\pi \cdot 0,0237^2}{4} \cdot 14 \cdot 6} = 16,70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.16)$$

6.4.5 Součinitel přestupu tepla konvekci na straně páry

$$\alpha_k^p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \quad (6.17)$$

$$\alpha_k^p = 0,023 \cdot \frac{0,0687}{0,0237} \cdot \left(\frac{16,70 \cdot 0,0237}{6,77 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,098^{0,4} \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k^p = 2841,57 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde d_e – je ekvivalentní průměr (vnitřní průměr trubky) [m]

c_t – je opravný koeficient, závisí na teplotě stěny a proudu podle [3] $c_t = 1 [-]$

c_l – je opravný koeficient na poměrnou délku, podle [3] $c_l = 1 [-]$

6.4.6 Sálavý výkon z ohniště

Při výpočtu prvních dvou ploch ve směru proudění spalin (PIII a PIV) vstupuje do výpočtu sálavé teplo z ohniště, které bude určeno v následující kapitole.

$$Q_{SO} = q_o \cdot F_{vo} \quad (6.18)$$

kde q_o – je hustota tepelného toku výstupním průřezem [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$]

F_{vo} – je polovina průřezu výstupního otvoru ohniště (polovina je volena z důvodu toho, že část přehříváku A zabírá jen polovinu tahu) [m^2]

Hustota tepelného toku procházející výstupním průřezem ohniště

$$q_o = \delta \cdot y_h \cdot \bar{q} \quad (6.19)$$

$$q_o = 1 \cdot 0,65 \cdot 88,08 = 57,25 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$$

kde δ – je součinitel, který představuje podíl tepelného toku výstupním průřezem a tepelného toku do stěn v místě výstupního průřezu, podle [3] $\delta = 1 [-]$

y_h – je součinitel tepelné nerovnoměrnosti po výšce ohniště podle [3] $y_h = 0,65 [-]$

\bar{q} – je střední tepelné zatížení stěn ohniště, viz rovnice (4.28) [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$]

Hustota tepelného toku do stěn v místě výstupního průřezu

$$q_m = y_h \cdot \bar{q} \quad (6.20)$$

$$q_m = 0,65 \cdot 88,21 = 57,25 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$$

Hustota tepelného toku procházejícího výstupním průřezem deskového přehříváku

$$q_{svA} = q_m \cdot \frac{F_{vo}}{F_{sv}} \cdot (1 - a_A) \cdot \varphi_{o-sv} + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot \psi_{sv} \cdot a_A \cdot \left(\frac{T_{střA}^{sp}}{100} \right)^4 \quad (6.21)$$

kde F_{sv} – je výstupní průřez přehříváku, $F_{sv} = V_{2A} \cdot b$ [m²]

a_A – je stupeň černosti spalin [-]

φ_{o-sv} – je úhlový součinitel ohniště [-]

ψ_{sv} – je součinitel tepelné efektivity svazku, podle [3] $\psi_{sv} = 0,5$ [-]

Stupeň černosti spalin

$$a_A = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (6.22)$$

kde symbolika odpovídá kapitole 4, hodnoty r_{sp} , p_{sp} , μ , p , r_{H_2O} a d jsou použity shodně s kapitolou zmíněnou výše, to je možné díky použití přebytku vzduchu, jako je za spalovací komorou. Tento přebytek je použit až po EKOIII, odtud je už uvažováno přísávání falešného vzduchu.

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s_A = 3,6 \cdot \frac{V_0}{S_{pIII A} + S_0} = 3,6 \cdot \frac{52,52}{117,72 + 90,20} = 0,909 \text{ m} \quad (6.23)$$

kde V_0 – je objem prostoru desek [m³]

S_0 – je projekční povrch prostoru desek [m²]

Součinitel zeslabení sálení nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{střA}^{sp}}{100} \right) \cdot r_{sp}$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,19887}{3,16 \cdot \sqrt{0,03199 \cdot 0,909}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{273,15 + 888,34}{100} \right) \cdot 0,31999 \quad (6.24)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 3,617 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálení popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{střA}^{sp} \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(888,34 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \cdot 2,77868 \quad (6.25)$$

$$k_p \cdot \mu = 0,152 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

kde d – je střední efektivní průměr částic popílku [μm], pro roštové kotle podle [3] je $d = 20 \mu\text{m}$

Součinitel zeslabení sálení

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu \quad (6.26)$$

$$k = 3,617 + 0,152 = 3,769 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Stupeň černosti spalin

$$a_A = 1 - e^{-3,769 \cdot 0,1 \cdot 0,909} = 0,290$$

Úhlový součinitel ohniště

$$\varphi_{o-sv} = \sqrt{\left(\frac{\check{S}_A}{S_{1A}}\right)^2 + 1} - \frac{\check{S}_A}{S_{1A}} = \sqrt{\left(\frac{1,322}{0,425}\right)^2 + 1} - \frac{1,322}{0,425} = 0,157 \quad (6.27)$$

Hustota tepelného toku procházejícího výstupním průřezem deskového přehříváku

$$q_{svA} = 57,25 \cdot \frac{3,068 \cdot 2,6875}{2,6875 \cdot 6,55} \cdot (1 - 0,290) \cdot 0,157 + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 0,290 \cdot \left(\frac{888,34 + 273,15}{100}\right)^4$$

$$q_{svA} = 18,28 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$$

Sálavý výkon z ohniště a z prostoru deskového přehříváku zachycený v prostoru deskového přehříváku

$$Q_{s,dpA} = q_o \cdot F_{vo} - q_{sv} \cdot F_{sv}$$

$$Q_{s,dpA} = 57,25 \cdot 3,068 \cdot 2,6875 - 18,28 \cdot 2,6875 \cdot 6,55 \quad (6.28)$$

$$Q_{s,dpA} = 150,22 \text{ kW}$$

Sálavý výkon zachycený přehřívákem

$$Q_{s,dA} = \frac{S_{pIII A}^{skut}}{S_{pIII A}^{skut} + S_{dpA}^{skut}} \cdot Q_{s,dpA} = \frac{94,17}{94,17 + 20,21} \cdot 150,22 = 123,67 \text{ kW} \quad (6.29)$$

kde S_{dpA}^{skut} – je skutečný obsah doplňkových ploch, určený z rovnice (6.38)

6.4.7 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_A \cdot T_{střA}^{sp} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{střA}^{sp}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{střA}^{sp}}} \quad (6.30)$$

kde a_{st} – je stupeň černosti povrchu stěn, podle [3] je $a_{st} = 0,8$ [-]

T_z – je absolutní teplota zaprášeného povrchu stěn [K]

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_{stř}^p + \left(\epsilon + \frac{1}{\alpha_k^p}\right) \cdot \frac{Q_{pIII A} + Q_{s,dpA}}{S_{pIII A}^{skut}} \cdot 1000 \quad (6.31)$$

$$t_z = 418,5 + \left(0,009 + \frac{1}{2841,57}\right) \cdot \frac{3339,49 + 123,67}{94,17} \cdot 1000 = 762,41 \text{ °C}$$

kde ϵ – je součinitel zanešení, pro šoty voleno podle [3] $\epsilon = 0,009$ [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,290 \cdot (888,37 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{762,41 + 273,15}{888,37 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{762,41 + 273,15}{888,37 + 273,15}} = 79,21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.4.8 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k^{sp} + \alpha_s) = 0,85 \cdot (53,47 + 79,21) = 112,78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.32)$$

kde ω – je součinitel využití plochy, podle [3] $\omega = 0,85$ [-]

6.4.9 Výkon předaný přehřívákem PIIIA

$$Q_{pIIIA}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{pIIIA}^{skut}}{1000} \quad (6.33)$$

kde k – je součinitel prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

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

Součinitel prostupu tepla

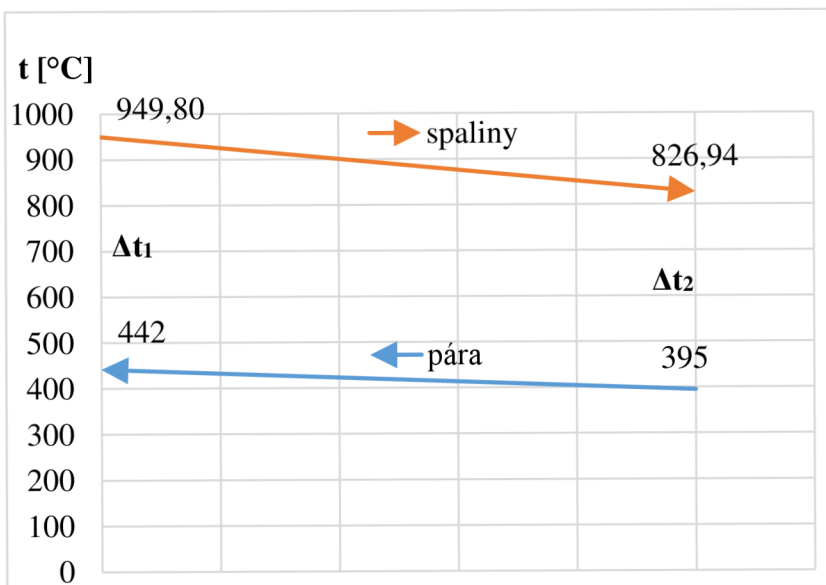
$$k = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_{sp}} + \frac{1}{\alpha_k^p}} = \frac{0,71}{\frac{1}{112,78} + \frac{1}{2841,57}} = 77,02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.34)$$

kde ψ – je součinitel tepelné efektivity desek, podle [3] $\psi = 0,71$ [-]

Střední logaritmický spád

Přehřívák IIIA je navržený jako protiproudý, rozložení jednotlivých teplot je v následujícím obrázku 6.3.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(949,80 - 442) - (826,94 - 395)}{2,3 \cdot \log\left(\frac{949,80 - 442}{826,94 - 395}\right)} = 469,37 \text{ °C} \quad (6.35)$$



Obrázek 6.3 Průběh teploty spalin a páry v místě přehříváku PIIIA

Výkon předaný přehřívákem PIIIA

$$Q_{pIIIA}^{tep} = \frac{77,02 \cdot 469,37 \cdot 94,17}{1000} = 3403,99 \text{ kW}$$

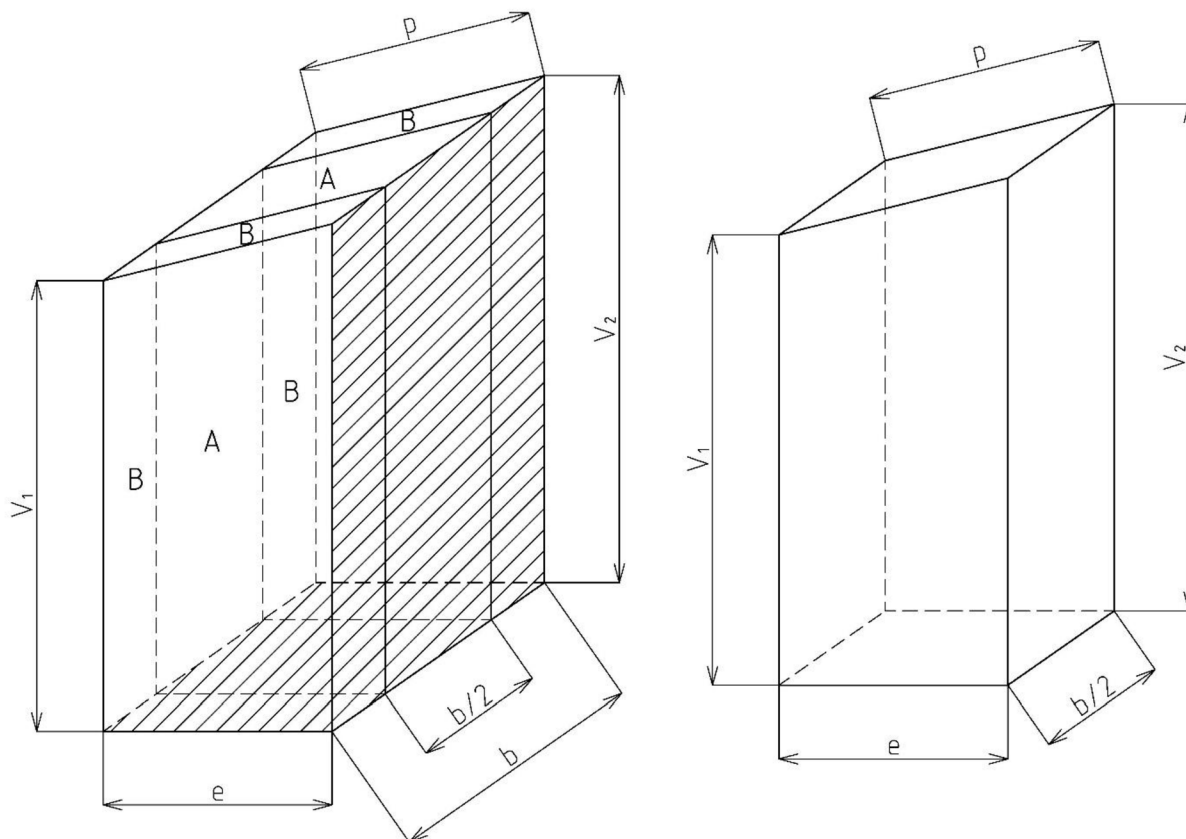
6.4.10 Bilance přehříváku PIIIA

$$x = \frac{Q_{pIIIA}^{tep} - Q_{pIIIA}}{Q_{pIIIA}^{tep}} \cdot 100 = \frac{3404,33 - 3339,49}{3404,33} = 1,90 \% \quad (6.36)$$

Tato hodnota leží v intervalu $\pm 2 \%$, bilance VYHOVUJE.

6.5 Doplnkové plochy v místě přehříváku PIIIA

Doplnkové plochy v místě přehříváku PIII jsou zobrazeny na následujícím obrázku 6.4 jako nevyšrafovaná místa. Tyto plochy jsou ve výpočtu rozděleny podle rozmístění na části A a B. V této kapitole jsou počítány pouze doplnkové plochy v místě A, které jsou označeny na levé části obrázku. V pravé části je pak zobrazen prostor, právě části A, která tvoří polovinu tahu.



Obrázek 6.4 Doplnkové plochy v místě přehříváku PIIIA

6.5.1 Geometrie

Výška prostoru $V_1 = 6,19$ m

Výška prostoru $V_2 = 6,55$ m

Šířka vstupního otvoru $e = 3,068$ m

Délka horní přepony $p = 3,212$ m

Hloubka tahu $b = 5,375$ m

Plocha doplnkových ploch části A

$$S_{dpA} = \frac{b}{2} \cdot (V_1 + p)$$

$$S_{dpA} = \frac{5,375}{2} \cdot (6,19 + 3,212)$$

$$S_{dpA} = 25,27 \text{ m}^2$$

(6.37)

Skutečná plocha doplňkových ploch části A

$$S_{dpA}^{skut} = x \cdot S_{dpA} = 0,8 \cdot 25,27 = 20,21 \text{ m}^2 \quad (6.38)$$

kde x – je úhlový součinitel membránové stěny, podle [3] $x = 0,8$ [-]

6.5.2 Parametry spalin

Parametry spalin odpovídají hodnotám vypočítaným v přehříváku PIIIA

Střední teplota spalin

$$t_{střA}^{sp} = 888,37^\circ\text{C}$$

Rychlost spalin

$$w_{spA} = 7,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,1050 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 0,0001536 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,621$ [-]

6.5.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \quad (6.39)$$

kde c_t – je opravný součinitel závislý na teplotě proudu a stěny, podle [3] $c_t = 1$ [-]

c_l – je opravný součinitel na poměrnou délku, podle [3] $c_l = 1$ [-]

d_e – je ekvivalentní průměr [m]

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot S_{stř}}{o_{stř}} \quad (6.40)$$

kde $S_{stř}$ – je střední průřez kanálu [m²]

$o_{stř}$ – je střední obvod kanálu [m]

Střední průřez kanálu

$$S_{stř} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{e \cdot \frac{b}{2} - D \cdot n_d \cdot \check{S}_{SA} + V_2 \cdot \frac{b}{2} - D \cdot n_d \cdot V_{2A}}{2} \quad (6.41)$$

$$S_{stř} = \frac{3,068 \cdot \frac{5,375}{2} - 0,0337 \cdot 6 \cdot 2,883 + 6,55 \cdot \frac{5,375}{2} - 0,0337 \cdot 6 \cdot 6,55}{2}$$

$$S_{stř} = 11,97 \text{ m}^2$$

kde S_1 – je vstupní průřez kanálu [m²]

S_2 – je výstupní průřez kanálu [m²]

Střední obvod kanálu

$$o_{stř} = \frac{o_1 + o_2}{2}$$

$$o_{stř} = \frac{2 \cdot \left(e + \frac{b}{2}\right) + 2 \cdot n_d \cdot \check{S}_{SA} + 2 \cdot \left(V_2 + \frac{b}{2}\right) + 2 \cdot n_d \cdot V_{2A}}{2} \quad (6.42)$$

$$o_{stř} = \frac{2 \cdot \left(3,068 + \frac{5,375}{2}\right) + 2 \cdot 6 \cdot 2,883 + 2 \cdot \left(6,55 + \frac{5,375}{2}\right) + 2 \cdot 6 \cdot 6,55}{2}$$

$$o_{stř} = 71,59 \text{ m}$$

kde o_1 – je vstupní obvod kanálu [m]
 o_2 – je výstupní obvod kanálu [m]

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot 11,97}{71,59} = 0,67 \text{ m}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,023 \cdot \frac{0,1050}{0,67} \cdot \left(\frac{7,00 \cdot 0,67}{0,0001536}\right)^{0,8} \cdot 0,621^{0,4} \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k^{sp} = 15,72 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.5.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_A \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{střA}^{sp}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{střA}^{sp}}} \quad (6.43)$$

kde a_A – hodnota stupně černosti spalin v přehříváku PIIIA [-]
 a_{st} – je stupeň černosti povrchu stěn, podle [3] je $a_{st} = 0,8$ [-]

Sálavý výkon zachycený doplňkovými plochami

$$Q_{s,dAdp} = \frac{S_{dpA}^{skut}}{S_{pIIIA}^{skut} + S_{dpA}^{skut}} \cdot Q_{s,dpA} = \frac{20,21}{94,17 + 20,21} \cdot 150,22 = 26,55 \text{ kW} \quad (6.44)$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_{stř}^p + \varepsilon \cdot \frac{Q_{pIIIA,dp}^{tep} + Q_{s,dAdp}}{S_{dpA}^{skut}} \cdot 1000$$

$$t_z = 319,44 + 0,0043 \cdot \frac{372 + 26,55}{20,21} \cdot 1000 = 398,57 \text{ °C} \quad (6.45)$$

kde ε – je součinitel zanešení, pro doplňkové plochy voleno podle [3]
 $\varepsilon = 0,0043 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}\text{]}$
 $t_{stř}^p$ – je střední teplota páry, v tomto případě, je to teplota ve výparníku [°C]
 $Q_{pIIIA,dp}^{tep}$ – je odhadovaný tepelný výkon doplňkových ploch [kW]

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,290 \cdot (888,37 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{398,57 + 273,15}{888,37 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{398,57 + 273,15}{888,37 + 273,15}} = 49,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.5.5 Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_{sp} = \alpha_k^{sp} + \alpha_s = 15,72 + 49,14 = 64,85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.46)$$

6.5.6 Výkon předaný doplňkovými plochami

$$Q_{pIII A, dp}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{dpA}^{skut}}{1000} \quad (6.47)$$

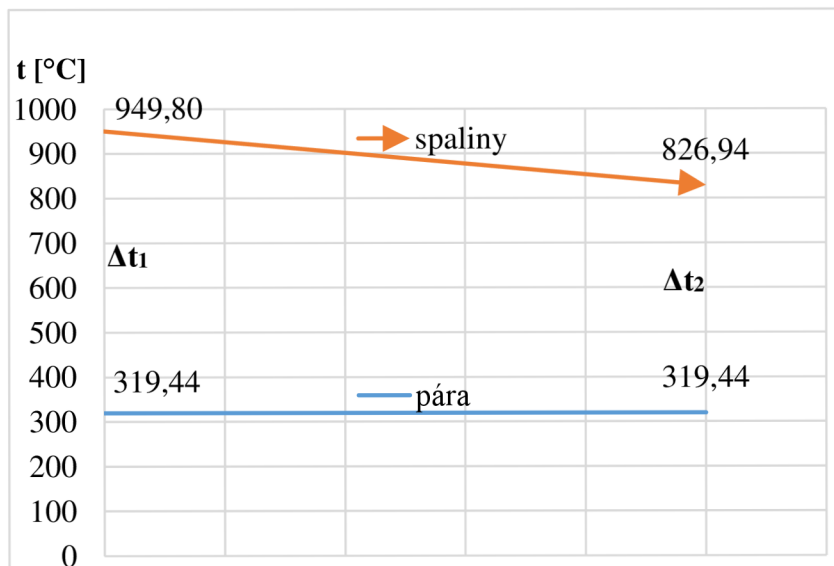
Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_{sp}}} = \frac{0,5}{\frac{1}{64,85}} = 32,43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.48)$$

kde ψ – je součinitel tepelné efektivity doplňkových ploch, podle odborné konzultace
 $\psi = 0,5$ [-]

Střední logaritmický spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(949,80 - 319,44) - (826,94 - 319,44)}{2,3 \cdot \log\left(\frac{949,80 - 319,44}{826,94 - 319,44}\right)} = 567,35 \text{ °C} \quad (6.49)$$



Obrázek 6.5 Průběh teploty páry a spalín v místě doplňkových ploch

Výkon předaný doplňkovými plochami

$$Q_{pIII A, dp}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{dpA}^{skut}}{1000} = \frac{32,43 \cdot 567,35 \cdot 20,21}{1000} = 371,89 \text{ kW}$$

6.6 Přeřívák PIIIB

6.6.1 Návrh geometrie

Vnější průměr trubek $D = 0,0337$ m

Vnitřní průměr trubek $d = 0,0237$ m

Počet trubek $n_{tr} = 10$

Počet desek $n_d = 6$

Výška desek $V_{2B} = 6,353$ m

Výška desek $V_{1B} = 6,282$ m

Střední výška desek $V_{stB} = 6,318$ m

Šířka desek $\check{S}_B = 0,946$ m

Šířka desek $\check{S}_{\check{S}B} = 2,631$ m

Mezera mezi hady $m_{\check{S}B} = 0,1$ m

Mezera mezi hady $m_{vB} = 0,2$ m

Podélná rozteč $S_{2B} = 0,047$ m

Příčná rozteč $S_{1B} = 0,425$ m

Rozměry vstupního kanálu

Šířka $a = 3,068$ m

Polovina hloubky tahu $b = 2,6875$ m

Plocha desek

$$S_{pIII B} = 2 \cdot n_d \cdot (\check{S}_B \cdot V_{stB} + (\check{S}_{\check{S}B} - \check{S}_B) \cdot (\check{S}_B - m_{vB}) - m_{\check{S}B} \cdot (V_{stB} - \check{S}_B) - m_{vB} \cdot 0,5 \cdot \check{S}_B + V_{stB} \cdot D) \quad (6.50)$$

$$S_{pIII B} = 2 \cdot 6 \cdot (0,946 \cdot 6,318 + (2,631 - 0,946) \cdot (0,946 - 0,2) - 0,1 \cdot (6,318 - 0,946) - 0,2 \cdot 0,5 \cdot 0,946 + 6,318 \cdot 0,0337) = 81,77 \text{ m}^2$$

Skutečná plocha desek

$$S_{pIII B}^{skut} = x \cdot S_{pIII A} = 0,8 \cdot 81,77 = 65,42 \text{ m}^2 \quad (6.51)$$

kde x – je úhlový součinitel desek, podle [3] $x = 0,8$ [-]

Střední průřez

$$F_{st} = \frac{2 \cdot F_{in} \cdot F_{out}}{F_{in} + F_{out}} \quad (6.52)$$

kde F_{in} – je vstupní průřez pro protékající spaliny [m^2]

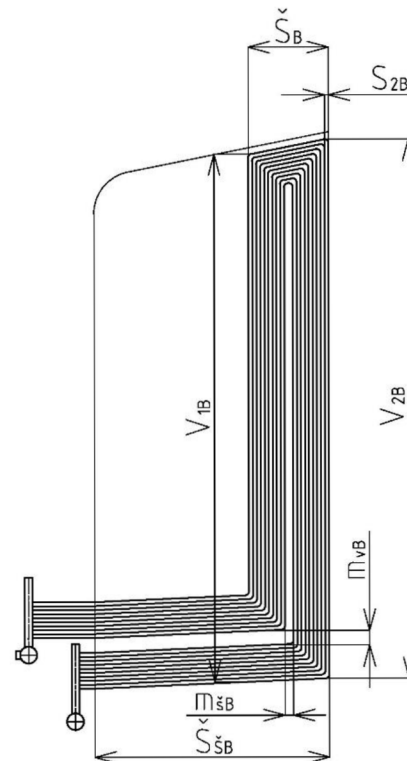
F_{out} – je výstupní průřez pro protékající spaliny [m^2]

Vstupní průřez

$$F_{in} = a \cdot b - n_d \cdot \check{S}_{\check{S}B} \cdot D = 3,068 \cdot 2,6875 - 6 \cdot 2,631 \cdot 0,0337 = 7,71 \text{ m}^2 \quad (6.53)$$

Výstupní průřez

$$F_{out} = V_{2A} \cdot b - n_d \cdot V_{2B} \cdot D = 6,55 \cdot 2,6875 - 6 \cdot 6,353 \cdot 0,0337 = 16,32 \text{ m}^2 \quad (6.54)$$



6.6 Přeřívák III část B

Střední průřez

$$F_{st} = \frac{2 \cdot 7,71 \cdot 16,32}{7,71 + 16,32} = 10,48 \text{ m}^2$$

6.6.2 Parametry spalín

Výstupní entalpie spalín

$$i_{outB} = i_{inB} - \frac{Q_{pIII B} + Q_{pIII B, dp}^{tep} - Q_{s, dpB}}{\frac{M_{pv}}{2} \cdot \varphi}$$

$$i_{outB} = 7153,03 - \frac{2334,38 + 962,83 - 135,92}{\frac{7,065}{2} \cdot 0,991} = 6249,53 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6.55)$$

kde i_{inB} – je entalpie na výstupu z ohniště, respektive na vstupu do PIII B [kJ·kg⁻¹]

$Q_{pIII B}$ – je parní výkon přehříváku PIII B [kW]

$Q_{pIII B, dp}^{tep}$ – je tepelný výkon doplňkových ploch, získaný podle rovnice (6.94) [kW]

$Q_{s, dpB}$ – je výkon sálání z ohniště, zachycený v prostoru PIII B, získaný dle rovnice (6.75) [kW]

Výstupní teplota spalín

Interpolací tabulky 2.4 pro entalpii i_{outB} je získána teplota spalín na výstupu z PIII B.

$$t_{outA} = 840,85 \text{ °C}$$

Střední teplota spalín

$$t_{střB}^{sp} = \frac{t_{inB} + t_{outB}}{2} = \frac{949,80 + 840,85}{2} = 895,33 \text{ °C} \quad (6.56)$$

kde t_{inB} – je teplota spalín na vstupu do šotů, je to zároveň i výstupní teplota z ohniště

Průtok spalín

$$V_{sp} = \frac{M_{pv}}{2} (O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}) \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15}$$

$$V_{sp} = \frac{7,065}{2} \cdot (3,88865 \cdot (1,324 - 1) \cdot 3,03456) \cdot \frac{895,33 + 273,15}{273,15} \quad (6.57)$$

$$V_{sp} = 73,47 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde α – je přebytek vzduchu v místě šotů [-]

Rychlost spalín

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{st}} = \frac{73,47}{10,48} = 7,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.58)$$

Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,1056 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 0,0001550 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,620 [-]$

6.6.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Tento součinitel je počítán pouze pro převládající příčné proudění.

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (6.59)$$

kde c_z – je oprava pro počet podélných řad, podle [3] $c_z = 1 [-]$

c_s – je oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči σ_1 a poměrné podélné rozteči $\sigma_2 [-]$

Koeficient c_s

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} \quad (6.60)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_{1B}}{D} = \frac{0,425}{0,0337} = 12,61 \quad (6.61)$$

Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_{2B}}{D} = \frac{0,047}{0,0337} = 1,39 \quad (6.62)$$

Koeficient c_s

pro $\sigma_1 > 3$ a $\sigma_2 \leq 1,5$ se dosazuje $\sigma_1 = 3$

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,39}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,85$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,85 \cdot \frac{0,1056}{0,0337} \cdot \left(\frac{7,01 \cdot 0,0337}{0,0001550} \right)^{0,65} \cdot 0,620^{0,33}$$

$$\alpha_k^{sp} = 53,49 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.6.4 Parametry média

Střední teplota páry

$$t_{stř}^p = \frac{t_{pIII B}^{out} + t_{pIII B}^{in}}{2} = \frac{478 + 442}{2} = 460 \text{ °C} \quad (6.63)$$

Střední tlak páry

$$p_{stř}^p = \frac{p_{pIII B}^{in} + p_{pIII B}^{out}}{2} = \frac{10,2 + 10}{2} = 10,1 \text{ MPa} \quad (6.64)$$

Fyzikální parametry Páry

Tyto parametry jsou získané pro střední tlak a teplotu pomocí programu [5].

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

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0716 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 8,17 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Prandtlovo číslo $Pr = 1,031 [-]$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{(m_{pp} - m_{vsII}) \cdot v}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_d} = \frac{(24,44 - 1,28) \cdot 0,0301}{\frac{\pi \cdot 0,0237^2}{4} \cdot 10 \cdot 6} = 26,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.65)$$

6.6.5 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

$$\alpha_k^p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \quad (6.66)$$

$$\alpha_k^p = 0,023 \cdot \frac{0,0716}{0,0237} \cdot \left(\frac{26,30 \cdot 0,0237}{8,17 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,031^{0,4} \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k^p = 3571,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde d_e – je ekvivalentní průměr (vnitřní průměr trubky) [m]

c_t – je opravný koeficient, závisí na teplotě stěny a proudu podle [3] $c_t = 1 [-]$

c_l – je opravný koeficient na poměrnou délku, podle [3] $c_l = 1 [-]$

6.6.6 Sálavý výkon z ohniště

Při výpočtu prvních dvou ploch ve směru proudění spalin (PIII a PIV) vstupuje do výpočtu sálavé teplo z ohniště, které bude určeno v následující kapitole.

$$Q_{SO} = q_o \cdot F_{vo} \quad (6.67)$$

kde q_o – je hustota tepelného toku výstupním průřezem [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$]

F_{vo} – je polovina průřezu výstupního otvoru ohniště (polovina je volena z důvodu toho, že část přehříváku B zabírá jen polovinu tahu) [m^2]

Hustota tepelného toku procházejícího výstupním průřezem deskového přehříváku

$$q_{svB} = q_m \cdot \frac{F_{vo}}{F_{sv}} \cdot (1 - a_B) \cdot \varphi_{o-sv} + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot \psi_{sv} \cdot a_B \cdot \left(\frac{T_{střB}^{sp}}{100} \right)^4 \quad (6.68)$$

kde F_{sv} – je výstupní průřez přehříváku, $F_{sv} = V_{2B} \cdot b$ [m^2]

a_B – je stupeň černosti spalin [-]

φ_{o-sv} – je úhlový součinitel ohniště [-]

ψ_{sv} – je součinitel tepelné efektivity svazku, podle [3] $\psi_{sv} = 0,5 [-]$

$q_m \cdot q_o$ – hodnoty jsou shodné s kapitolou 6.4.6 [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$]

Stupeň černosti spalin

$$a_B = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (6.69)$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s_B = 3,6 \cdot \frac{V_0}{S_{pIII B} + S_0} = 3,6 \cdot \frac{52,52}{81,77 + 129,28} = 0,896 \text{ m} \quad (6.70)$$

kde V_0 – je objem prostoru desek [m^3]

S_0 – je projekční povrch prostoru desek [m^2]

Součinitel zeslabení sálení nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{střB}^{sp}}{100} \right) \cdot r_{sp}$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,19887}{3,16 \cdot \sqrt{0,03199 \cdot 0,896}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{273,15 + 895,33}{100} \right) \cdot 0,31999 \quad (6.71)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 3,630 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálení popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{ok}^2 \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(895,33 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \cdot 2,77868 \quad (6.72)$$

$$k_p \cdot \mu = 0,152 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

kde d – je střední efektivní průměr částic popílku [μm], pro roštové kotle podle [3] je $d = 20 \mu\text{m}$

Součinitel zeslabení sálení

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu \quad (6.73)$$

$$k = 3,630 + 0,152 = 3,782 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Stupeň černosti spalin

$$a_B = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-3,782 \cdot 0,1 \cdot 0,896} = 0,287$$

Úhlový součinitel ohniště

$$\varphi_{o-sv} = \sqrt{\left(\frac{\check{S}_B}{S_{1B}} \right)^2 + 1} - \frac{\check{S}_B}{S_{1B}} = \sqrt{\left(\frac{0,946}{0,425} \right)^2 + 1} - \frac{0,946}{0,425} = 0,214 \quad (6.74)$$

Hustota tepelného toku procházejícího výstupním průřezem deskového přehříváku

$$q_{svB} = 88,08 \cdot \frac{3,068 \cdot 2,6875}{2,6875 \cdot 6,353} \cdot (1 - 0,287) \cdot 0,214 + 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 0,287$$

$$\cdot \left(\frac{895,33 + 273,15}{100} \right)^4$$

$$q_{svB} = 19,69 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$$

Sálavý výkon z ohniště a z prostoru deskového přehříváku zachycený v prostoru deskového přehříváku

$$\begin{aligned} Q_{s,dpB} &= q_o \cdot F_{vo} - q_{sv} \cdot F_{sv} \\ Q_{s,dpB} &= 57,25 \cdot 3,068 \cdot 2,6875 - 19,69 \cdot 2,6875 \cdot 6,353 \\ Q_{s,dpB} &= 135,92 \text{ kW} \end{aligned} \quad (6.75)$$

Sálavé výkon zachycený přehřívákem

$$Q_{s,dB} = \frac{S_{pIII B}^{skut}}{S_{pIII B}^{skut} + S_{dpB}^{skut}} \cdot Q_{s,dpB} = \frac{65,42}{65,42 + 51,48} \cdot 135,92 = 75,06 \text{ kW} \quad (6.76)$$

kde S_{dpB}^{skut} – je skutečný obsah doplňkových ploch, určený z rovnice (6.85) [m²]

6.6.7 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_B \cdot T_{střB}^{sp}{}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{střB}^{sp}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{střB}^{sp}}} \quad (6.77)$$

kde a_{st} – je stupeň černosti povrchu stěn, podle [3] je $a_{st} = 0,8$ [-]

T_z – je absolutní teplota zaprášeného povrchu stěn [K]

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$\begin{aligned} t_z &= t_{stř}^p + \left(\epsilon + \frac{1}{\alpha_k^p}\right) \cdot \frac{Q_{pIII B} + Q_{s,dpB}}{S_{pIII B}^{skut}} \cdot 1000 \\ t_z &= 460 + \left(0,009 + \frac{1}{3571,67}\right) \cdot \frac{2334,38 + 75,06}{65,42} \cdot 1000 = 801,93 \text{ °C} \end{aligned} \quad (6.78)$$

kde ϵ – je součinitel zanešení, pro šoty voleno podle [3] $\epsilon = 0,009$ [m²·K·W⁻¹]

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,287 \cdot (895,33 + 273,15)^3 \cdot \\ &\cdot \frac{1 - \left(\frac{801,93 + 273,15}{895,33 + 273,15}\right)^4}{1 - \left(\frac{801,93 + 273,15}{895,33 + 273,15}\right)} = 83,39 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

6.6.8 Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k^{sp} + \alpha_s) = 0,85 \cdot (53,49 + 83,39) = 116,35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.79)$$

kde ω – je součinitel využití plochy, podle [3] $\omega = 0,85$ [-]

6.6.9 Výkon předaný přehřívákem PIII B

$$Q_{pIII B}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{pIII B}^{skut}}{1000} \quad (6.80)$$

kde k – je součinitel prostupu tepla [W·m⁻²·K⁻¹]

Δt – je střední logaritmický spád [°C]

Součinitel prostupu tepla

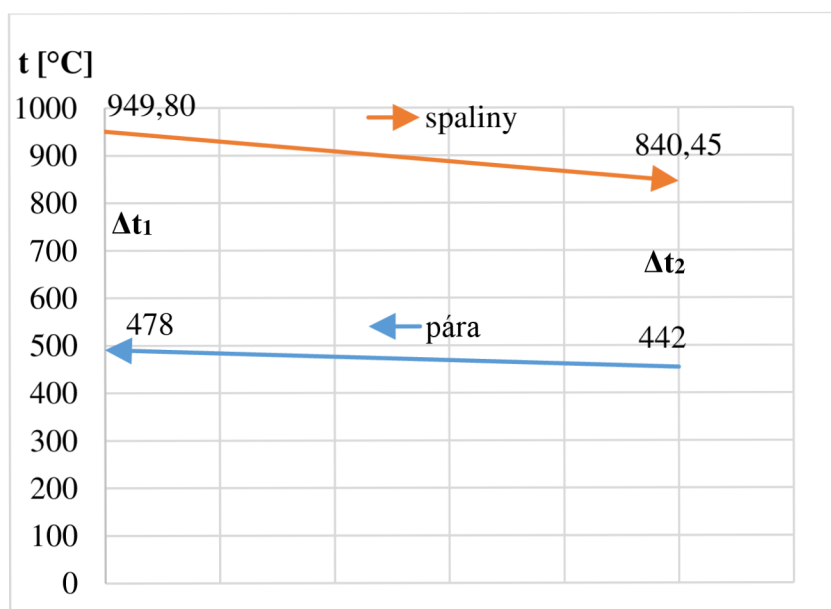
$$k = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_{sp}} + \frac{1}{\alpha_k^p}} = \frac{0,71}{\frac{1}{116,35} + \frac{1}{3571,67}} = 82,61 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.81)$$

kde ψ – je součinitel tepelné efektivity desek, podle [3] $\psi = 0,71$ [-]

Střední logaritmický spád

Přehřívač IIIB je navržený jako protiproudý, rozložení jednotlivých teplot je v následujícím obrázku 6.7.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(949,80 - 478) - (840,45 - 442)}{2,3 \cdot \log\left(\frac{949,80 - 478}{840,45 - 442}\right)} = 434,80 \text{ °C} \quad (6.82)$$



Obrázek 6.7 Průběh teploty spalín a páry v místě přehřívačku PIIIB

Výkon předaný přehřívačkem PIIIB

$$Q_{pIIIB}^{tep} = \frac{82,61 \cdot 434,80 \cdot 65,42}{1000} = 2349,70 \text{ kW}$$

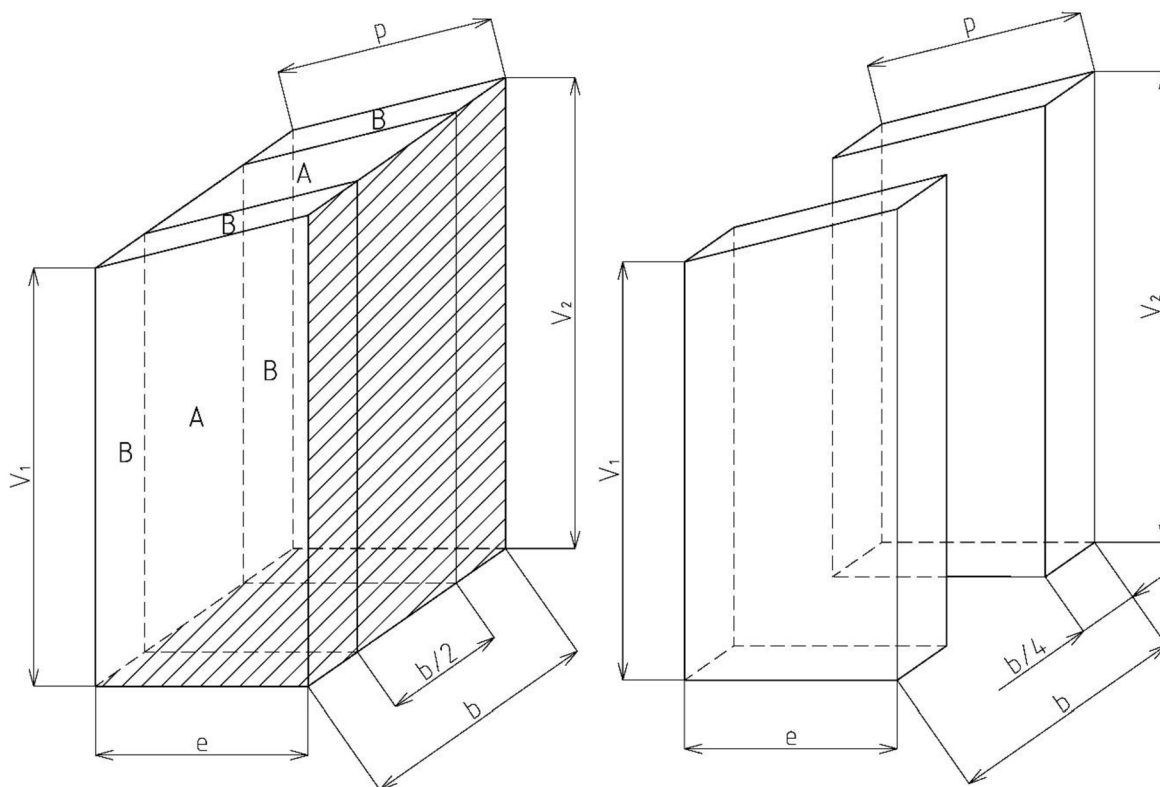
6.6.10 Bilance přehřívačku PIIIB

$$x = \frac{Q_{pIIIB}^{tep} - Q_{pIIIB}}{Q_{pIIIB}^{tep}} \cdot 100 = \frac{2349,70 - 2317,76}{2349,70} \cdot 100 = 0,65 \% \quad (6.83)$$

Tato hodnota leží v intervalu $\pm 2 \%$, bilance VYHOVUJE.

6.7 Doplnkové plochy v místě přehříváku PIIIB

Doplnkové plochy v místě přehříváku PIII jsou zobrazeny na následujícím obrázku, jako nevyšrafovaná místa. Tyto plochy jsou ve výpočtu rozděleny podle rozmístění na části A a B. V této kapitole jsou počítány pouze doplnkové plochy v místě B, které jsou označeny na levé části obrázku. V pravé části je pak zobrazen prostor části B, která tvoří polovinu tahu.



6.8 Doplnkové plochy v místě přehříváku PIIIB

6.7.1 Geometrie

Výška prostoru $V_1 = 6,19$ m

Výška prostoru $V_2 = 6,55$ m

Šířka vstupního otvoru $e = 3,068$ m

Délka horní přepony $p = 3,212$ m

Hloubka tahu $b = 5,375$ m

Plocha doplnkových ploch části B

$$S_{dpB} = \frac{b}{2} \cdot (V_1 + p) + 2 \cdot V_2 \cdot e - (V_2 - V_1) \cdot e$$

$$S_{dpB} = \frac{5,375}{2} \cdot (6,19 + 3,212) + 2 \cdot 6,55 \cdot 3,068 - (6,55 - 6,19) \cdot 3,068 \quad (6.84)$$

$$S_{dpB} = 64,35 \text{ m}^2$$

Skutečná plocha doplnkových ploch části B

$$S_{dpB}^{skut} = x \cdot S_{dpB} = 0,8 \cdot 64,35 = 51,48 \text{ m}^2 \quad (6.85)$$

kde x – je úhlový součinitel membránové stěny, podle [3] $x = 0,8$ [-]

6.7.2 Parametry spalin

Parametry spalin odpovídají hodnotám z výpočtu přehříváku PIIIB.

Střední teplota spalin

$$t_{střB}^{sp} = 895,33 \text{ °C}$$

Rychlost spalin

$$w_{spB} = 7,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,1056 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 0,0001550 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,620 [-]$

6.7.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \quad (6.86)$$

kde c_t – je opravný součinitel závislý na teplotě proudu a stěny, podle [3] $c_t = 1 [-]$

c_l – je opravný součinitel na poměrnou délku, podle [3] $c_l = 1 [-]$

d_e – je ekvivalentní průměr [m]

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot S_{stř}}{o_{stř}} \quad (6.87)$$

kde $S_{stř}$ – je střední průřez kanálu [m²]

$o_{stř}$ – je střední obvod kanálu [m]

Střední průřez kanálu

$$S_{stř} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{e \cdot \frac{b}{2} - D \cdot n_d \cdot \check{S}_{SB} + V_2 \cdot \frac{b}{2} - D \cdot n_d \cdot V_{2B}}{2} \quad (6.88)$$

$$S_{stř} = \frac{3,068 \cdot \frac{5,375}{2} - 0,0337 \cdot 6 \cdot 2,631 + 6,55 \cdot \frac{5,375}{2} - 0,0337 \cdot 6 \cdot 6,353}{2}$$

$$S_{stř} = 12,02 \text{ m}^2$$

kde S_1 – je vstupní průřez kanálu [m²]

S_2 – je výstupní průřez kanálu [m²]

Střední obvod kanálu

$$o_{stř} = \frac{o_1 + o_2}{2} = \frac{4 \cdot \left(e + \frac{b}{4}\right) + 2 \cdot n_d \cdot \check{s}_{SB} + 4 \cdot \left(V_2 + \frac{b}{4}\right) + 2 \cdot n_d \cdot V_{2B}}{2}$$

$$o_{stř} = \frac{4 \cdot \left(3,068 + \frac{5,375}{4}\right) + 2 \cdot 6 \cdot 2,631 + 4 \cdot \left(6,55 + \frac{5,375}{4}\right) + 2 \cdot 6 \cdot 6,353}{2} \quad (6.89)$$

$$o_{stř} = 76,75 \text{ m}$$

kde o_1 – je vstupní obvod kanálu [m]

o_2 – je výstupní obvod kanálu [m]

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot 12,02}{76,75} = 0,63 \text{ m}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$a_k^{sp} = 0,023 \cdot \frac{0,1056}{0,63} \cdot \left(\frac{7,01 \cdot 0,63}{0,0001550}\right)^{0,8} \cdot 0,620^{0,4} \cdot 1 \cdot 1$$

$$a_k^{sp} = 15,71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_B \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{střB}^{sp}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{střB}^{sp}}} \quad (6.90)$$

kde a_B – hodnota stupně černosti spalin v přehříváku PIIIB [-]

a_{st} – je stupeň černosti povrchu stěn, podle [3] je $a_{st} = 0,8$ [-]

Sálavé výkon zachycené doplňkovými plochami

$$Q_{s,dBdp} = \frac{S_{dpB}^{skut}}{S_{pIIIB}^{skut} + S_{dpB}^{skut}} \cdot Q_{s,dpB} = \frac{51,48}{65,42 + 51,48} \cdot 135,92 = 59,86 \text{ kW} \quad (6.91)$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_{stř}^p + \varepsilon \cdot \frac{Q_{pIIIB,dp}^{tep} + Q_{s,dBdp}}{S_{dpA}^{skut}} \cdot 1000$$

$$t_z = 319,44 + 0,0043 \cdot \frac{953 + 56,86}{51,48} \cdot 1000 = 399,87 \text{ °C} \quad (6.92)$$

kde ε – je součinitel zanešení, pro doplňkové plochy voleno podle [3]

$\varepsilon = 0,0043 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}\text{]}$

$t_{stř}^p$ – je střední teplota páry, v tomto případě, je to teplota ve výparníku [°C]

$Q_{pIIIB,dp}^{tep}$ – je odhadovaný tepelný výkon doplňkových ploch [kW]

6.7.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,287 \cdot (895,33 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{399,87 + 273,15}{895,33 + 273,15}\right)^4}{1 - \frac{399,87 + 273,15}{895,33 + 273,15}} = 49,37 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.7.5 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{sp} = \alpha_k^{sp} + \alpha_s = 15,71 + 49,37 = 65,07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.93)$$

6.7.6 Výkon předaný doplňkovými plochami

$$Q_{plIB,dp}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{dpB}^{skut}}{1000} \quad (6.94)$$

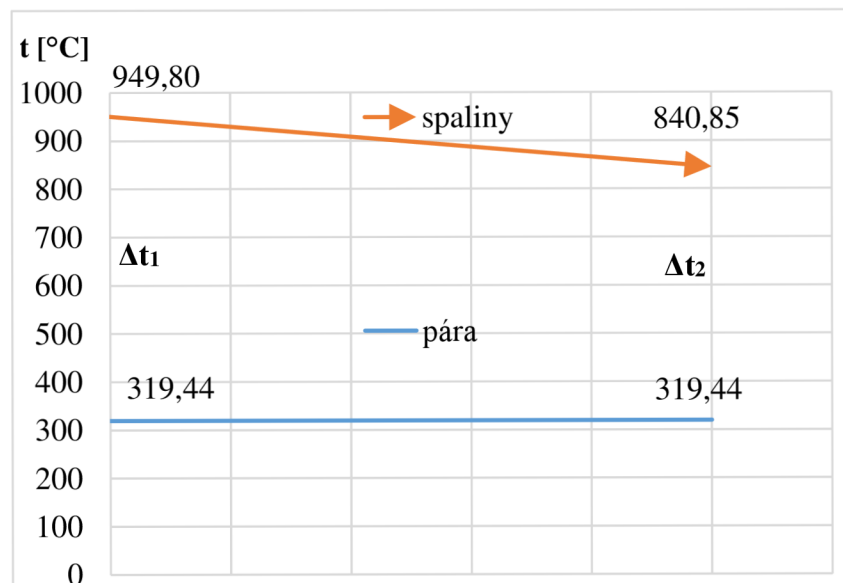
Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_{sp}}} = \frac{0,5}{\frac{1}{65,07}} = 32,53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.95)$$

kde ψ – je součinitel tepelné efektivity doplňkových ploch, podle odborné konzultace
 $\psi = 0,5$ [-]

Střední logaritmický spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(949,80 - 319,44) - (840,85 - 319,44)}{2,3 \cdot \log\left(\frac{949,80 - 319,44}{840,85 - 319,44}\right)} = 574,81 \text{ °C} \quad (6.96)$$



Obrázek 6.9 Průběh teploty páry a spalin v místě doplňkových ploch

Výkon předaný doplňkovými plochami

$$Q_{plIB,dp}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{dpA}^{skut}}{1000} = \frac{32,53 \cdot 574,81 \cdot 54,48}{1000} = 962,83 \text{ kW}$$

6.8 Přeřívák PIV

Přeřívák PIV je tvořen dvojhady.

6.8.1 Návrh geometrie

Vnější průměr trubek $D = 0,038$ m

Vnitřní průměr trubek $d = 0,028$ m

Počet trubek v řadě $n_{tr} = 30$

Počet řad $n_r = 16$

Vstupní výška trubek $V_1 = 6,040$ m

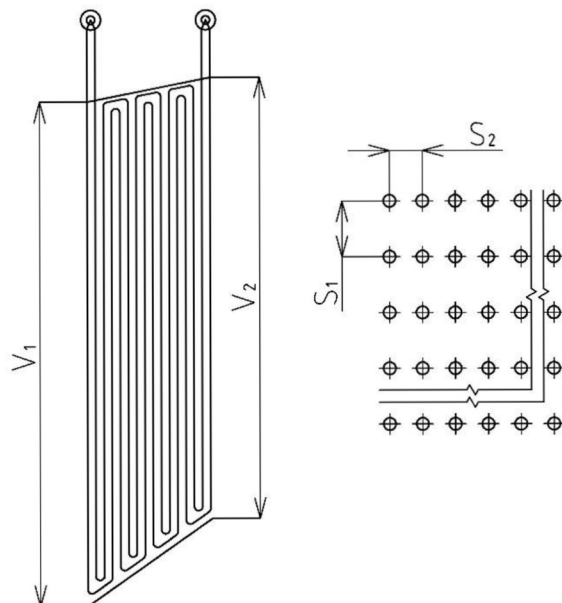
Výstupní výška trubek $V_2 = 5,282$ m

Střední výška trubek $V_{st} = 5,611$ m

Podélná rozteč $S_2 = 0,1$ m

Příčná rozteč $S_1 = 0,17$ m

Hloubka tahu $b = 5,375$ m



6.10 Přeřívák PIV

Plocha trubek

$$S_{pIV} = \pi \cdot D \cdot n_{tr} \cdot n_r \cdot V_{st} = \pi \cdot 0,038 \cdot 30 \cdot 16 \cdot 5,611 = 332,99 \text{ m}^2 \quad (6.97)$$

Střední průřez

$$F_{st} = \frac{2 \cdot F_{in} \cdot F_{out}}{F_{in} + F_{out}} \quad (6.98)$$

kde F_{in} – je vstupní průřez pro protékající spaliny [m^2]

F_{out} – je výstupní průřez pro protékající spaliny [m^2]

Vstupní průřez

$$F_{in} = V_2 \cdot b - n_{tr} \cdot V_2 \cdot D = 6,040 \cdot 5,375 - 30 \cdot 6,040 \cdot 0,038 = 25,58 \text{ m}^2 \quad (6.99)$$

Výstupní průřez

$$F_{out} = V_1 \cdot b - n_{tr} \cdot V_1 \cdot D = 5,582 \cdot 5,375 - 30 \cdot 5,282 \cdot 0,038 = 22,40 \text{ m}^2 \quad (6.100)$$

Střední průřez

$$F_{st} = \frac{2 \cdot 25,58 \cdot 22,40}{25,58 + 22,40} = 23,87 \text{ m}^2$$

6.8.2 Parametry spalin

Výstupní entalpie spalin

$$i_{out} = i_{in} - \frac{Q_{pIV} + Q_{pIV,dp}^{tep} - Q_{s,dp}}{M_{pv} \cdot \varphi}$$

$$i_{out} = \frac{6135,18 + 6249,53}{2} - \frac{6186,76 + 277,71 - 616,32}{7,065 \cdot 0,991}$$

$$i_{out} = 5356,58 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde i_{in} – je entalpie na výstupu z PIII (aritmetický průměr části A a B) [kJ·kg⁻¹]

Q_{pIV} – je parní výkon přehříváku PIV [kW]

$Q_{pIV,dp}^{tep}$ – je tepelný výkon doplňkových ploch, získaný podle rovnice (6.147) [kW]

$Q_{s,dp}$ – je výkon sálání z ohniště, zachycený v prostoru PIV, získaný dle rovnice (6.113) [kW]

Výstupní teplota spalin

Interpolací tabulky 2.4 pro entalpii i_{out} je získána teplota spalin na výstupu z PIV.

$$t_{out} = 730,75 \text{ °C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{833,90 + 730,75}{2} = 782,32 \text{ °C}$$

kde t_{in} – je teplota spalin na vstupu do přehříváku PIV (aritmetický průměr teplot na výstupu přehříváků PIIIA a PIIIB) [°C]

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot (O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}) \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15}$$

$$V_{sp} = 7,065 \cdot (3,88865 \cdot (1,324 - 1) \cdot 3,03456) \cdot \frac{782,32 + 273,15}{273,15}$$

$$V_{sp} = 132,72 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde α – je přebytek vzduchu v místě přehříváku PIV [-]

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{st}} = \frac{132,72}{23,87} = 5,56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0955 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 0,0001313 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,632$ [-]

6.8.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Tento součinitel je počítán pouze pro převládající příčné proudění.

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot P_r^{0,33} \quad (6.105)$$

kde c_z – je oprava pro počet podélných řad, podle [3] $c_z = 1$ [-]

c_s – je oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči σ_1 a poměrné podélné rozteči σ_2 , pro $\sigma_2 \geq 2$ se dosazuje $c_s = 1$ [-]

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,17}{0,038} = 4,47 \quad (6.106)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,1}{0,038} = 2,63 \quad (6.107)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0955}{0,038} \cdot \left(\frac{5,56 \cdot 0,038}{0,0001313} \right)^{0,65} \cdot 0,632^{0,33}$$

$$\alpha_k^{sp} = 52,46 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.8.4 Parametry média

Střední teplota páry

$$t_{stř}^p = \frac{t_{pIV}^{out} + t_{pIV}^{in}}{2} = \frac{520 + 427}{2} = 473,5 \text{ °C} \quad (6.108)$$

Střední tlak páry

$$p_{stř}^p = \frac{p_{pIV}^{in} + p_{pIV}^{out}}{2} = \frac{10 + 9,6}{2} = 9,8 \text{ MPa} \quad (6.109)$$

Fyzikální parametry Páry

Tyto parametry jsou získané pro střední tlak a teplotu pomocí programu [5].

Střední měrný objem $\nu = 0,0318 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0725 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 8,84 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Prandtlovo číslo $Pr = 1,014$ [-]

Rychlost páry

$$w_p = \frac{m_{pp} \cdot \nu}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot 2} = \frac{24,44 \cdot 0,0318}{\frac{\pi \cdot 0,028^2}{4} \cdot 30 \cdot 2} = 21,07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.110)$$

6.8.5 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

$$\alpha_k^p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot P_r^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l$$

$$\alpha_k^p = 0,023 \cdot \frac{0,0725}{0,028} \cdot \left(\frac{21,07 \cdot 0,028}{8,84 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,014^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \quad (6.111)$$

$$\alpha_k^p = 2732,19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde d_e – je ekvivalentní průměr (vnitřní průměr trubky) [m]

c_t – je opravný koeficient, závisí na teplotě stěny a proudu podle [3] $c_t = 1$ [-]

c_l – je opravný koeficient na poměrnou délku, podle [3] $c_l = 1$ [-]

6.8.6 Sálavé teplo

Hustota tepelného toku přicházejícího z deskového přehříváku PIII

$$q_{sv} = \frac{q_{svA} + q_{svB}}{2} = \frac{18,28 + 19,69}{2} = 18,98 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (6.112)$$

Sálavý výkon z prostoru deskového přehříváku zachycený v prostoru přehříváku PIV

Podle [3] se veškeré teplo vysálané z ohniště zachytí na prvních dvou plochách, takže veškeré zbytkové sálání procházející přehřívákem PIII se zachytí v přehříváku PIV.

$$Q_{s,dp} = q_{sv} \cdot F_{sv} \quad (6.113)$$

$$Q_{s,dp} = q_{sv} \cdot V_1 \cdot b = 18,98 \cdot 6,04 \cdot 5,375 = 616,32 \text{ kW}$$

Sálavý výkon zachycený přehřívákem

$$Q_{s,d} = \frac{S_{pIV}}{S_{pIV} + S_{dp}^{skut}} \cdot Q_{s,dp} = \frac{332,99}{332,99 + 28,06} \cdot 616,32 = 567,25 \text{ kW} \quad (6.114)$$

kde S_{dp}^{skut} – je skutečný obsah doplňkových ploch, určený podle rovnice (6.128) [m²]

6.8.7 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = k_0 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (6.115)$$

kde a_{st} – je stupeň černosti povrchu stěn, podle [3] je $a_{st} = 0,8$ [-]

k_0 – je součinitel vlivu sálání volných objemů před svazkem [-]

Vliv sálání volných objemů před svazkem

$$k_0 = 1 + A \cdot \left(\frac{T_0}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{l_0}{l_s}\right)^{0,07}$$

$$k_0 = 1 + 0,5 \cdot \left(\frac{\frac{826,94 + 840,85}{2} + 273,15}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{0,18}{1,5}\right)^{0,07} = 1,44 \quad (6.116)$$

kde A – je součinitel zohledňující druh paliva, podle [3] voleno $A = 0,5$ [-]
 T_0 – je absolutní teplota ve volném objemu, před svazkem [K]
 l_0 – je hloubka volného objemu, hodnota odečtena z výkresu $l_0 = 0,18$ m
 l_s – je šířka přehříváku PIV, $l_s = 1,5$ m

Stupeň černosti spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (6.117)$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,17 \cdot 0,1}{0,038^2} - 1\right) = 0,478 \text{ m} \quad (6.118)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítvými třiatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{100}\right) \cdot r_{sp}$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,19887}{3,16 \cdot \sqrt{0,03199 \cdot 0,478}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{273,15 + 782,32}{100}\right) \cdot 0,31999 \quad (6.119)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 5,398 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{stř}^{sp2} \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(782,32 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \cdot 2,77868 \quad (6.120)$$

$$k_p \cdot \mu = 0,162 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

kde d – je střední efektivní průměr částic popílku [μm], pro roštové kotle podle [3]
je $d = 20 \mu\text{m}$

Součinitel zeslabení sálání

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu \quad (6.121)$$

$$k = 5,398 + 0,162 = 5,560 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Stupeň černosti spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-5,560 \cdot 0,1 \cdot 0,478} = 0,234$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_{stř}^p + \left(\epsilon + \frac{1}{\alpha_k^p} \right) \cdot \frac{Q_{pIV} + Q_{s,d}}{S_{pIV}} \cdot 1000 \quad (6.122)$$

$$t_z = 473,5 + \left(0,0043 + \frac{1}{2732,19} \right) \cdot \frac{6186,76 + 567,25}{324,39} \cdot 1000 = 570,65 \text{ °C}$$

kde ϵ – je součinitel zanešení, pro šoty voleno podle [3] $\epsilon = 0,0043 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}\text{]}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 1,44 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,234 \cdot (782,32 + 273,15)^3 \cdot$$

$$\cdot \frac{1 - \left(\frac{570,65 + 273,15}{782,32 + 273,15} \right)^4}{1 - \left(\frac{570,65 + 273,15}{782,32 + 273,15} \right)} = 59,93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.8.8 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k^{sp} + \alpha_s) = 1 \cdot (52,46 + 59,93) = 112,39 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.123)$$

kde ω – je součinitel využití plochy, podle [3] $\omega = 1 \text{ [-]}$

6.8.9 Výkon předaný přehřívákem PIV

$$Q_{pIV}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{pIV}}{1000} \quad (6.124)$$

Součinitel prostupu tepla

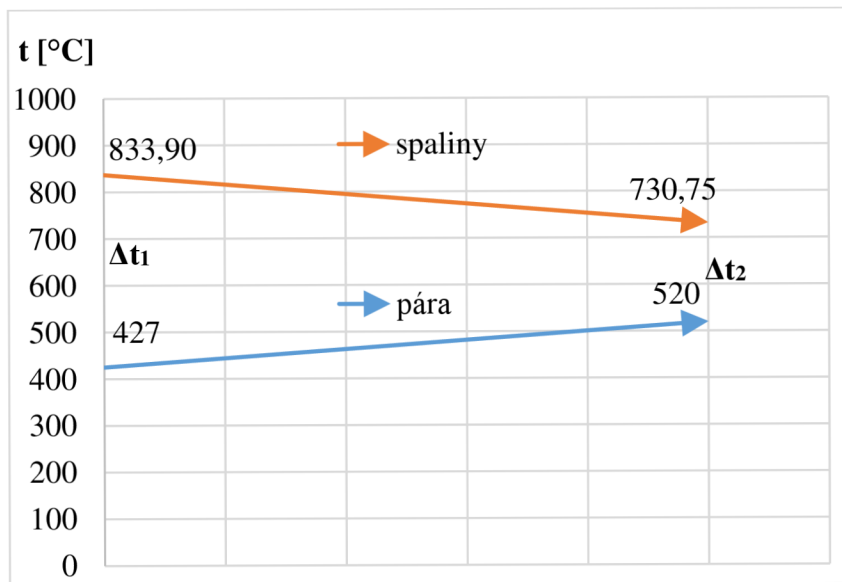
$$k = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_{sp}} + \frac{1}{\alpha_k^p}} = \frac{0,6}{\frac{1}{112,39} + \frac{1}{2732,19}} = 64,77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.125)$$

kde ψ – je součinitel tepelné efektivity přehříváku, podle [3] $\psi = 0,6 \text{ [-]}$

Střední logaritmický spád

Přehřívák IV je navržený jako souprůdný, rozložení jednotlivých teplot je v následujícím obrázku 6.11.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{(833,90 - 427) - (730,75 - 520)}{2,3 \cdot \log \left(\frac{833,90 - 427}{732,04 - 520} \right)} = 298,48 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.126)$$



Obrázek 6.11 Průběh teploty spalín a páry v místě přehříváku PIV

Výkon předaný přehřívákem PIV

$$Q_{pIV}^{tep} = \frac{64,77 \cdot 298,48 \cdot 324,39}{1000} = 6271,15 \text{ kW}$$

6.8.10 Bilance přehříváku PIV

$$x = \frac{Q_{pIV}^{tep} - Q_{pIV}}{Q_{pIV}^{tep}} \cdot 100 = \frac{6271,15 - 6186,76}{6271,15} = 1,36 \% \quad (6.127)$$

Tato hodnota leží v intervalu $\pm 2 \%$, bilance VYHOVUJE.

6.9 Doplnkové plochy v místě přehříváku PIV

Doplnkové plochy v místě PIV jsou zobrazeny na následujícím obrázku, jako nevyšrafovaná místa.

6.9.1 Geometrie

Výška vstupního kanálu $V_1 = 6,04$ m

Výška výstupního kanálu $V_2 = 5,282$ m

Střední výška kanálu $V_{stř} = 5,661$ m

Šířka kanálu $\check{s} = 1,5$ m

Délka spodní přepony $p_1 = 1,836$ m

Délka horní přepony $p_2 = 1,530$ m

Spodní výškový rozdíl $r_1 = 1,058$ m

Horní výškový rozdíl $r_2 = 0,3$ m

Hloubka tahu $b = 5,375$ m

Plocha doplňkových ploch

$$S_{dp} = 2 \cdot \check{s} \cdot [(V_2 + r_1) - 0,5 \cdot (r_1 + r_2)] + b \cdot (p_1 + p_2)$$

$$S_{dp} = 2 \cdot 1,5 \cdot [(5,282 + 1,058) - 0,5 \cdot (1,058 + 0,3)] + 5,375 \cdot (1,836 + 1,530)$$

$$S_{dp} = 35,08 \text{ m}^2$$

Skutečná plocha doplňkových ploch části A

$$S_{dp}^{skut} = x \cdot S_{dp} = 0,8 \cdot 35,08 = 28,06 \text{ m}^2 \quad (6.128)$$

kde x – je úhlový součinitel membránové stěny, podle [3] $x = 0,8$ [-]

6.9.2 Parametry spalin

Parametry spalin se shodují s parametry s výpočtu Přehříváku PIV.

Střední teplota spalin

$$t_{stř}^{sp} = 782,32 \text{ °C}$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = 5,56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

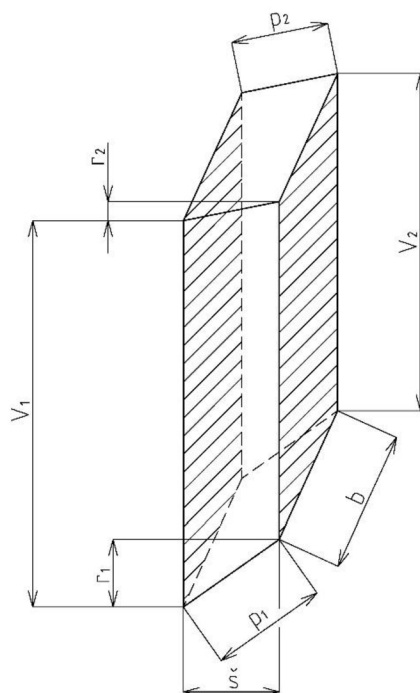
Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0955 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 0,0001313 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,632$ [-]



6.12 Doplnkové plochy

6.9.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \quad (6.129)$$

kde c_t – je opravný součinitel závislý na teplotě proudu a stěny, podle [3] $c_t = 1$ [-]

c_l – je opravný součinitel na poměrnou délku, podle [3] $c_l = 1$ [-]

d_e – je ekvivalentní průměr [m]

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot S_{stř}}{o_{stř}} \quad (6.130)$$

kde $S_{stř}$ – je střední průřez kanálu [m²]

$o_{stř}$ – je střední obvod kanálu [m]

Střední průřez kanálu

$$S_{stř} = V_{stř} \cdot b - D \cdot n_{tr} \cdot V_{stř} = 5,661 \cdot 5,375 - 0,038 \cdot 30 \cdot 5,661$$

$$S_{stř} = 22,37 \text{ m}^2 \quad (6.131)$$

Střední obvod kanálu

$$o_{stř} = 2 \cdot (V_{stř} + b) + 2 \cdot n_{tr} \cdot V_{stř} = 2 \cdot (5,661 + 5,375) + 2 \cdot 30 \cdot 5,661$$

$$o_{stř} = 361,73 \text{ m} \quad (6.132)$$

kde o_1 – je vstupní obvod kanálu [m]

o_2 – je výstupní obvod kanálu [m]

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot 22,37}{361,73} = 0,25 \text{ m}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,023 \cdot \frac{0,0955}{0,25} \cdot \left(\frac{5,56 \cdot 0,25}{0,0001313} \right)^{0,8} \cdot 0,632^{0,4} \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k^{sp} = 12,16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.9.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (6.133)$$

kde a – hodnota stupně černosti spalin, může být brána z výpočtu přehříváku PIV [-]

a_{st} – je stupeň černosti povrchu stěn, podle [3] je $a_{st} = 0,8$ [-]

Sálavý výkon zachycený doplňkovými plochami

$$Q_{s,dap} = \frac{S_{dap}^{skut}}{S_{PIV} + S_{dap}^{skut}} \cdot Q_{s,dp} = \frac{28,06}{324,39 + 28,06} \cdot 616,32 = 49,07 \text{ kW} \quad (6.134)$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_{stř}^p + \varepsilon \cdot \frac{Q_{pIV,dp}^{tep} + Q_{s,d}}{S_{dp}^{skut}} \cdot 1000 \quad (6.135)$$

$$t_z = 319,44 + 0,0043 \cdot \frac{277 + 49,07}{28,06} \cdot 1000 = 361,89 \text{ °C}$$

kde ε – je součinitel zanešení, pro doplňkové plochy voleno podle [3]

$$\varepsilon = 0,0043 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}\text{]}$$

$t_{stř}^p$ – je střední teplota páry, v tomto případě, je to teplota ve výparníku [°C]

$Q_{pIV,dp}^{tep}$ – je odhadovaný tepelný výkon doplňkových ploch [kW]

6.9.5 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,234 \cdot (782,32 + 273,15)^3 \cdot$$

$$\cdot \frac{1 - \left(\frac{361,89 + 273,15}{782,32 + 273,15}\right)^4}{1 - \left(\frac{361,89 + 273,15}{782,32 + 273,15}\right)} = 30,74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.9.6 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{sp} = \alpha_k^{sp} + \alpha_s = 12,16 + 30,74 = 42,89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.136)$$

6.9.7 Výkon předaný doplňkovými plochami

$$Q_{pIV,dp}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{dp}^{skut}}{1000} \quad (6.137)$$

Součinitel prostupu tepla

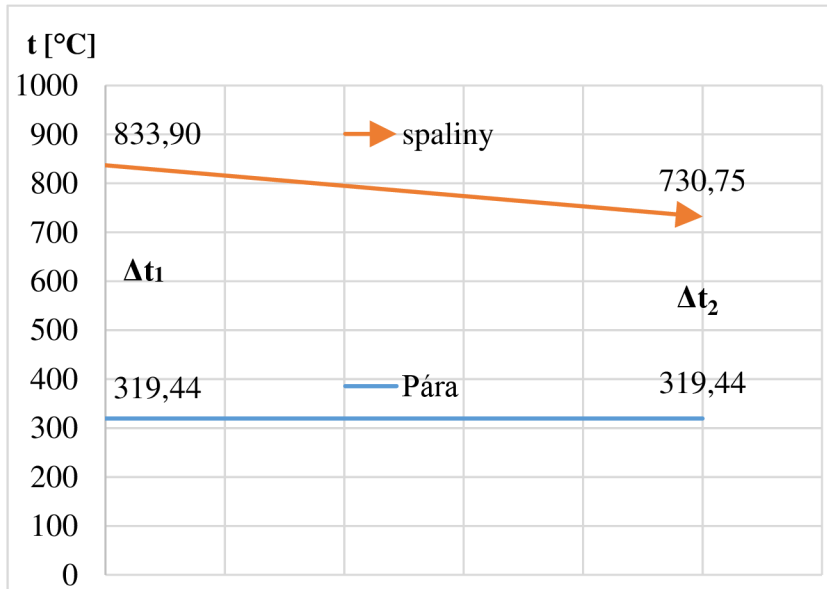
$$k = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_{sp}}} = \frac{0,5}{\frac{1}{42,89}} = 21,45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.138)$$

kde ψ – je součinitel tepelné efektivity doplňkových ploch, podle odborné konzultace

$$\psi = 0,5 \text{ [-]}$$

Střední logaritmický spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{(833,90 - 319,44) - (730,75 - 319,44)}{2,3 \cdot \log \left(\frac{833,90 - 319,44}{730,75 - 319,44} \right)} = 461,48 \text{ °C} \quad (6.139)$$



Obrázek 6.13 Průběh teploty páry a spalín v místě doplňkových ploch

Výkon předaný doplňkovými plochami

$$Q_{pIV,dp}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{dp}^{skut}}{1000} = \frac{21,45 \cdot 461,48 \cdot 28,06}{1000} = 277,71 \text{ kW}$$

6.10 Přeřívák PII

6.10.1 Návrh geometrie

Vnější průměr trubek $D = 0,0337$ m

Vnitřní průměr trubek $d = 0,0257$ m

Počet trubek v řadě $n_{tr} = 51$

Počet řad $n_r = 14$

Vstupní výška trubek $V_2 = 4,911$ m

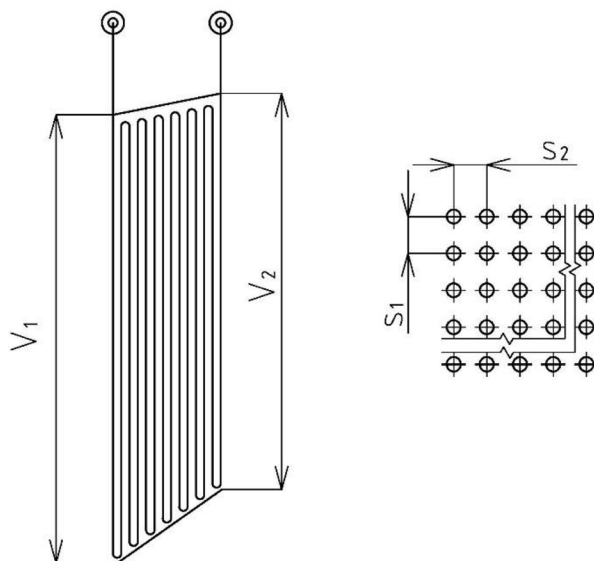
Výstupní výška trubek $V_1 = 4,256$ m

Střední výška trubek $V_{st} = 4,584$ m

Podélná rozteč $S_2 = 0,09$ m

Příčná rozteč $S_1 = 0,1$ m

Hloubka tahu $b = 5,375$ m



6.14 Přeřívák PII

Plocha trubek

$$S_{pII} = \pi \cdot D \cdot n_{tr} \cdot n_r \cdot V_{st} = \pi \cdot 0,038 \cdot 51 \cdot 14 \cdot 4,584 = 346,48 \text{ m}^2 \quad (6.140)$$

Střední průřez

$$F_{st} = \frac{2 \cdot F_{in} \cdot F_{out}}{F_{in} + F_{out}} \quad (6.141)$$

kde F_{in} – je vstupní průřez pro protékající spaliny [m^2]

F_{out} – je výstupní průřez pro protékající spaliny [m^2]

Vstupní průřez

$$F_{in} = V_2 \cdot b - n_{tr} \cdot V_2 \cdot D = 4,911 \cdot 5,375 - 51 \cdot 4,911 \cdot 0,0337 = 17,96 \text{ m}^2 \quad (6.142)$$

Výstupní průřez

$$F_{out} = V_1 \cdot b - n_{tr} \cdot V_1 \cdot D = 4,256 \cdot 5,375 - 51 \cdot 4,256 \cdot 0,0337 = 15,56 \text{ m}^2 \quad (6.143)$$

Střední průřez

$$F_{st} = \frac{2 \cdot 17,96 \cdot 15,56}{17,96 + 15,56} = 16,67 \text{ m}^2$$

6.10.2 Parametry spalin

Výstupní entalpie spalin

$$i_{out} = i_{in} - \frac{Q_{pII} + Q_{pII,dp}^{tep}}{M_{pv} \cdot \varphi} \quad (6.144)$$

$$i_{out} = 5356,58 - \frac{5942,52 + 245,79}{7,065 \cdot 0,991} = 4472,26 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde i_{in} – je entalpie na výstupu z přeříváku PIV [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Q_{pII} – je parní výkon přeříváku PII [kW]

$Q_{pII,dp}^{tep}$ – je tepelný výkon doplňkových ploch, získaný podle rovnice (6.177) [kW]

Výstupní teplota spalin

Interpolací tabulky 2.4 pro entalpii i_{out} je získána teplota spalin na výstupu z PII.

$$t_{out} = 619,41 \text{ °C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{730,75 + 619,41}{2} = 675,08 \text{ °C} \quad (6.145)$$

kde t_{in} – je teplota spalin na vstupu do přehříváku PII [°C]

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot (O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}) \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15}$$
$$V_{sp} = 7,065 \cdot (3,88865 \cdot (1,324 - 1) \cdot 3,03456) \cdot \frac{675,08 + 273,15}{273,15} \quad (6.146)$$

$$V_{sp} = 119,24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde α – je přebytek vzduchu v místě přehříváku PII [-]

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{st}} = \frac{119,24}{16,67} = 7,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.147)$$

Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0853 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 0,0001093 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,642$ [-]

6.10.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Tento součinitel je počítán pouze pro převládající příčné proudění.

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (6.148)$$

kde c_z – je oprava pro počet podélných řad, podle [3] $c_z = 1$ [-]

c_s – je oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči σ_1 a poměrné podélné rozteči σ_2 , pro $\sigma_2 \geq 2$ se dosazuje $c_s = 1$ [-]

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,1}{0,0337} = 2,97 \quad (6.149)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,09}{0,0337} = 2,67 \quad (6.150)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0853}{0,0337} \cdot \left(\frac{7,15 \cdot 0,0337}{0,0001093} \right)^{0,65} \cdot 0,642^{0,33}$$

$$\alpha_k^{sp} = 65,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.10.4 Parametry média

Střední teplota páry

$$t_{stř}^p = \frac{t_{pII}^{out} + t_{pII}^{in}}{2} = \frac{412 + 343}{2} = 377,5 \text{ °C} \quad (6.151)$$

Střední tlak páry

$$p_{stř}^p = \frac{p_{pII}^{in} + p_{pII}^{out}}{2} = \frac{10,8 + 10,4}{2} = 10,6 \text{ MPa} \quad (6.152)$$

Fyzikální parametry Páry

Tyto parametry jsou získané pro střední tlak a teplotu pomocí programu [5].

Střední měrný objem $v = 0,0227 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0680 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 5,33 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Prandtlovo číslo $Pr = 1,238 [-]$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{(m_{pp} - m_{vSI} - m_{vSII}) \cdot v}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr}} \quad (6.153)$$

$$w_p = \frac{(24,44 - 0,50 - 1,28) \cdot 0,0227}{\frac{\pi \cdot 0,0257^2}{4} \cdot 51} = 19,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

6.10.5 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

$$\alpha_k^p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \quad (6.154)$$

$$\alpha_k^p = 0,023 \cdot \frac{0,0680}{0,0257} \cdot \left(\frac{19,43 \cdot 0,0227}{5,33 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,238^{0,4} \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k^p = 3976,56 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde d_e – je ekvivalentní průměr (vnitřní průměr trubky) [m]

c_t – je opravný koeficient, závisí na teplotě stěny a proudu podle [3] $c_t = 1 [-]$

c_l – je opravný koeficient na poměrnou délku, podle [3] $c_l = 1 [-]$

6.10.6 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = k_0 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (6.155)$$

kde a_{st} – je stupeň černosti povrchu stěn, podle [3] je $a_{st} = 0,8$

k_0 – je součinitel vlivu sálání volných objemů před svazkem [-]

Vliv sálání volných objemů před svazkem

$$k_0 = 1 + A \cdot \left(\frac{T_0}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{l_0}{l_s}\right)^{0,07} \quad (6.156)$$

$$k_0 = 1 + 0,5 \cdot \left(\frac{730,75 + 273,15}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{0,5}{1,17}\right)^{0,07} = 1,44$$

kde A – je součinitel zohledňující druh paliva, podle [3] voleno $A = 0,5$ [-]

T_0 – je absolutní teplota ve volném objemu, před svazkem [K]

l_0 – je hloubka volného objemu, hodnota odečtena z výkresu $l_0 = 0,5$ m

l_s – je šířka přehříváku PII, $l_s = 1,17$ m

Stupeň černosti spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (6.157)$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,0337 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,01 \cdot 0,09}{0,0337^2} - 1\right) = 0,276 \text{ m} \quad (6.158)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{100}\right) \cdot r_{sp}$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,19887}{3,16 \cdot \sqrt{0,03199 \cdot 0,276}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{273,15 + 675,08}{100}\right) \cdot 0,31999 \quad (6.159)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 7,631 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{stř}^{sp2} \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(675,08 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \cdot 2,77868 \quad (6.160)$$

$$k_p \cdot \mu = 0,174 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

kde d – je střední efektivní průměr částiček popílku [μm], pro roštové kotle podle [3]
je $d = 20 \mu\text{m}$

Součinitel zeslabení sálání

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu \quad (6.161)$$

$$k = 7,631 + 0,174 = 7,805 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Stupeň černosti spalin

$$a = 1 - e^{-7,805 \cdot 0,1 \cdot 0,276} = 0,194$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_{stř}^p + \left(\epsilon + \frac{1}{\alpha_k^p} \right) \cdot \frac{Q_{pII}}{S_{pII}} \cdot 1000 \quad (6.162)$$
$$t_z = 377,5 + \left(0,0043 + \frac{1}{3976,56} \right) \cdot \frac{5942,52}{346,48} \cdot 1000 = 455,56 \text{ °C}$$

kde ϵ – je součinitel zanešení, pro šoty voleno podle [3] $\epsilon = 0,0043 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}\text{]}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 1,44 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,194 \cdot (675,08 + 273,15)^3 \cdot$$
$$\cdot \frac{1 - \left(\frac{455,56 + 273,15}{675,08 + 273,15} \right)^4}{1 - \left(\frac{455,56 + 273,15}{675,08 + 273,15} \right)} = 34,20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.10.7 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k^{sp} + \alpha_s) = 1 \cdot (65,17 + 34,20) = 99,36 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.163)$$

kde ω – je součinitel využití plochy, podle [3] $\omega = 1 \text{ [-]}$

6.10.8 Výkon předaný přehřívákem PII

$$Q_{pII}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{pII}}{1000} \quad (6.164)$$

Součinitel prostupu tepla

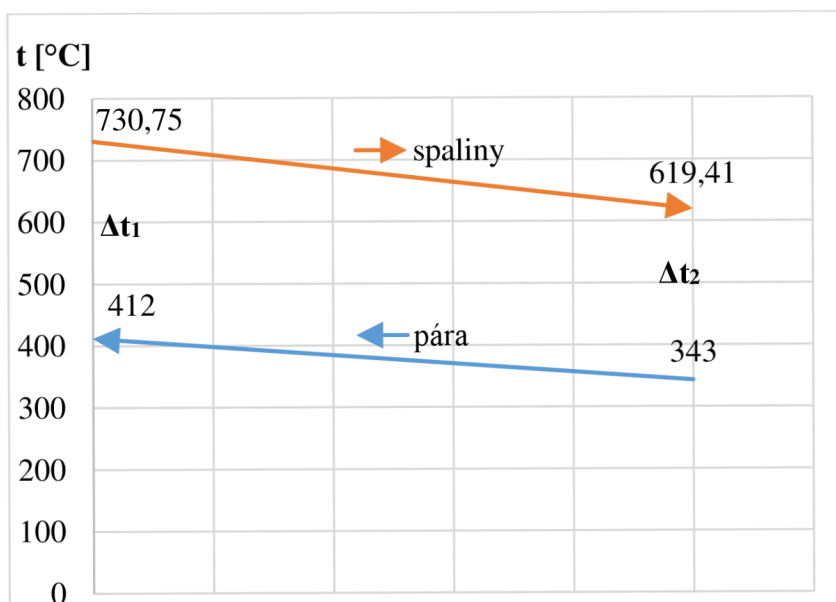
$$k = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_{sp}} + \frac{1}{\alpha_k^p}} = \frac{0,6}{\frac{1}{99,36} + \frac{1}{3976,56}} = 58,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.165)$$

kde ψ – je součinitel tepelné efektivity přehříváku, podle [3] $\psi = 0,6 \text{ [-]}$

Střední logaritmický spád

Přehřívák II je navržený jako protiproudý, rozložení jednotlivých teplot je v následujícím obrázku 6.15.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{(730,75 - 412) - (619,41 - 343)}{2,3 \cdot \log \left(\frac{730,75 - 412}{619,41 - 343} \right)} = 297,41 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.166)$$



Obrázek 6.15 Průběh teploty spaliny a páry v místě přehříváku PII

Výkon předaný přehřívákem PII

$$Q_{pII}^{tep} = \frac{58,17 \cdot 297,41 \cdot 346,48}{1000} = 5993,69 \text{ kW}$$

6.10.9 Bilance přehříváku PII

$$x = \frac{Q_{pII}^{tep} - Q_{pII}}{Q_{pII}^{tep}} \cdot 100 = \frac{5993,69 - 5942,52}{5993,69} \cdot 100 = 0,82 \text{ } \% \quad (6.167)$$

Tato hodnota leží v intervalu $\pm 2 \%$, bilance VYHOVUJE.

6.11 Doplnkové plochy v místě přehříváku PII

Doplnkové plochy v místě PII jsou zobrazeny na následujícím obrázku 6.16, jako nevyšrafovaná místa.

6.11.1 Geometrie

Výška vstupního kanálu $V_1 = 5,282$ m

Výška výstupního kanálu $V_2 = 4,256$ m

Střední výška kanálu $V_{stř} = 4,769$ m

Šířka kanálu $š = 2,147$ m

Délka spodní přepony $p_1 = 2,627$ m

Délka horní přepony $p_2 = 2,19$ m

Spodní výškový rozdíl $r_1 = 1,514$ m

Horní výškový rozdíl $r_2 = 0,429$ m

Hloubka tahu $b = 5,375$ m

Plocha doplnkových ploch

$$S_{dp} = 2 \cdot š \cdot [(V_2 + r_1) - 0,5 \cdot (r_1 + r_2)] + b \cdot (p_1 + p_2)$$

$$S_{dp} = 2 \cdot 2,217 \cdot [(4,256 + 1,514) - 0,5 \cdot (1,514 + 0,429)] + 5,375 \cdot (2,62 + 2,19) = 46,50 \text{ m}^2 \quad (6.168)$$

Skutečná plocha doplnkových ploch

$$S_{dp}^{skut} = x \cdot S_{dp} = 0,8 \cdot 46,50 = 37,20 \text{ m}^2 \quad (6.169)$$

kde x – je úhlový součinitel membránové stěny, podle [3] $x = 0,8$ [-]

6.11.2 Parametry spalin

Parametry spalin se shodují s parametry z výpočtu Přehříváku PII.

Střední teplota spalin

$$t_{stř}^{sp} = 675,08 \text{ °C}$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = 7,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

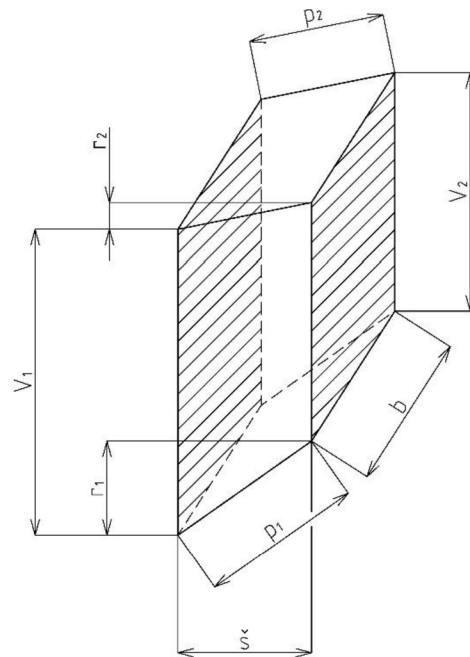
Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0853 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 0,0001093 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,642$ [-]



6.16 Doplnkové plochy

6.11.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_k^{sp} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \quad (6.170)$$

kde d_e – je ekvivalentní průměr [m]

c_t – je opravný součinitel závislý na teplotě proudu a stěny, podle [3] $c_t = 1$ [-]

c_l – je opravný součinitel na poměrnou délku, podle [3] $c_l = 1$ [-]

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot S_{stř}}{o_{stř}} \quad (6.171)$$

kde $S_{stř}$ – je střední průřez kanálu [m]

$o_{stř}$ – je střední obvod kanálu [m]

Střední průřez kanálu

$$\begin{aligned} S_{stř} &= V_{stř} \cdot b - D \cdot n_{tr} \cdot V_{stř} = 4,769 \cdot 5,375 - 0,0337 \cdot 51 \cdot 4,769 \\ S_{stř} &= 17,44 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (6.172)$$

Střední obvod kanálu

$$\begin{aligned} o_{stř} &= 2 \cdot (V_{stř} + b) + 2 \cdot n_{tr} \cdot V_{stř} = 2 \cdot (4,769 + 5,375) + 2 \cdot 51 \cdot 4,769 \\ o_{stř} &= 506,73 \text{ m} \end{aligned} \quad (6.173)$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot 17,44}{506,73} = 0,14 \text{ m}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín podélné proudění

$$\begin{aligned} \alpha_k^{sp} &= 0,023 \cdot \frac{0,0853}{0,14} \cdot \left(\frac{7,55 \cdot 0,13}{0,0001093} \right)^{0,8} \cdot 0,642^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \\ \alpha_k^{sp} &= 17,40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

6.11.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (6.174)$$

kde a – hodnota stupně černosti spalín může být brána z výpočtu přehříváku PII [-]

a_{st} – je stupeň černosti povrchu stěn, podle [3] je $a_{st} = 0,8$ [-]

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_{stř}^p + \varepsilon \cdot \frac{Q_{pII,dp}^{tep}}{S_{dp}^{skut}} \cdot 1000 \quad (6.175)$$

$$t_z = 319,44 + 0,0043 \cdot \frac{246}{37,20} \cdot 1000 = 347,87 \text{ °C}$$

kde ε – je součinitel zanešení, pro doplňkové plochy voleno podle [3]

$$\varepsilon = 0,0043 [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$$

$t_{stř}^p$ – je střední teplota páry, v tomto případě, je to teplota ve výparníku [°C]

$Q_{pII,dp}^{tep}$ – je odhadovaný tepelný výkon doplňkových ploch [kW]

6.11.5 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,182 \cdot (675,08 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{347,87 + 273,15}{675,08 + 273,15}\right)^4}{1 - \left(\frac{347,87 + 273,15}{675,08 + 273,15}\right)} = 20,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.11.6 Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_{sp} = \alpha_k^{sp} + \alpha_s = 17,40 + 20,03 = 37,43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.176)$$

6.11.7 Výkon předaný doplňkovými plochami

$$Q_{pII,dp}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{dp}^{skut}}{1000} \quad (6.177)$$

Součinitel prostupu tepla

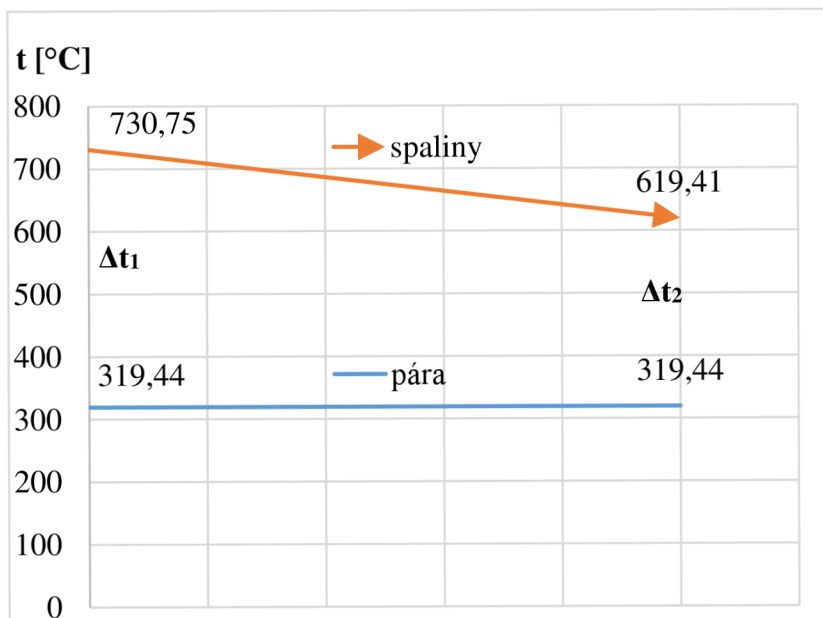
$$k = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_{sp}}} = \frac{0,5}{\frac{1}{37,43}} = 18,71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.178)$$

kde ψ – je součinitel tepelné efektivity doplňkových ploch, podle odborné konzultace

$$\psi = 0,5 [-]$$

Střední logaritmický spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{(730,75 - 319,44) - (619,41 - 319,44)}{2,3 \cdot \log \left(\frac{730,75 - 319,44}{619,41 - 319,44} \right)} = 353,11 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.179)$$



Obrázek 6.17 Průběh teploty spalin a páry v místě doplňkových ploch

Výkon předaný doplňkovými plochami

$$Q_{pII,dp}^{tep} = \frac{18,71 \cdot 353,11 \cdot 37,20}{1000} = 245,79 \text{ kW}$$

6.12 Kotlová mříž

Kotlová mříž je umístěna na přechodu prvního a druhého tahu (mezi přehříváky PII a PI). Skládá se z rozvolněných trubek membránové stěny, kde tyto rozvolněné trubky tvoří tři řady s vystřídaným uspořádáním.

6.12.1 Návrh geometrie

Vnější průměr trubek $D = 0,0603$ m

Vnitřní průměr trubek $d = 0,0503$ m

Počet trubek v řadě $n_{tr} = 21$

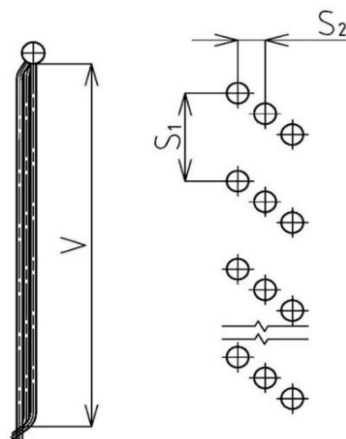
Počet řad $n_r = 3$

Výška trubek $V = 4,19$ m

Podélná rozteč $S_2 = 0,255$ m

Příčná rozteč $S_1 = 0,075$ m

Hloubka tahu $b = 5,375$ m



6.18 Kotlová mříž

Plocha trubek

$$S_{mříž} = \pi \cdot D \cdot n_{tr} \cdot n_r \cdot V = \pi \cdot 0,0603 \cdot 21 \cdot 3 \cdot 4,19 = 64,15 \text{ m}^2 \quad (6.180)$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F = V \cdot b - n_{tr} \cdot V \cdot D = 4,19 \cdot 5,375 - 21 \cdot 4,19 \cdot 0,0603 = 17,22 \text{ m}^2 \quad (6.181)$$

6.12.2 Parametry spalin

Výstupní entalpie spalin

$$i_{out} = i_{in} - \frac{Q_{mříž}^{tep}}{M_{pv} \cdot \varphi} \quad (6.182)$$

$$i_{out} = 4472,26 - \frac{1060,57}{7,065 \cdot 0,991} = 4320,70 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde i_{in} – je entalpie na výstupu z přehříváku PII [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

$Q_{mříž}^{tep}$ – je výkon kotlové mříže z tepelného výpočtu, dle rovnice (6.201). Tento výkon je do rovnice dosazen místo parního, protože parní výkon kotlové mříže není znám [kW]

Výstupní teplota spalin

Interpolací tabulky 2.4 pro entalpii i_{out} je získána teplota spalin na výstupu z kotlové mříže.

$$t_{out} = 600,24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{619,41 + 600,24}{2} = 609,83 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.183)$$

kde t_{in} – je teplota spalin na vstupu do kotlové mříže [$^\circ\text{C}$]

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot (O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}) \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15}$$

$$V_{sp} = 7,065 \cdot (3,88865 \cdot (1,324 - 1) \cdot 3,03456) \cdot \frac{609,83 + 273,15}{273,15} \quad (6.184)$$

$$V_{sp} = 111,17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde α – je přebytek vzduchu v místě kotlové mříže [-]

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F} = \frac{111,17}{17,22} = 6,46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.185)$$

Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0792 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 9,70 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,649$ [-]

6.12.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Tento součinitel je počítán pouze pro převládající příčné proudění.

$$\alpha_k^{sp} = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (6.186)$$

kde c_z – je oprava pro počet podélných řad [-]

c_s – je oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči σ_1 a poměrné podélné rozteči σ_2 [-]

Koeficient c_s

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} \quad (6.187)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,255}{0,0603} = 4,23 \quad (6.188)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,075}{0,0603} = 1,24 \quad (6.189)$$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 4,23^2 + 1,24^2} = 2,45 \quad (6.190)$$

Parametr určující uspořádání trubek ve svazku

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{4,23 - 1}{2,45 - 1} = 2,22 \quad (6.191)$$

Koeficient c_s

$$c_s = 0,34 \cdot 2,22^{0,1} = 0,37$$

Koeficient c_z

$$c_z = 4 \cdot n_i^{0,02} - 3,2 = 0,89 \quad (6.192)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_k^{sp} = 0,89 \cdot 0,37 \cdot \frac{0,0792}{0,0603} \cdot \left(\frac{6,46 \cdot 0,0603}{9,70 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,649^{0,33}$$

$$\alpha_k^{sp} = 54,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.12.4 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (6.193)$$

kde a_{st} – je stupeň černosti povrchu stěn, podle [3] je $a_{st} = 0,8$ [-]

Stupeň černosti spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (6.194)$$

Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{D^2} - 1 \right)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0603 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,255 \cdot 0,075}{0,075^2} - 1 \right) = 0,309 \text{ m} \quad (6.195)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{100} \right) \cdot r_{sp}$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,19887}{3,16 \cdot \sqrt{0,03199 \cdot 0,309}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{273,15 + 609,83}{100} \right) \cdot 0,31999 \quad (6.196)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 7,457 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{stř}^{sp2} \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(594,45 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \cdot 2,77868 \quad (6.197)$$

$$k_p \cdot \mu = 0,238 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

kde d – je střední efektivní průměr částiček popílku [μm], pro roštové kotle podle [3]
je $d = 20 \mu\text{m}$

Součinitel zeslabení sálání

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu \quad (6.198)$$

$$k = 7,457 + 0,238 = 7,695 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Stupeň černosti spalin

$$a = 1 - e^{-7,695 \cdot 0,1 \cdot 0,309} = 0,212$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_{stř}^p + \varepsilon \cdot \frac{Q_{mříž}^{tep}}{S_{mříž}} \cdot 1000 \quad (6.199)$$

$$t_z = 319,44 + 0,0043 \cdot \frac{1060,57}{64,15} \cdot 1000 = 408,39 \text{ °C}$$

kde ε – je součinitel zanešení, pro šoty voleno podle [3] $\varepsilon = 0,0043 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$

$t_{stř}^p$ – je střední teplota páry, v tomto případě, je to teplota ve výparníku [°C]

$Q_{mříž}^{tep}$ – je odhadovaný tepelný výkon kotlové mříže [kW]

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,212 \cdot (609,83 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{408,39 + 273,15}{609,83 + 273,15}\right)^4}{1 - \left(\frac{408,39 + 273,15}{609,83 + 273,15}\right)} = 21,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.12.5 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k^{sp} + \alpha_s) = 1 \cdot (54,17 + 21,14) = 75,32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.200)$$

kde ω – je součinitel využití plochy, podle [3] $\omega = 1 [-]$

6.12.6 Výkon předaný kotlovou mříží

$$Q_{mříž}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{mříž}}{1000} \quad (6.201)$$

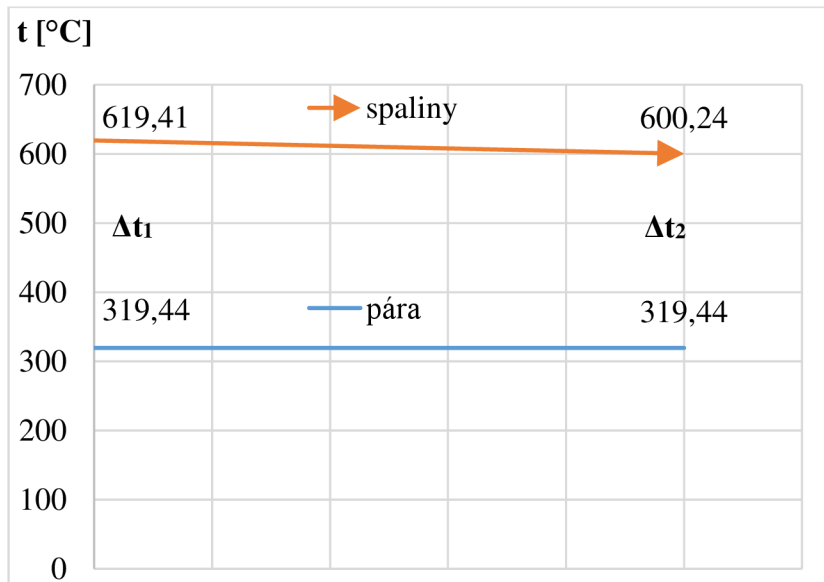
kde ε – je součinitel zanešení, pro mříž voleno podle [3] $\varepsilon = 0,0043 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha_{sp}}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_{sp}} = \frac{75,35}{1 + 0,0043 \cdot 75,35} = 56,89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.202)$$

Střední logaritmický spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} = \frac{(619,41 - 319,44) - (600,24 - 319,44)}{2,3 \cdot \log \left(\frac{619,41 - 319,44}{600,24 - 319,44} \right)} = 290,61 \text{ °C} \quad (6.203)$$

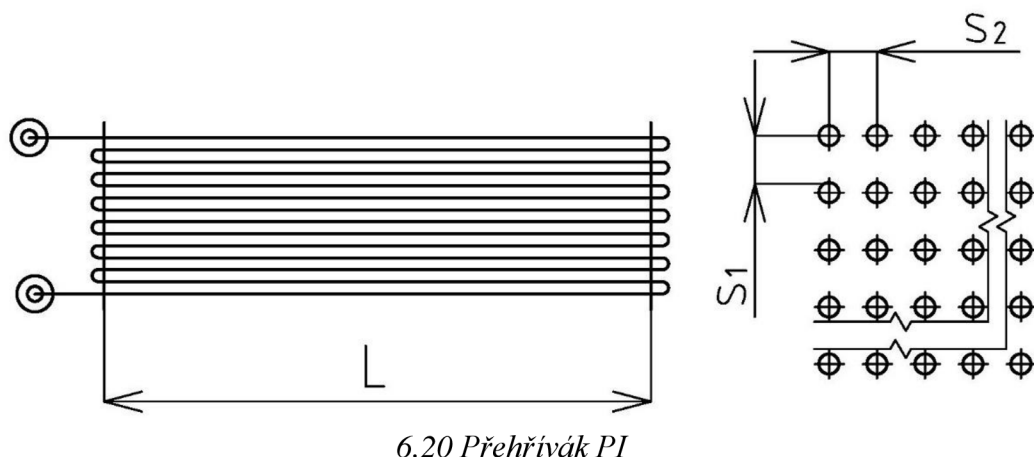


Obrázek 6.19 Průběh teploty spaliny a páry v místě kotlové mříže

Výkon předaný kotlovou mříží

$$Q_{mříž}^{tep} = \frac{56,89 \cdot 290,61 \cdot 64,15}{1000} = 1060,57 \text{ kW}$$

6.13 Přejhřívák PI



6.20 Přejhřívák PI

6.13.1 Návrh geometrie

Vnější průměr trubek $D = 0,0337$ m

Vnitřní průměr trubek $d = 0,0257$ m

Počet trubek v řadě $n_{tr} = 48$

Počet řad $n_r = 14$

Délka trubek $L = 3,644$ m

Podélná rozteč $S_2 = 0,08$ m

Příčná rozteč $S_1 = 0,095$ m

Hloubka tahu $b = 4,7$ m

Plocha trubek

$$S_{pl} = \pi \cdot D \cdot n_{tr} \cdot n_r \cdot L = \pi \cdot 0,0337 \cdot 48 \cdot 14 \cdot 3,644 = 264,66 \text{ m}^2 \quad (6.204)$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F = L \cdot b - n_{tr} \cdot L \cdot D = 3,644 \cdot 5,375 - 48 \cdot 3,644 \cdot 0,0337 = 11,23 \text{ m}^2 \quad (6.205)$$

6.13.2 Parametry spalin

Výstupní entalpie spalin

$$i_{out} = i_{in} - \frac{Q_{pl}}{M_{pv} \cdot \varphi} \quad (6.206)$$

$$i_{out} = 4320,70 - \frac{3652,03}{7,065 \cdot 0,991} = 3798,83 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde i_{in} – je entalpie na výstupu z kotlové mříže [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Q_{pl} – je parní výkon přehříváku PI [kW]

Výstupní teplota spalin

Interpolací tabulky 2.4 pro entalpii i_{out} je získána teplota spalin na výstupu z přehříváku PI.

$$t_{out} = 531,86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{600,24 + 531,86}{2} = 566,05 \text{ °C} \quad (6.207)$$

kde t_{in} – je teplota spalin na vstupu do přehříváku PI [°C]

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot (O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}) \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15}$$

$$V_{sp} = 7,065 \cdot (3,88865 \cdot (1,324 - 1) \cdot 3,03456) \cdot \frac{566,05 + 273,15}{273,15} \quad (6.208)$$

$$V_{sp} = 105,53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde α – je přebytek vzduchu v místě přehříváku PI [-]

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{st}} = \frac{105,53}{11,23} = 9,39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.209)$$

Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0751 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 8,91 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,653$ [-]

6.13.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Tento součinitel je počítán pouze pro převládající příčné proudění.

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (6.210)$$

kde c_z – je oprava pro počet podélných řad, podle [3] $c_z = 1$ [-]

c_s – je oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči σ_1 a poměrné podélné rozteči σ_2 , pro $\sigma_2 \geq 2$ se dosazuje $c_s = 1$ [-]

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,095}{0,0337} = 2,82 \quad (6.211)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,08}{0,0337} = 2,37 \quad (6.212)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0751}{0,0337} \cdot \left(\frac{9,39 \cdot 0,0337}{8,91 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,653^{0,33}$$

$$\alpha_k^{sp} = 78,73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.13.4 Parametry média

Střední teplota páry

$$t_{stř}^p = \frac{t_{pl}^{out} + t_{pl}^{in}}{2} = \frac{343 + 319,44}{2} = 331,22 \text{ °C} \quad (6.213)$$

Střední tlak páry

$$p_{stř}^p = \frac{p_{pl}^{in} + p_{pl}^{out}}{2} = \frac{11,2 + 10,8}{2} = 11 \text{ MPa} \quad (6.214)$$

Fyzikální parametry Páry

Tyto parametry jsou získané pro střední tlak a teplotu pomocí programu [5].

Střední měrný objem $v = 0,0175 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0776 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 3,73 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Prandtlovo číslo $Pr = 1,605 [-]$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{(m_{pp} - m_{vsl} - m_{vslI}) \cdot v}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr}} \quad (6.215)$$

$$w_p = \frac{(24,44 - 0,5 - 1,28) \cdot 0,0175}{\frac{\pi \cdot 0,0257^2}{4} \cdot 48} = 15,93 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

6.13.5 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry

$$\alpha_k^p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \quad (6.216)$$

$$\alpha_k^p = 0,023 \cdot \frac{0,0776}{0,0257} \cdot \left(\frac{15,93 \cdot 0,0257}{3,73 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 1,605^{0,4} \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_k^p = 5703,52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde d_e – je ekvivalentní průměr (vnitřní průměr trubky) [m]

c_t – je opravný koeficient, závisí na teplotě stěny a proudu podle [3] $c_t = 1 [-]$

c_l – je opravný koeficient na poměrnou délku, podle [3] $c_l = 1 [-]$

6.13.6 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = k_0 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (6.217)$$

kde a_{st} – je stupeň černosti povrchu stěn, podle [3] je $a_{st} = 0,8 [-]$

k_0 – je součinitel vlivu sálání volných objemů před svazkem $[-]$

Vliv sálání volných objemů před svazkem

$$k_0 = 1 + A \cdot \left(\frac{T_0}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{l_0}{l_s}\right)^{0,07} \quad (6.218)$$

$$k_0 = 1 + 0,5 \cdot \left(\frac{566,05 + 273,15}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{2,25}{1,04}\right)^{0,07} = 1,51$$

kde A – je součinitel zohledňující druh paliva, podle [3] voleno $A = 0,5$ [-]

T_0 – je absolutní teplota ve volném objemu, před svazkem [K]

l_0 – je hloubka volného objemu, hodnota odečtena z výkresu $l_0 = 2,25$ m

l_s – je šířka přehříváku PI, $l_s = 1,04$ m

Stupeň černosti spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (6.219)$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{D^2} - 1\right) = 0,9 \cdot 0,0337 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,095 \cdot 0,08}{0,0337^2} - 1\right) = 0,228 \text{ m} \quad (6.220)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{100}\right) \cdot r_{sp}$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,19887}{3,16 \cdot \sqrt{0,03199 \cdot 0,228}} - 1\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{273,15 + 566,05}{100}\right) \cdot 0,31999 \quad (6.221)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 8,923 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{stř}^{sp^2} \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(566,05 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \cdot 2,77868 \quad (6.222)$$

$$k_p \cdot \mu = 0,189 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

kde d – je střední efektivní průměr částiček popílku [μm], pro roštové kotle podle [3]

je $d = 20 \mu\text{m}$

Součinitel zeslabení sálání

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu \quad (6.223)$$

$$k = 8,923 + 0,189 = 9,112 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Stupeň černosti spalin

$$a = 1 - e^{-9,112 \cdot 0,1 \cdot 0,228} = 0,188$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_{stř}^p + \left(\epsilon + \frac{1}{\alpha_k^p} \right) \cdot \frac{Q_{pl}}{S_{pl}} \cdot 1000 \quad (6.224)$$
$$t_z = 331,22 + \left(0,0043 + \frac{1}{5703,52} \right) \cdot \frac{3652,03}{259,26} \cdot 1000 = 394,26 \text{ °C}$$

kde ϵ – je součinitel zanešení, pro šoty voleno podle [3] $\epsilon = 0,0043 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 1,51 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,188 \cdot (566,05 + 273,15)^3 \cdot$$
$$\cdot \frac{1 - \left(\frac{394,26 + 273,15}{566,05 + 273,15} \right)^4}{1 - \frac{394,26 + 273,15}{566,05 + 273,15}} = 25,18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.13.7 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k^{sp} + \alpha_s) = 1 \cdot (78,73 + 25,18) = 103,92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.225)$$

kde ω – je součinitel využití plochy, podle [3] $\omega = 1 [-]$

6.13.8 Výkon předaný přehřívákem PI

$$Q_{pl}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{pl}}{1000} \quad (6.226)$$

Součinitel prostupu tepla

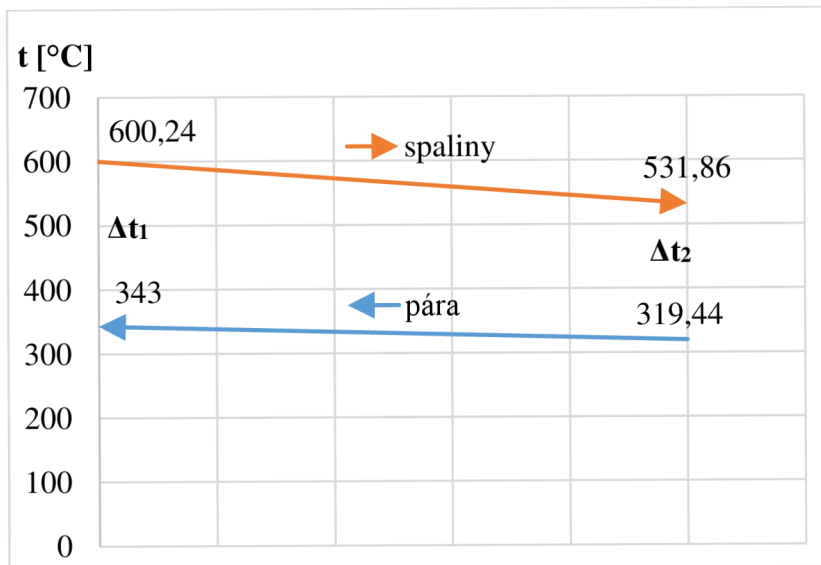
$$k = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_{sp}} + \frac{1}{\alpha_k^p}} = \frac{0,6}{\frac{1}{103,92} + \frac{1}{5703,52}} = 61,23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.227)$$

kde ψ – je součinitel tepelné efektivity přehříváku, podle [3] $\psi = 0,6 [-]$

Střední logaritmický spád

Přehřívák I je navržený jako protiproudý, rozložení jednotlivých teplot je v následujícím obrázku 6.21.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(600,24 - 343) - (531,86 - 319,44)}{2,3 \cdot \log\left(\frac{600,24 - 343}{531,86 - 319,44}\right)} = 234,38 \text{ °C} \quad (6.228)$$



Obrázek 6.21 Průběh teploty spalin a páry v místě přehříváku PI

Výkon předaný přehřívákem PI

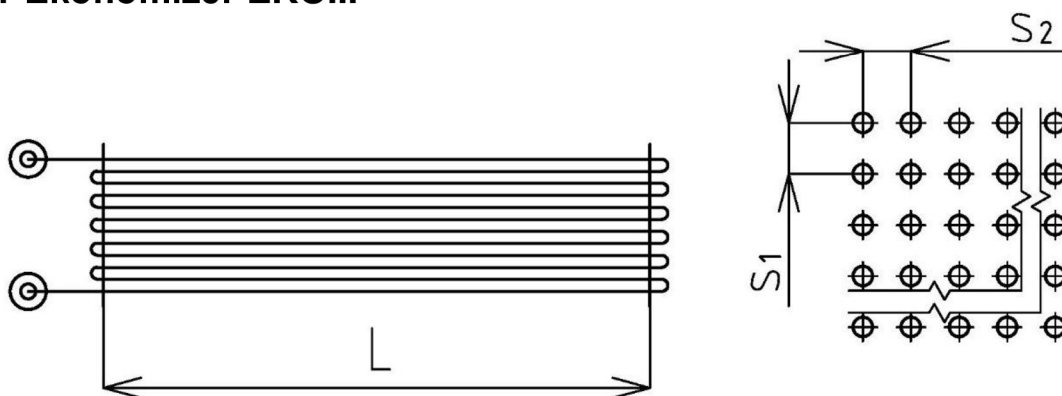
$$Q_{pl}^{tep} = \frac{61,23 \cdot 234,38 \cdot 259,26}{1000} = 3720,89 \text{ kW}$$

6.13.9 Bilance přehříváku PI

$$x = \frac{Q_{pl}^{tep} - Q_{pl}}{Q_{pl}^{tep}} \cdot 100 = \frac{3720,89 - 3652,03}{3720,89} \cdot 100 = 1,85 \%$$

Tato hodnota leží v intervalu $\pm 2 \%$, bilance VYHOVUJE.

6.14 Ekonomizér EKOIII



6.22 Ekonomizér EKOIII

6.14.1 Návrh geometrie

Vnější průměr trubek $D = 0,032$ m

Vnitřní průměr trubek $d = 0,0248$ m

Počet trubek v řadě $n_{tr} = 55$

Počet řad $n_r = 12$

Délka trubek $L = 3,644$ m

Podélná rozteč $S_2 = 0,08$ m

Příčná rozteč $S_1 = 0,085$ m

Hloubka tahu $b = 4,7$ m

Plocha trubek

$$S_{ekoIII} = \pi \cdot D \cdot n_{tr} \cdot n_r \cdot L = \pi \cdot 0,032 \cdot 55 \cdot 12 \cdot 3,644 = 241,78 \text{ m}^2 \quad (6.229)$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F = L \cdot b - n_{tr} \cdot L \cdot D = 3,644 \cdot 4,7 - 55 \cdot 3,644 \cdot 0,032 = 10,71 \text{ m}^2 \quad (6.230)$$

6.14.2 Parametry spalin

Výstupní entalpie spalin

$$i_{out} = i_{in} - \frac{Q_{ekoIII}}{M_{pv} \cdot \varphi} \quad (6.231)$$

$$i_{out} = 3798,83 - \frac{3603,06}{7,065 \cdot 0,991} = 3283,97 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde i_{in} – je entalpie na výstupu z přehříváku PI [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Q_{pl} – je (vodní) výkon ekonomizéru EKOIII [kW]

Výstupní teplota spalin

Interpolací tabulky 2.4 pro entalpii i_{out} je získána teplota spalin na výstupu z EKOIII.

$$t_{out} = 462,93 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{531,86 + 466,93}{2} = 497,40 \text{ °C} \quad (6.232)$$

kde t_{in} – je teplota spalin na vstupu do ekonomizéru EKOIII [°C]

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot (O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}) \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15}$$

$$V_{sp} = 7,065 \cdot (3,88865 \cdot (1,326 - 1) \cdot 3,03456) \cdot \frac{497,40 + 273,15}{273,15} \quad (6.233)$$

$$V_{sp} = 97,01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde α – je přebytek vzduchu v místě ekonomizéru EKOIII [-]

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{st}} = \frac{97,01}{10,71} = 9,06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.234)$$

Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0687 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 7,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,660$

6.14.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Tento součinitel je počítán pouze pro převládající příčné proudění.

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (6.235)$$

kde c_z – je oprava pro počet podélných řad, podle [3] $c_z = 1$ [-]

c_s – je oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči σ_1 a poměrné podélné rozteči σ_2 , z následujících výpočtů podle [3] pro $\sigma_2 > 2$ je $c_s = 1$ [-]

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,085}{0,032} = 2,66 \quad (6.236)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,08}{0,032} = 2,5 \quad (6.237)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0687}{0,032} \cdot \left(\frac{9,06 \cdot 0,032}{7,67 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,660^{0,33}$$

$$\alpha_k^{sp} = 79,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.14.4 Parametry média

Střední teplota vody

$$t_{stř}^v = \frac{t_{ekoIII}^{out} + t_{ekoIII}^{in}}{2} = \frac{252 + 218}{2} = 235 \text{ °C} \quad (6.238)$$

Střední tlak vody

$$p_{stř}^v = \frac{p_{ekoIII}^{in} + p_{ekoIII}^{out}}{2} = \frac{11,27 + 11,2}{2} = 11,235 \text{ MPa} \quad (6.239)$$

Fyzikální parametry vody

Tyto parametry jsou získané pro střední tlak a teplotu pomocí programu [5]

Střední měrný objem $v = 0,00012 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}$

Rychlost vody

$$w_v = \frac{(m_{pp} - m_{vSI} - m_{vSII} + m_o) \cdot v}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr}} \quad (6.240)$$

$$w_v = \frac{(24,44 - 0,50 - 1,28 + 0,12) \cdot 0,00012}{\frac{\pi \cdot 0,0248^2}{4} \cdot 55} = 1,04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

6.14.5 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (6.241)$$

kde a_{st} – je stupeň černosti povrchu stěn, podle [3] je $a_{st} = 0,8$ [-]

k_0 – je součinitel vlivu sálání volných objemů před svazkem [-]

Vliv sálání volných objemů před svazkem

$$k_0 = 1 + A \cdot \left(\frac{T_0}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{l_0}{l_s}\right)^{0,07} \quad (6.242)$$

$$k_0 = 1 + 0,5 \cdot \left(\frac{497,40 + 273,15}{1000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{1}{0,88}\right)^{0,07} = 1,48$$

kde A – je součinitel zohledňující druh paliva, podle [3] voleno $A = 0,5$ [-]

T_0 – je absolutní teplota ve volném objemu před svazkem [K]

l_0 – je hloubka volného objemu, hodnota odečtena z výkresu $l_0 = 1 \text{ m}$

l_s – je šířka ekonomizéru EKOIII, $l_s = 0,88 \text{ m}$

Stupeň černosti spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (6.243)$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{D^2} - 1 \right) \quad (6.244)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,032 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,085 \cdot 0,08}{0,032^2} - 1 \right) = 0,215 \text{ m}$$

Součinitel zeslabení sálení nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{100} \right) \cdot r_{sp} \quad (6.245)$$

Objemová část tříatomových plynů

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}} + \frac{O_{H_2O}}{O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}} \quad (6.246)$$

$$r_{sp} = \frac{0,58881 + 0,00006}{3,87865 + (1,326 - 1) \cdot 3,03456} + \frac{0,94495}{3,87865 + (1,326 - 1) \cdot 3,03456}$$

$$r_{RO_2} = 0,12097$$

$$r_{H_2O} = 0,19865$$

$$r_{sp} = 0,12097 + 0,19865 = 0,31961$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,31961 = 0,03196 \text{ MPa} \quad (6.247)$$

Součinitel zeslabení sálení nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,19865}{3,16 \cdot \sqrt{0,03196 \cdot 0,215}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{273,15 + 497,40}{100} \right) \cdot 0,31961 \quad (6.248)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 9,528 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálení popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{stř}^{sp^2} \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (6.249)$$

kde d – je střední efektivní průměr částic popílku [μm], pro roštové kotle podle [3] je $d = 20 \mu\text{m}$

Střední hmotová koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}} \cdot \frac{X_p}{100} = \frac{10 \cdot 2}{3,87865 + (1,326 - 1) \cdot 3,03456} \cdot \frac{70}{100} \quad (6.250)$$

$$\mu = 2,87597 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{stř}^{sp2} \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(486,68 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \cdot 2,87597$$

$$k_p \cdot \mu = 0,200 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu \quad (6.251)$$

$$k = 9,528 + 0,200 = 9,728 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Stupeň černosti spalin

$$a = 1 - e^{-9,258 \cdot 0,1 \cdot 0,215} = 0,189$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = t_{stř}^{sp} + \Delta t \quad (6.252)$$

$$t_z = 235 + 60 = 295 \text{ °C}$$

kde Δt – je podle [3] teplotní rozdíl mezi teplotou zaprášené stěny a teplotou média pro ekonomizéry $\Delta t = 60 \text{ °C}$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 1,48 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,189 \cdot (497,40 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{295 + 273,15}{497,40 + 273,15}\right)^4}{1 - \left(\frac{295 + 273,15}{497,40 + 273,15}\right)} = 17,53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.14.6 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k^{sp} + \alpha_s) = 1 \cdot (79,14 + 17,53) = 96,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.253)$$

kde ω – je součinitel využití plochy, podle [3] $\omega = 1 [-]$

6.14.7 Výkon předaný ekonomizérem EKOIII

$$Q_{ekoIII}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{ekoIII}}{1000} \quad (6.254)$$

Součinitel prostupu tepla

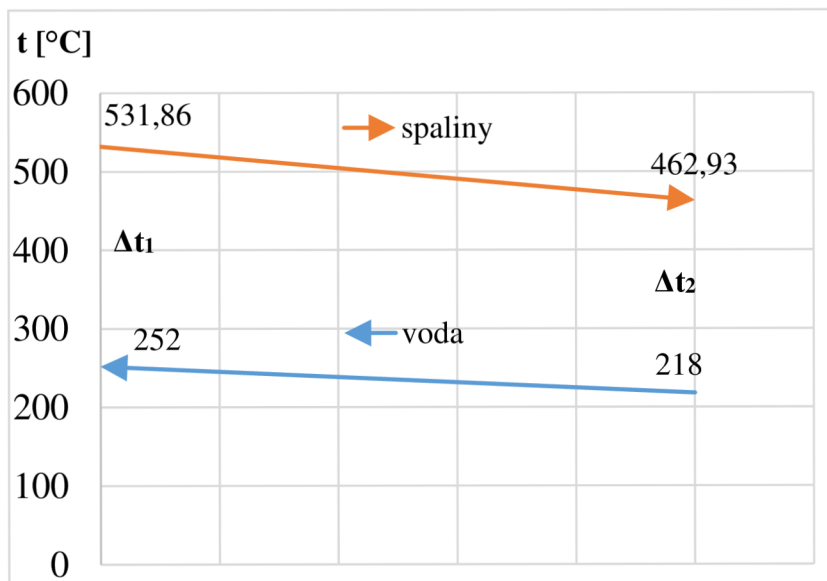
$$k = \psi \cdot \alpha_{sp} = 0,6 \cdot 96,67 = 58,00 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.255)$$

kde ψ – je součinitel tepelné efektivity ekonomizéru, podle [3] $\psi = 0,6 [-]$

Střední logaritmický spád

Ekonomizér III je navržený jako protiproudý, rozložení jednotlivých teplot je v následujícím obrázku 6.23.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(531,86 - 252) - (462,93 - 218)}{2,3 \cdot \log\left(\frac{531,86 - 252}{462,93 - 218}\right)} = 259,29 \text{ °C} \quad (6.256)$$



Obrázek 6.23 Průběh teploty spalin a páry v místě ekonomizéru EKOIII

Výkon předaný ekonomizérem EKOIII

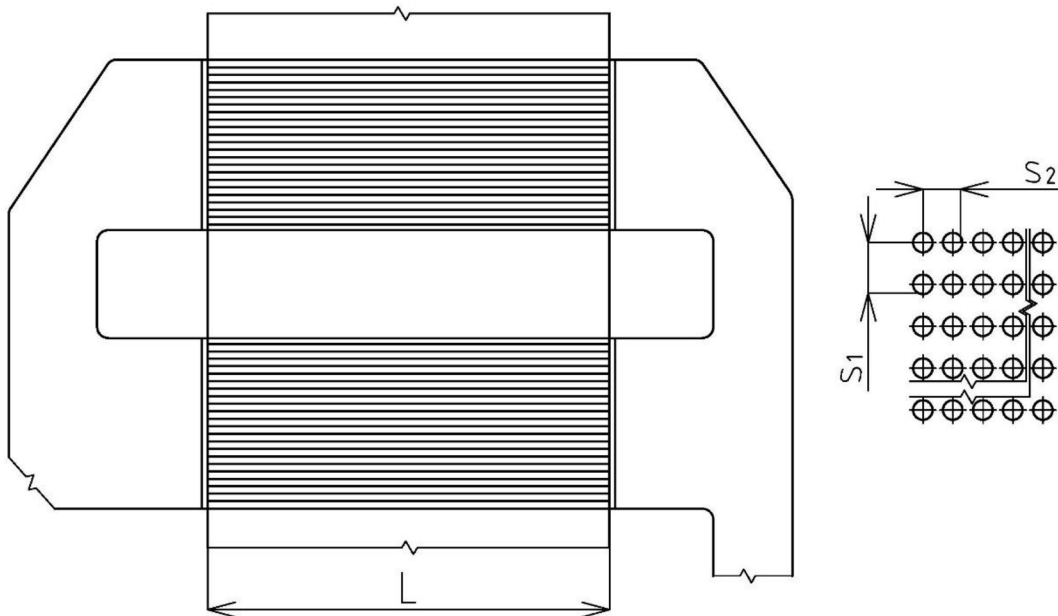
$$Q_{ekoIII}^{tep} = \frac{58,00 \cdot 259,29 \cdot 241,78}{1000} = 3636,33 \text{ kW}$$

6.14.8 Bilance ekonomizéru EKOIII

$$x = \frac{Q_{ekoIII}^{tep} - Q_{ekoIII}}{Q_{ekoIII}^{tep}} \cdot 100 = \frac{3636,33 - 3603,06}{3636,33} \cdot 100 = 0,91 \% \quad (6.257)$$

Tato hodnota leží v intervalu $\pm 2 \%$, bilance VYHOVUJE.

6.15 Ohřívák vzduchu OVZIV



Obrázek 6.24 Ohřívák vzduchu OVZIV

6.15.1 Návrh geometrie

Vnější průměr trubek $D = 0,0445$ m

Vnitřní průměr trubek $d = 0,0393$ m

Počet trubek v řadě $n_{tr} = 49$

Počet řad $n_r = 44$

Délka trubek $L = 3,644$ m

Podélná rozteč $S_2 = 0,068$ m

Příčná rozteč $S_1 = 0,095$ m

Hloubka tahu $b = 4,7$ m

Plocha trubek

$$S_{ovzIV} = \pi \cdot D \cdot n_{tr} \cdot n_r \cdot L = \pi \cdot 0,0445 \cdot 49 \cdot 44 \cdot 3,644 = 1098,34 \text{ m}^2 \quad (6.258)$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F = L \cdot b - n_{tr} \cdot L \cdot D = 3,644 \cdot 4,7 - 49 \cdot 3,644 \cdot 0,0445 = 9,18 \text{ m}^2 \quad (6.259)$$

6.15.2 Parametry spalin

Výstupní entalpie spalin

$$i_{out} = i_{in} - \frac{Q_{ovzIV}}{M_{pv} \cdot \varphi} \quad (6.260)$$

$$i_{out} = 3283,97 - \frac{1766,99}{7,065 \cdot 0,991} = 3031,47 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde i_{in} – je entalpie na výstupu z ekonomizéru EKOIII [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Q_{ovzIV} – je výkon (vzduchový) ohříváku vzduchu OVZ IV [kW]

Výstupní teplota spalin

Interpolací tabulky 2.4 pro entalpii i_{out} je získána teplota spalin na výstupu z OVZIV.

$$t_{out} = 462,93 \text{ °C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{462,93 + 427,64}{2} = 445,29 \text{ °C} \quad (6.261)$$

kde t_{in} – je teplota spalin na vstupu do ohříváku vzduchu OVZIV [°C]

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot (O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}) \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15}$$

$$V_{sp} = 7,065 \cdot (3,88865 \cdot (1,332 - 1) \cdot 3,03456) \cdot \frac{445,29 + 273,15}{273,15} \quad (6.262)$$

$$V_{sp} = 90,79 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde α – je přebytek vzduchu v místě ohříváku vzduchu OVZIV [-]

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{st}} = \frac{80,79}{9,18} = 9,89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.263)$$

Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0638 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 6,81 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,665$ [-]

6.15.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Tento součinitel je počítán pouze pro převládající příčné proudění.

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \quad (6.264)$$

kde c_z – je oprava pro počet podélných řad, podle [3] $c_z = 1$ [-]

c_s – je oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči σ_1 a poměrné podélné rozteči σ_2 [-]

Koeficient c_s

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} \quad (6.265)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,095}{0,0445} = 2,13 \quad (6.266)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,068}{0,0445} = 1,53 \quad (6.267)$$

Koeficient c_s

$$c_s = \left[1 + (2 \cdot 2,13 - 3) \cdot \left(1 - \frac{1,53}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,97$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0638}{0,0445} \cdot \left(\frac{9,89 \cdot 0,0445}{6,81 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,665^{0,33}$$

$$\alpha_k^{sp} = 72,69 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.15.4 Parametry media

Střední teplota vzduchu

$$t_{stř}^{vz} = \frac{t_{ovzIV}^{out} + t_{ovzIV}^{in}}{2} = \frac{332 + 195}{2} = 263,5 \text{ °C} \quad (6.268)$$

Fyzikální parametry vzduchu

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.2 pro střední teplotu vzduchu.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0427 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 4,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,69$ [-]

Objemový průtok vzduchu

$$V_{vz} = M_{pv} \cdot \alpha \cdot 0_{vzmin} \cdot x \cdot \frac{t_{stř}^{vz} + 273,15}{273,15} \quad (6.269)$$

$$V_{vz} = 7,065 \cdot 1,274 \cdot 3,03456 \cdot 0,35 \cdot \frac{263,5 + 273,15}{273,15} = 18,78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde x – je podíl vzduchu procházejícího ohřívákem OVZIV [-]

Rychlost vzduchu

$$w_{vz} = \frac{V_{vz}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_{ř}} = \frac{18,78}{\frac{\pi \cdot 0,0445^2}{4} \cdot 49 \cdot 44} = 7,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.270)$$

6.15.5 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu

$$\alpha_k^p = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot P_r^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \quad (6.271)$$

kde d_e – je ekvivalentní průměr (vnitřní průměr trubky) [m]

c_t – je opravný koeficient, závisí na teplotě stěny a proudu [-]

c_l – je opravný koeficient na poměrnou délku, podle [3] $c_l = 1$ [-]

Koeficient c_t

$$c_t = \left(\frac{T_{stř}^{vz}}{T_{st}} \right)^{0,5} \quad (6.272)$$

kde T_{st} – je teplota stěny trubky [K]

Teplota stěny

$$T_{st} = \frac{T_{stř}^{vz} + T_{stř}^{sp}}{2} = \frac{263,5 + 273,15 + 445,29 + 273,15}{2} = 627,55 \text{ K} \quad (6.273)$$

Koeficient c_t

$$c_t = \left(\frac{T_{stř}^{vz}}{T_{st}} \right)^{0,5} = \left(\frac{263,5 + 273,15}{627,55} \right)^{0,5} = 0,92$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu

$$\alpha_k^{vz} = 0,023 \cdot \frac{0,0427}{0,0393} \cdot \left(\frac{7,18 \cdot 0,0393}{4,33 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,69^{0,4} \cdot 0,92 \cdot 1$$

$$\alpha_k^{vz} = 22,41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.15.6 Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_{stř}^{sp3} \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_{stř}^{sp}} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_{stř}^{sp}}} \quad (6.274)$$

kde a_{st} – je stupeň černosti povrchu stěn, podle [3] je $a_{st} = 0,8$ [-]

Stupeň černosti spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (6.275)$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{D^2} - 1 \right)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0445 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,095 \cdot 0,068}{0,0445^2} - 1 \right) = 0,126 \text{ m} \quad (6.276)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stř}^{sp}}{100} \right) \cdot r_{sp} \quad (6.277)$$

Objemová část tříatomových plynů

$$r_{sp} = r_{RO_2} + r_{H_2O} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}} + \frac{O_{H_2O}}{O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}} \quad (6.278)$$

$$r_{sp} = \frac{0,58881 + 0,00006}{3,87865 + (1,332 - 1) \cdot 3,03456} + \frac{0,94495}{3,87865 + (1,332 - 1) \cdot 3,03456}$$

$$r_{RO_2} = 0,12052$$

$$r_{H_2O} = 0,19799$$

$$r_{sp} = 0,12052 + 0,19799 = 0,31851$$

Parciální tlak tříatomových plynů

$$p_{sp} = p \cdot r_{sp} = 0,1 \cdot 0,31851 = 0,03185 \text{ MPa} \quad (6.279)$$

Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,19799}{3,16 \cdot \sqrt{0,03185 \cdot 0,126}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{273,15 + 445,29}{100} \right) \cdot 0,31851 \quad (6.280)$$

$$k_{sp} \cdot r_{sp} = 12,791 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{stř}^{sp2} \cdot d^2}} \cdot \mu \quad (6.281)$$

kde d – je střední efektivní průměr částecek popílku [μm], pro roštové kotle podle [3] je $d = 20 \mu\text{m}$

Střední hmotová koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}} \cdot \frac{X_p}{100} = \frac{10 \cdot 2}{3,87865 + (1,332 - 1) \cdot 3,03456} \cdot \frac{70}{100} \quad (6.282)$$

$$\mu = 2,86526 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{T_{stř}^{sp2} \cdot d^2}} \cdot \mu = \frac{43}{\sqrt[3]{(445,29 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} \cdot 2,86526$$

$$k_p \cdot \mu = 0,208 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Součinitel zeslabení sálání

$$k = k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu \quad (6.283)$$

$$k = 12,791 + 0,208 = 12,999 \text{ m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

Stupeň černosti spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-12,999 \cdot 0,1 \cdot 0,126} = 0,151$$

Teplota zaprášeného povrchu stěn

$$t_z = \frac{t_{stř}^{sp} + t_{stř}^{vz}}{2} = \frac{445,29 + 263,5}{2} = 354,39 \text{ °C} \quad (6.284)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,151 \cdot (445,29 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{354,39 + 273,15}{445,29 + 273,15} \right)^4}{1 - \left(\frac{354,39 + 273,15}{445,29 + 273,15} \right)} = 9,51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.15.7 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot (\alpha_k^{sp} + \alpha_s) = 1 \cdot (72,68 + 9,51) = 82,20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.285)$$

kde ω – je součinitel využití plochy, podle [3] $\omega = 1$ [-]

6.15.8 Výkon předaný ohřívákem vzduchu OVZIV

$$Q_{ovzIV}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{ovzIV}}{1000} \quad (6.286)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{sp} \cdot \alpha_k^{vz}}{\alpha_{sp} + \alpha_k^{vz}} = 0,55 \cdot \frac{82,20 \cdot 22,41}{82,20 + 22,41} = 9,68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.287)$$

kde ξ – je součinitel využití plochy, podle odborné konzultace volím $\xi = 0,55$ [-]

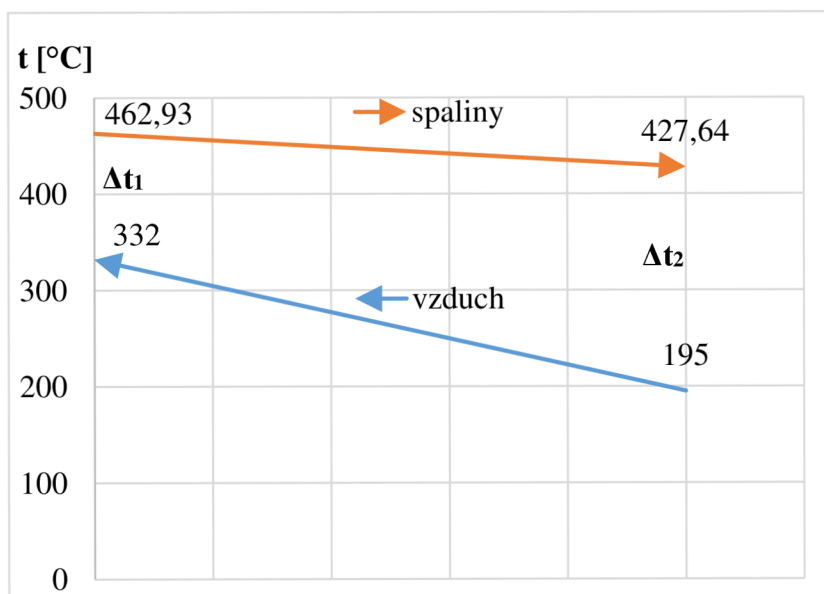
Střední logaritmický spád

Ohřívák vzduchu OVZIV je navržený jako protiproudý, na rozdíl od předešlých teplosměnných ploch se zde započítává vliv křížového proudění vyjádřeného pomocí koeficientu ψ .

$$\Delta t = \psi \cdot \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} \quad (6.288)$$

$$\Delta t = 0,96 \cdot \frac{(462,93 - 332) - (427,64 - 195)}{2,3 \cdot \log\left(\frac{462,93 - 332}{427,64 - 195}\right)} = 168,28 \text{ °C}$$

kde ψ – je součinitel křížového proudění, podle [3] voleno $\psi = 0,96$ [-]



Obrázek 6.25 Průběh teploty spalin a vzduchu v místě ohříváku vzduchu OVZIV

Výkon předaný ohřívákem vzduchu OVZIV

$$Q_{ekolIII}^{tep} = \frac{9,68 \cdot 168,28 \cdot 1098,34}{1000} = 1789,83 \text{ kW}$$

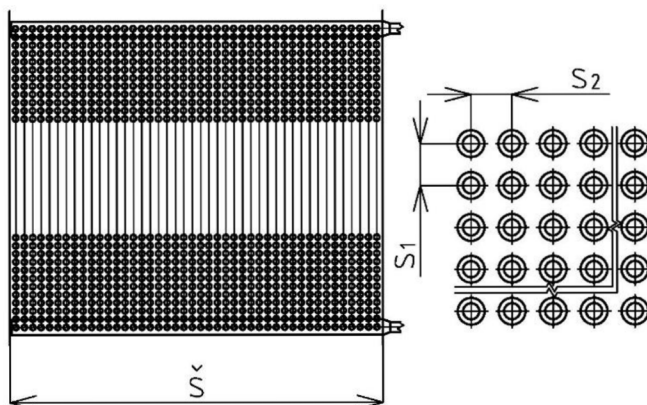
6.15.9 Bilance ohříváku vzduchu OVZIV

$$x = \frac{Q_{ovzIV}^{tep} - Q_{ovzIV}}{Q_{ovzIV}^{tep}} \cdot 100 = \frac{1789,83 - 1766,99}{1789,83} \cdot 100 = 1,28 \% \quad (6.289)$$

Tato hodnota leží v intervalu $\pm 2 \%$, bilance VYHOVUJE.

6.16 Ekonomizér EKOI,II

Ekonomizér I, II je na rozdíl od ostatních ploch v tahu o 90° pootočený, takže trubky směřují směrem do hloubky tahu. Toto opatření je z důvodu lepšího promíchání spalín.



Obrázek 6.26 Ekonomizér EKOI,II

6.16.1 Návrh geometrie

Průměr trubek přes žebra $D_z = 0,052$ m

Vnější průměr trubek $D = 0,032$ m

Vnitřní průměr trubek $d = 0,0248$ m

Výška žebra $h_z = 0,01$ m

Tloušťka žebra $t_z = 0,001$ m

Rozteč žebek $s_z = 0,0125$ m

Počet žebek na metr $n_z = 80$

Počet trubek v řadě $n_{tr} = 44$

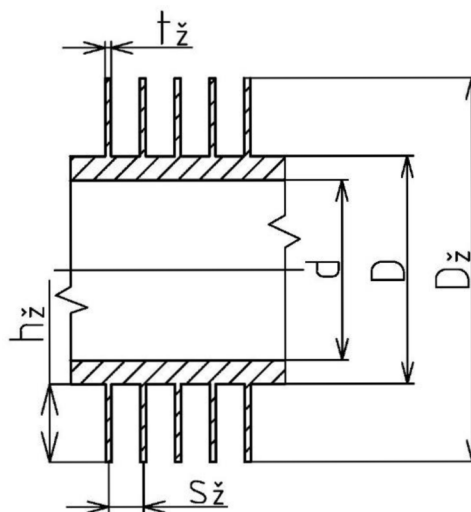
Počet řad $n_r = 24$

Délka trubek $L = 3,7$ m

Podélná rozteč $S_2 = 0,08$ m

Příčná rozteč $S_1 = 0,082$ m

Šířka tahu $\check{s} = 3,644$ m



Obrázek 6.27 Parametry žebek

Plocha 1 m trubky

$$S_{1m} = n_z \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (D_z^2 - D^2)}{4} + \pi \cdot D_z \cdot t_z \right) + \pi \cdot D \cdot (1 - n_z \cdot t_z)$$

$$S_{1m} = 80 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (0,052^2 - 0,032^2)}{4} + \pi \cdot 0,052 \cdot 0,001 \right) + \pi \cdot 0,032 \cdot (1 - 80 \cdot 0,001)$$

$$S_{1m} = 0,317 \text{ m}^2 \quad (6.290)$$

Plocha trubek

$$S_{ekoi,II} = S_{1m} \cdot n_{tr} \cdot n_r \cdot L = 0,317 \cdot 44 \cdot 24 \cdot 3,7 = 1237,30 \text{ m}^2 \quad (6.291)$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F = \check{s} \cdot L - L \cdot D \cdot n_{tr} - 2 \cdot h_{\check{z}} \cdot t_{\check{z}} \cdot L \cdot n_{\check{z}} \cdot n_{tr} \quad (6.292)$$
$$F = 3,644 \cdot 3,7 - 3,7 \cdot 0,032 \cdot 44 - 2 \cdot 0,01 \cdot 0,001 \cdot 3,7 \cdot 80 \cdot 44 = 8,01 \text{ m}^2$$

6.16.2 Parametry spalin

Výstupní entalpie spalin

$$i_{out} = i_{in} - \frac{Q_{ekoi,II}}{M_{pv} \cdot \varphi} \quad (6.293)$$
$$i_{out} = 3031,47 - \frac{6400,18}{7,065 \cdot 0,991} = 2116,90 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde i_{in} – je entalpie na výstupu z ohříváku vzduchu OVZIV [kJ·kg⁻¹]
 $Q_{ekoi,II}$ – je (vodní) výkon ekonomizéru EKOI,II [kW]

Výstupní teplota spalin

Interpolací tabulky 2.4 pro entalpii i_{out} je získána teplota spalin na výstupu z EKAI,II.

$$t_{out} = 302,72 \text{ °C}$$

Střední teplota spalin

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{427,64 + 302,72}{2} = 365,18 \text{ °C} \quad (6.294)$$

kde t_{in} – je teplota spalin na vstupu do ekonomizéru EKOI,II [°C]

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot (O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}) \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15} \quad (6.295)$$
$$V_{sp} = 7,065 \cdot (3,88865 \cdot (1,34 - 1) \cdot 3,03456) \cdot \frac{365,18 + 273,15}{273,15}$$
$$V_{sp} = 81,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde α – je přebytek vzduchu v místě ekonomizéru EKOI,II [-]

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{st}} = \frac{81,08}{8,01} = 10,12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.296)$$

Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0563 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 5,52 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

6.16.3 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{sp} = \left[\frac{S_z}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S} \right] \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_k}{1 + \epsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_k} \quad (6.297)$$

kde S_z/S – je podíl výhřevných ploch žebra a celkové plochy ze strany spalin [-]

E – je součinitel efektivnosti žebra, určuje se v závislosti na $\beta \cdot h_z$ [-]

μ – je součinitel rozšíření žebra, dle [3] voleno $\mu = 1$ [-]

S_h/S – je podíl volných částí trubky, kde nejsou žebra a celkové plochy na straně spalin [-]

ψ_z – je koeficient charakterizující nerovnoměrné rozdělení α_k po povrchu žebra, dle [3] je voleno $\psi_z = 0,85$ [-]

α_k^{sp} – je součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin [$W \cdot m^2 \cdot K^{-1}$]

ϵ – je součinitel znečištění, dle [3] voleno $\epsilon = 0,018$ [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]

Podíl výhřevných ploch žebra a celkové plochy ze strany spalin

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z}{D} + \frac{t_z}{D}\right)} = \frac{\left(\frac{0,052}{0,032}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0,052}{0,032}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0,0125}{0,032} + \frac{0,001}{0,032}\right)} \quad (6.298)$$

$$\frac{S_z}{S} = 0,70$$

Podíl volných částí trubky, kde nejsou žebra a celkové plochy na straně spalin

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S} = 1 - 0,7 = 0,3 \quad (6.299)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,082}{0,032} = 2,56 \quad (6.300)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,08}{0,032} = 2,5 \quad (6.301)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 0,105 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{S_z} \cdot \left(\frac{D}{S_z}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z}{S_z}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{W_{sp} \cdot S_z}{v}\right)^{0,72}$$

$$\alpha_k^{sp} = 0,105 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,0563}{0,0125} \cdot \left(\frac{0,032}{0,0125}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,01}{0,0125}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{10,12 \cdot 0,0125}{5,55 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,72} = 76,84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.302)$$

kde c_z – je oprava pro počet příčných řad, podle [3] $c_z = 1$ [-]

c_s – je oprava na uspořádání trubek ve svazku podle [3] pro $\sigma_2 > 2$ je $c_s = 1$ [-]

Koeficient β , $\beta \cdot h_z$ a poměr D_z/D

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \Psi_z \cdot \alpha_k}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \Psi_z \cdot \alpha_k^{sp})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 76,84}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,018 \cdot 0,85 \cdot 76,84)}} \quad (6.303)$$

$$\beta = 38,74$$

$$\beta \cdot h_z = 38,71 \cdot 0,01 = 0,3874 \quad (6.304)$$

$$\frac{D_z}{D} = \frac{0,052}{0,032} = 1,625 \quad (6.305)$$

Pomocí $\beta \cdot h_z$ a D_z/D je získána z normogramu podle [3] hodnota součinitele efektivnosti žebra $E = 0,94 [-]$

kde λ_z - je součitel tepelné vodivosti žebra, voleno pro ocel $\lambda_z = 40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_{sp} = [0,7 \cdot 0,94 \cdot 1 + 0,3] \cdot \frac{0,85 \cdot 76,84}{1 + 0,018 \cdot 0,85 \cdot 76,84} = 28,77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.16.4 Parametry média

Střední teplota vody

$$t_{stř}^v = \frac{t_{ekol,II}^{out} + t_{ekol,II}^{in}}{2} = \frac{218 + 154}{2} = 186 \text{ °C} \quad (6.306)$$

Střední tlak páry

$$p_{stř}^v = \frac{p_{ekol,II}^{in} + p_{ekol,II}^{out}}{2} = \frac{11,55 + 11,27}{2} = 11,41 \text{ MPa} \quad (6.307)$$

Fyzikální parametry vody

Tyto parametry jsou získané pro střední tlak a teplotu pomocí programu [5].

Střední měrný objem $v = 0,001127 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Rychlost vody

$$w_v = \frac{(m_{pp} - m_{vsl} - m_{vsII} + m_o) \cdot v}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr}} \quad (6.308)$$

$$w_v = \frac{(24,44 - 0,50 - 1,28 + 0,12) \cdot 0,001127}{\frac{\pi \cdot 0,0248^2}{4} \cdot 44} = 1,21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

6.16.5 Výkon předaný ekonomizérem EKOl,II

$$Q_{ekol,II}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{ekol,II}}{1000} \quad (6.309)$$

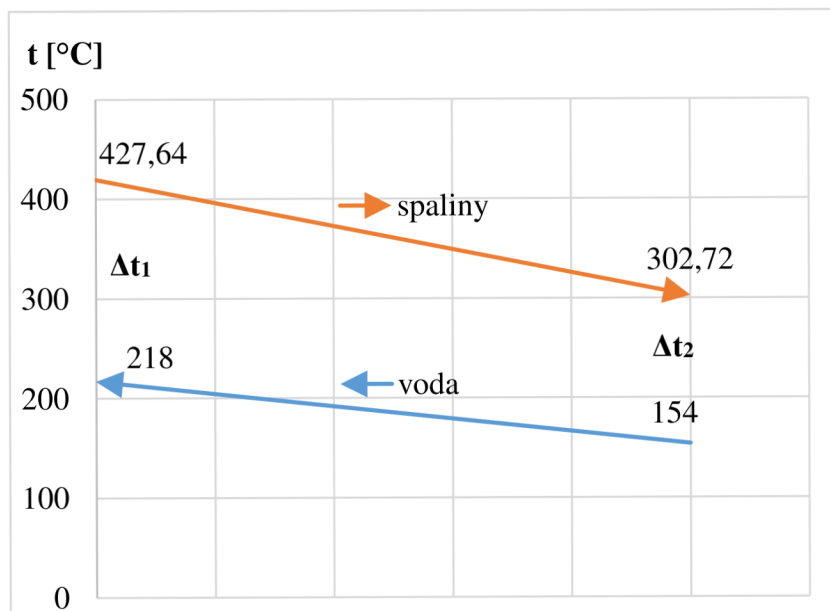
Součinitel prostupu tepla

$$k = \alpha_{sp} = 28,77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.310)$$

Střední logaritmický spád

Ekonomizér III je navržený jako protiproudý, rozložení jednotlivých teplot je v následujícím obrázku 6.28.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{(427,64 - 218) - (302,72 - 154)}{\ln\left(\frac{427,64 - 218}{302,72 - 154}\right)} = 177,64 \text{ °C} \quad (6.311)$$



Obrázek 6.28 Průběh teploty spaliny a vody v místě ekonomizéru EKOl,II

Výkon předaný ekonomizérem EKOl,II

$$Q_{ekol,II}^{tep} = \frac{28,77 \cdot 177,64 \cdot 1237,30}{1000} = 6323,15 \text{ kW}$$

6.16.6 Bilance ekonomizéru EKOl,II

$$x = \frac{Q_{ekol,II}^{tep} - Q_{ekol,III}^{tep}}{Q_{ekol,III}^{tep}} \cdot 100 = \frac{6323,15 - 6400,18}{6323,15} \cdot 100 = -1,22 \% \quad (6.312)$$

Tato hodnota leží v intervalu $\pm 2 \%$, bilance VYHOVUJE.

6.17 Ohřívák vzduchu OVZI,II,III

Ohřívák vzduchu OVZI,II,III je tvořen třemi sériově zapojenými teplosměnnými plochami, které jsou navrženy s vystřídáním uspořádáním trubek.

6.17.1 Návrh geometrie

Vnější průměr trubek $D = 0,0445$ m

Vnitřní průměr trubek $d = 0,0393$ m

Počet trubek v řadě $n_{tr} = 36$

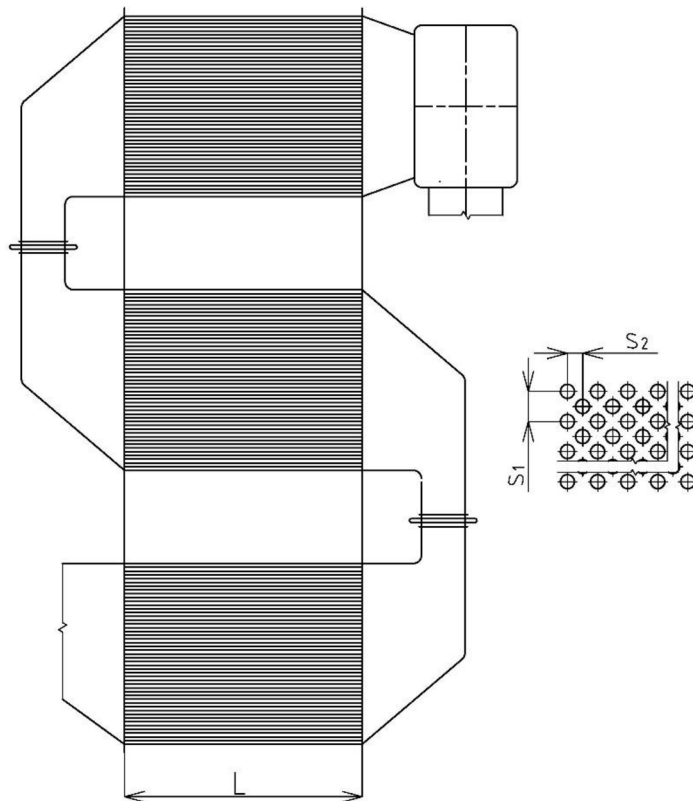
Počet řad $n_r = 144$

Délka trubek $L = 3$ m

Podélná rozteč $S_2 = 0,0475$ m

Příčná rozteč $S_1 = 0,095$ m

Hloubka tahu $b = 3,5$ m



Obrázek 6.29 Ohřívák vzduchu OVZI,II,III

Plocha trubek

$$S_{ovzi,ii,iii} = \pi \cdot D \cdot n_{tr} \cdot n_r \cdot L = \pi \cdot 0,0445 \cdot 36 \cdot 144 \cdot 3 = 2174,18 \text{ m}^2 \quad (6.313)$$

Průtočný průřez pro spaliny

$$F = L \cdot b - n_{tr} \cdot L \cdot D = 3 \cdot 3,5 - 36 \cdot 3 \cdot 0,0445 = 5,69 \text{ m}^2 \quad (6.314)$$

6.17.2 Parametry spalin

Výstupní entalpie spalin

$$i_{out} = i_{in} - \frac{Q_{ovzi,ii,iii}}{M_{pv} \cdot \varphi} \quad (6.315)$$

$$i_{out} = 2116,90 - \frac{5554,59}{7,065 \cdot 0,991} = 3031,47 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde i_{in} – je entalpie na výstupu z ekonomizéru EKOI,II [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

$Q_{ovzi,ii,iii}$ – je výkon (vzduchový) ohříváku vzduchu OVZI,II,III [kW]

Výstupní teplota spalin

Interpolací tabulky 2.4 pro entalpii i_{out} je získána teplota spalin na výstupu z OVZI,II,III.

$$t_{out} = 190,69 \text{ °C}$$

Tato teplota se oproti navržené výstupní teplotě liší o 0,31 °C, toto přiblížení je tak dostatečné.

Střední teplota spalin

$$t_{stř}^{sp} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{302,72 + 190,69}{2} = 246,70 \text{ °C} \quad (6.316)$$

kde t_{in} – je teplota spalin na vstupu do ohříváku vzduchu OVZI,II,III [°C]

Průtok spalin

$$V_{sp} = M_{pv} \cdot (O_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{vzmin}) \cdot \frac{t_{stř}^{sp} + 273,15}{273,15}$$

$$V_{sp} = 7,065 \cdot (3,88865 \cdot (1,35 - 1) \cdot 3,03456) \cdot \frac{246,70 + 273,15}{273,15} \quad (6.317)$$

$$V_{sp} = 66,43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

kde α – je přebytek vzduchu v místě ohříváku vzduchu OVZI,II,III [-]

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{V_{sp}}{F_{st}} = \frac{66,43}{5,69} = 11,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.318)$$

Fyzikální parametry spalin

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0455 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 3,88 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,701$ [-]

6.17.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

Tento součinitel je počítán pouze pro převládající příčné proudění.

$$\alpha_k^{sp} = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w_{sp} \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (6.319)$$

kde c_z – je oprava pro počet podélných řad, podle [3] $c_z = 1$ [-]

c_s – je oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči σ_1 a hodnoty φ_σ [-]

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,095}{0,0445} = 2,13 \quad (6.320)$$

Poměrná příčná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,0475}{0,0445} = 1,07 \quad (6.321)$$

Poměrná úhlopříčná rozteč

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 2,13^2 + 1,07^2} = 1,51 \quad (6.322)$$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{1,51 - 1}{1,07 - 1} = 2,23 \quad (6.323)$$

Pro $1,7 < \varphi_\sigma \leq 4,5$ a $\sigma_1 < 3$ je $c_s = 0,275 \cdot \varphi_\sigma^{0,5}$

Koeficient c_s

$$c_s = 0,275 \cdot \varphi_\sigma^{0,5} = 0,275 \cdot 2,23^{0,5} = 0,41 \quad (6.324)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_k^{sp} = 1 \cdot 0,41 \cdot \frac{0,0455}{0,0445} \cdot \left(\frac{11,67 \cdot 0,0445}{3,88 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} \cdot 0,701^{0,33}$$

$$\alpha_k^{sp} = 111,58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.17.4 Parametry vzduchu

Střední teplota vzduchu

$$t_{stř}^{vz} = \frac{t_{ovzl,II,III}^{out} + t_{ovzl,II,III}^{in}}{2} = \frac{195 + 40}{2} = 117,5 \text{ °C} \quad (6.325)$$

Fyzikální parametry vzduchu

Tyto parametry jsou získané interpolací tabulky 6.1 pro střední teplotu spalin.

Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,0331 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Součinitel kinematické viskozity $\nu = 2,52 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pradtlovo číslo $Pr = 0,69$ [-]

Objemový průtok vzduchu

$$V_{vz} = M_{pv} \cdot \alpha \cdot 0_{vzmin} \cdot \frac{t_{stř}^{vz} + 273,15}{273,15} \quad (6.326)$$

$$V_{vz} = 7,065 \cdot 1,274 \cdot 3,03456 \cdot \frac{117,5 + 273,15}{273,15} = 39,06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost vzduchu

$$w_{vz} = \frac{V_{vz}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot \frac{n_{\ddot{r}}}{3}} = \frac{39,06}{\frac{\pi \cdot 0,0393^2}{4} \cdot 36 \cdot \frac{144}{3}} = 18,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.327)$$

6.17.5 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu

$$\alpha_k^{vz} = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \quad (6.328)$$

kde d_e – je ekvivalentní průměr (vnitřní průměr trubky) [m]

c_t – je opravný koeficient, závisí na teplotě stěny a proudu [-]

c_l – je opravný koeficient na poměrnou délku, podle [3] $c_l = 1$ [-]

Koeficient c_t

$$c_t = \left(\frac{T_{st}^{vz}}{T_{st}} \right)^{0,5} \quad (6.329)$$

kde T_{st} – je teplota stěny trubky [K]

Teplota stěny

$$T_{st} = \frac{T_{st}^{vz} + T_{st}^{sp}}{2} = \frac{117,5 + 273,15 + 246,70 + 273,15}{2} = 455,25 \text{ K} \quad (6.330)$$

Koeficient c_t

$$c_t = \left(\frac{T_{st}^{vz}}{T_{st}} \right)^{0,5} = \left(\frac{119 + 273,15}{455,25} \right)^{0,5} = 0,93$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu

$$\alpha_k^{vz} = 0,023 \cdot \frac{0,0331}{0,0393} \cdot \left(\frac{18,63 \cdot 0,0393}{2,52 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} \cdot 0,69^{0,4} \cdot 0,93 \cdot 1$$
$$\alpha_k^{vz} = 57,58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.17.6 Součinitel přestupu tepla na straně spalin

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot \alpha_k^{sp} = 1 \cdot 111,58 = 111,58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.331)$$

kde ω – je součinitel využití plochy, podle [3] $\omega = 1$ [-]

6.17.7 Výkon předaný ohřívákem vzduchu OVZI,II,III

$$Q_{ovzI,II,III}^{tep} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S_{ovzI,II,III}}{1000} \quad (6.332)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{sp} \cdot \alpha_k^{vz}}{\alpha_{sp} + \alpha_k^{vz}} = 0,55 \cdot \frac{111,58 \cdot 57,58}{111,58 + 57,58} = 20,89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6.333)$$

kde ξ – je součinitel využití plochy, podle odborné konzultace volím $\xi = 0,55$ [-]

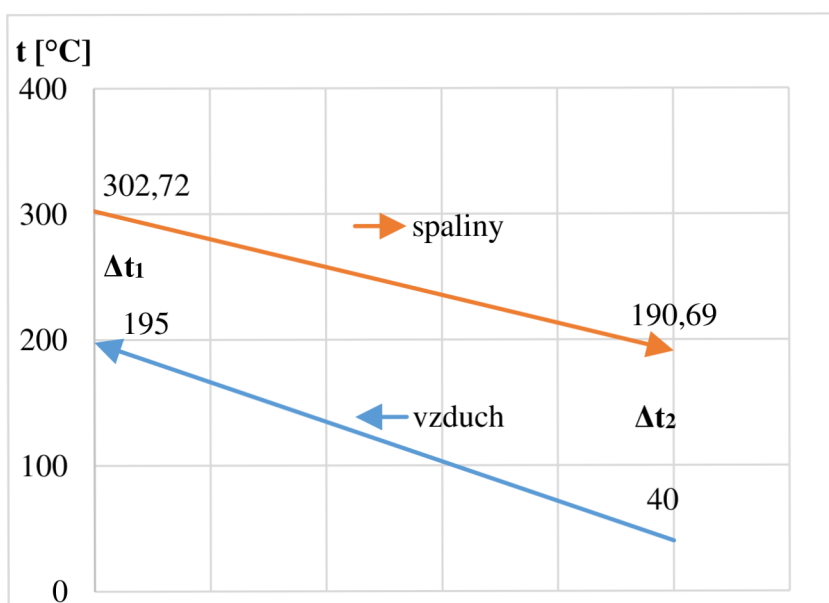
Střední logaritmický spád

Ohřívač vzduchu OVZI,II,III je navržený jako protiproudý, na rozdíl od předešlých teplosměnných ploch se zde započítává vliv křížového proudění vyjádřeného pomocí koeficientu ψ .

$$\Delta t = \psi \cdot \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} \quad (6.334)$$

$$\Delta t = 0,97 \cdot \frac{(302,72 - 195) - (190,69 - 40)}{2,3 \cdot \log\left(\frac{302,72 - 195}{190,69 - 40}\right)} = 124,30 \text{ °C}$$

kde ψ – je součinitel křížového proudění, podle [3] volím $\psi = 0,97 [-]$



Obrázek 6.30 Průběh teploty spalin a vzduchu v místě ohřívačů vzduchu OVZI,II,III

Výkon předaný ohřívačem vzduchu OVZI,II,III

$$Q_{ovzI,II,III}^{tep} = \frac{20,89 \cdot 124,30 \cdot 2174,18}{1000} = 5645,50 \text{ kW}$$

6.17.8 Bilance ohřívačů vzduchu OVZI,II,III

$$x = \frac{Q_{ovzI,II,III}^{tep} - Q_{ovzI,II,III}}{Q_{ovzI,II,III}^{tep}} \cdot 100 = \frac{5645,50 - 5554,59}{5645,50} \cdot 100 = 1,61 \% \quad (6.335)$$

Tato hodnota leží v intervalu $\pm 2 \%$, bilance VYHOVUJE.

6.18 Výparník

Výparník kotle se skládá z následujících ploch: membránové stěny ohniště, doplňkové plochy v podobě membránových stěn v místech přehříváků PIII, PIV, PII a kotlová mříž.

6.18.1 Tepelný výkon výparníku

$$Q_{vyp}^{tep} = Q_{vyp,kom}^{tep} + Q_{pIIIa,dp}^{tep} + Q_{pIIIb,dp}^{tep} + Q_{pIV,dp}^{tep} + Q_{pII,dp}^{tep} + Q_{mříž}^{tep}$$
$$Q_{vyp}^{tep} = 33079,05 + 371,89 + 962,83 + 277,71 + 245,79 + 1060,57 \quad (6.336)$$
$$Q_{vyp}^{tep} = 35994,85 \text{ kW}$$

kde $Q_{vyp,kom}^{tep}$ – je výkon předaný výparníku ve spalovací komoře podle rovnice (4.29) [kW]

6.18.2 Bilance výparníku

$$x = \frac{Q_{vyp}^{tep} - Q_{vyp}}{Q_{vyp}^{tep}} \cdot 100 = \frac{35994,85 - 36461,78}{35994,85} \cdot 100 = -1,28 \% \quad (6.337)$$

kde Q_{vyp} – je parní výkon výparníku podle rovnice (5.12) [kW]

Tato hodnota leží v intervalu $\pm 2 \%$, bilance VYHOVUJE.

7 Celková bilance kotle

Celková bilance kotle je provedena porovnáním parního výkonu kotle s výkonem z tepelného výpočtu, kdy pro úspěšné ukončení návrhu kotle musí být rozdíl mezi těmito výkony maximálně $\pm 0,5 \%$ [3].

7.1 Skutečná tepelná účinnost kotle

Skutečná účinnost kotle je vyčíslena pomocí skutečné odchozí teploty spalin, která vychází z tepelného výpočtu. Tato teplota je zpětně dosazena do výpočtu účinnosti nepřímou metodou, kde má vliv na dva druhy ztrát a to na ztrátu komínovou (fyzickým teplem spalin) a na ztrátu fyzickým teplem tuhých zbytků, ale jelikož velikost této ztráty činí pouze několik setin procenta, tak dopad změny výstupní teploty na tuto ztrátu je velice minimální. Proto je skutečná účinnost vyčíslena pouze se změnou komínové ztráty.

$$\eta_k^{skut} = 100 - \sum Z = 100 - Z_{co} - Z_f - Z_{sv} - Z_k^{skut} - Z_n \quad (7.1)$$

Skutečná Ztráta fyzickým teplem spalin

$$Z_k^{skut} = (100 - Z_c) \cdot \frac{i_{sp}^{190,69} - I_{vz}^{25}}{Q_p} = (100 - 4,4244) \cdot \frac{1323,16 - 99,28}{10934,32} \quad (7.2)$$

$$Z_k = 10,3888 \%$$

kde $i_{sp}^{190,69}$ – je entalpie spalin při skutečné odchozí teplotě 190,69 °C a přebytku vzduchu za kotlem [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

I_{vz}^{25} – je entalpie vzduchu při teplotě okolí a přebytku vzduchu za kotlem [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Skutečná Tepelná účinnost kotle

$$\eta_k^{skut} = 100 - \sum Z = 100 - 4,4244 - 0,0757 - 0,0569 - 10,3888 - 0,2$$

$$\eta_k^{skut} = 84,0542 \%$$

Tato hodnota se od navržené účinnosti liší o 0,0193 %, takže přiblížení je dostatečné.

7.2 Celkový výkon z tepelného výpočtu

Do tepelného výkonu kotle se započítávají všechny teplosměnné plochy, kromě ohříváků vzduchu.

$$\begin{aligned} Q^{tep} &= Q_{vyp}^{tep} + Q_{pIIIA}^{tep} + Q_{pIIIB}^{tep} + Q_{pIV}^{tep} + Q_{pII}^{tep} + Q_{pI}^{tep} + Q_{ekoIII}^{tep} + Q_{ekoIII}^{tep} \\ Q^{tep} &= 35994,85 + 3404,33 + 2349,70 + 6271,15 + 5993,69 + 3720,89 + \\ &\quad + 3636,33 + 6400,18 \\ Q^{tep} &= 67694,08 \text{ kW} \end{aligned} \quad (7.3)$$

7.3 Bilance kotle

$$x = \frac{Q^{tep} - Q_v}{Q^{tep}} \cdot 100 = \frac{67694,08 - 67920,22}{67694,08} \cdot 100 = -0,33 \% \quad (7.4)$$

kde Q_v – je parní výkon kotle, neboli podle rovnice (3.13) výrobní teplo páry [kW]

Tato hodnota leží v intervalu $\pm 0,5 \%$, bilance VYHOVUJE.

Závěr

V první kapitole je podle zadaného paliva a okolních podmínek spočítána stechiometrie spalování. Základní údaje získané z této kapitoly jsou teoretické množství vzduchu potřebného ke spalování a teoretické množství vzniklých spalin. Následně je vypočítáno skutečné množství spalovacího vzduchu a vzniklých spalin s využitím navržených přebytků vzduchů. Na závěr této kapitoly je určena entalpie spalovacího vzduchu a vzniklých spalin při různých teplotách. Tyto hodnoty jsou pak vyjádřené graficky v I-t diagramu.

Následující kapitola se zabývá tepelnou bilancí kotle. Zde se nachází výpočet parního výkonu kotle ze zadaných parametrů. Dále určení jednotlivých ztrát, které slouží k následujícímu výpočtu tepelné účinnosti kotle nepřímou metodou, která z návrhu vychází 84,0349 %. Poslední část této kapitoly je věnována výpočtu rosného bodu, kde jsou využity dvě metody výpočtu.

Další kapitola se sestává z rozměrového návrhu a tepelného výpočtu spalovací komory. Základní rozměry spalovací komory byly zvoleny v rámci odborné konzultace. Následně je vypočítáno průřezové a objemové zatížení a tyto hodnoty jsou porovnány s rozmezími získanými v dostupné literatuře [4], [7]. Cílem tepelného výpočtu je zjištění výstupní teploty spalin odcházejících ze spalovací komory. Tato teplota je v prvním kroku zvolena a následně iteračně dopočítána. Výsledná hodnota této teploty je stanovena na 949,80 °C.

První část předposlední kapitoly se zabývá uspořádáním jednotlivých teplosměnných ploch a návrhem jejich výkonů a tlakových ztrát na straně média. Druhá část obsahuje vysvětlení výpočtu jednotlivých entalpií mezi plochami na straně spalin. Na konci této kapitoly je pak vyobrazen pilový diagram, který je výsledkem iteračního výpočtu získaného v následující kapitole.

Poslední kapitola se zabývá tepelným výpočtem teplosměnných ploch. Na začátku kapitoly jsou vyobrazeny tabulky s fyzikálními vlastnostmi vzduchu a spalin. Fyzikální vlastnosti vody a páry jsou získány pomocí programu [5]. Zbytek kapitoly tvoří výpočet jednotlivých teplosměnných ploch ve směru toku spalin. Výsledkem je pak skutečná teplota odchozích spalin, která je vyčíslena na 190,69 °C, což je o 0,31 °C méně, než je teplota navržená. Tato teplota je pak použita k výpočtu skutečné tepelné účinnosti kotle, která je 84,0542 %. Ukončením této kapitoly a zároveň celé práce je ověření bilance kotle porovnáním parního výkonu kotle s výkonem z tepelného výpočtu, kde jsou sčítány výkony všech teplosměnných ploch kromě ohříváků vzduchu. Rozdíl těchto výkonů byl stanoven na 0,33 %, což splňuje podmínku z literatury [3], kde rozdíl těchto výkonů může být maximálně $\pm 0,5$ %.

Seznam použitých zdrojů

- [1] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [2] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [3] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet*. 4. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. Učební texty vysokých škol.
- [4] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-3955-9.
- [5] X steam version 2.6 Excel Steam Tables.
- [6] Bilfinger Babcock CZ s.r.o. *Bilance kotle*: Brno, 2016.
- [7] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka	Jednotka	Název
A	[-]	součinitel zohledňující druh paliva při vlivu sálení volných objemů
A	[-]	část přehříváku III
A^r	[%]	obsah popela v palivu
A_r	[% · kg · MJ ⁻¹]	redukovaný obsah popela
a	[m]	šířka spalovací komory
a	[-]	šířka vstupního kanálu přehříváku III
a	[-]	stupeň černosti spalin
a_A	[-]	stupeň černosti spalin v místě přehříváku IIIA
a_B	[-]	stupeň černosti spalin v místě přehříváku IIIB
B	[-]	část přehříváku III
B_0	[-]	Bolzmannovo číslo
b	[m]	hloubka spalovací komory
b	[m]	hloubka tahu
$(CO_2)_{max}$	[%]	maximální obsah oxidu uhličitého ve spalinách
C_{pop}	[%]	procento hořlaviny v popílku
C_{p-s}	[%]	procento hořlaviny v propadu a škváře
C^r	[%]	obsah uhlíku v palivu
c	[m]	nižší výška spalovací komory
c_l	[-]	opravný koeficient na poměrnou délku
c_p	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	měrné teplo paliva
c_{pop}	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	měrné teplo popílku
c_{p-s}	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	měrné teplo propadu a škváry
c_s	[-]	opravný koeficient pro uspořádání svazku v závislosti na příčné a podélné rozteči
c_{su}	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	měrné teplo sušiny
c_t	[-]	opravný koeficient závislý na teplotě stěny a proudu
c_w	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	měrné teplo vody
c_z	[-]	opravný koeficient na počet podélných řad
D	[m]	vnější průměr trubky
D_z	[m]	vnější průměr žeber
d	[m]	vyšší výška spalovací komory
d	[m]	vnitřní průměr trubky
d_e	[m]	ekvivalentní průměr
E	[-]	součinitel efektivnosti žebra
$EKOI, II$	[-]	první a druhý stupeň ekonomizéru
$EKOIII$	[-]	třetí stupeň ekonomizéru

e	[m]	šířka výstupního otvoru spalovací komory
F	[m ²]	průtočný průřez pro spaliny
F_{in}	[m ²]	vstupní průtočný průřez pro spaliny
F_n	[m ²]	plocha nechlazených prostorů ohniště
F_o	[m ²]	plošný obsah ohniště
F_{out}	[m ²]	výstupní průtočný průřez pro spaliny
F_{sk}	[m ²]	skutečná sálavá plocha stěn ohniště
F_{st}	[m ²]	střední průtočný průřez pro spaliny
F_{vo}	[m ²]	plocha výstupního otvoru ohniště
f	[-]	součinitel udávající množství vlhkosti ve vzduchu
f	[m]	délka přepony spalovací komory
H^r	[%]	obsah vodíku v palivu
h_z	[m]	výška žebra
I_{ok}	[kJ · kg ⁻¹]	entalpie spalin vystupujících ze spalovací komory
I_p	[kJ · kg ⁻¹]	entalpie popílku
I_{sp}	[kJ · kg ⁻¹]	entalpie spalin
I_{spmin}	[kJ · kg ⁻¹]	entalpie minimálního množství spalin
I_u	[kJ · kg ⁻¹]	užitečné teplo uvolněné v ohništi
I_{vz}	[kJ · kg ⁻¹]	entalpie vzduchu
I_{vzmin}	[kJ · kg ⁻¹]	entalpie minimálního množství vzduchu
i_{Ar}	[kJ · Nm ⁻³]	entalpie argonu
i_{CO_2}	[kJ · Nm ⁻³]	entalpie oxidu uhličitého
i_{H_2O}	[kJ · Nm ⁻³]	entalpie vodní páry
i_{in}	[kJ · kg ⁻¹]	vstupní entalpie spalin
i^{in}	[kJ · kg ⁻¹]	vstupní entalpie vody, páry a vzduchu
i_{N_2}	[kJ · Nm ⁻³]	entalpie dusíku
i_{nv}	[kJ · kg ⁻¹]	entalpie napájecí vody
i_{out}	[kJ · kg ⁻¹]	výstupní entalpie spalin
i^{out}	[kJ · kg ⁻¹]	výstupní entalpie vody, páry a vzduchu
i_p	[kJ · kg ⁻¹]	fyzické teplo paliva
i_{pp}	[kJ · kg ⁻¹]	entalpie výstupní páry
i_{SO_2}	[kJ · Nm ⁻³]	entalpie oxidu siřičitého
i_{vz}^s	[kJ · Nm ⁻³]	entalpie suchého vzduchu
i_{wr}	[kJ · kg ⁻¹]	entalpie syté vody z bubnu
k	[m ⁻¹ · MPa ⁻¹]	součinitel zeslabení sálání
k	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	součinitel prostupu tepla
k_k	[m ⁻¹ · MPa ⁻¹]	součinitel zeslabení sálání koksovými částicemi
k_0	[-]	součinitel vlivů sálání volných objemů
k_p	[m ⁻¹ · MPa ⁻¹]	součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

k_{sp}	$[m^{-1} \cdot MPa^{-1}]$	součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny
L	$[m]$	délka trubek
l_0	$[m]$	šířka volného objemu ve směru toku spalin
l_0	$[m]$	šířka teplosměnné plochy ve směru toku spalin
M	$[-]$	součinitel závislý na spalovaném palivu a rozložení teplot v ohništi
M_p	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok skutečně spáleného paliva
M_{pv}	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok skutečně přivedeného paliva
$mgCO$	$[mg \cdot Nm^{-3}]$	emisní limit oxidu uhelnatého ve spalinách
m_o	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok odluhu z bubny
m_{pp}	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok výstupní páry
$m_{\text{š}A}$	$[m]$	šířková mezera mezi skupinou hadů v přehříváku PIIIA
$m_{\text{š}B}$	$[m]$	šířková mezera mezi skupinou hadů v přehříváku PIIIB
m_{vA}	$[m]$	výšková mezera mezi skupinou hadů v přehříváku PIIIA
m_{vB}	$[m]$	výšková mezera mezi skupinou hadů v přehříváku PIIIB
m_{vSI}	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok prvního vstříku napájecí vody
m_{vSII}	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok druhého vstříku napájecí vody
N^r	$[\%]$	obsah dusíku v palivu
n_d	$[-]$	počet desek šotového přehříváku
$n_{\text{ř}}$	$[-]$	počet řad trubek
n_{tr}	$[-]$	počet desek šotového přehříváku
n_z	$[-]$	počet žeber na metr délky
O_{Ar}	$[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$	objem argonu ve spalinách
OB	$[\%]$	pomocný koeficient ve výpočtu rosného bodu
O_{CO_2}	$[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$	objem oxidu uhličitého ve spalinách
O_{H_2O}	$[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$	objem vodní páry ve spalinách
O_{H_2Omin}	$[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$	minimální objem vodní páry ve spalinách
O_{N_2}	$[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$	objem dusíku ve spalinách
O^r	$[\%]$	obsah kyslíku v palivu
O_{O_2ref}	$[\%]$	referenční obsah kyslíku ve spalinách
O_{SO_2}	$[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$	objem oxidu siřičitého ve spalinách
O_{sp}	$[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$	množství spalin
O_{spmin}	$[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$	minimální množství spalin
O_{spmin}^s	$[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$	minimální množství suchých spalin
OVZI, II, III	$[-]$	první, druhý a třetí díl ohříváku vzduchu
OVZIV	$[-]$	čtvrtý díl ohříváku vzduchu
O_{vz}	$[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$	množství vzduchu
O_{vzmin}	$[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$	minimální množství vzduchu
O_{vzmin}^s	$[Nm^3 \cdot kg^{-1}]$	minimální množství suchého vzduchu

o_1	[m]	vstupní obvod průřezu kanálu
o_2	[m]	výstupní obvod průřezu kanálu
$o_{stř}$	[m]	střední obvod průřezu kanálu
PI	[-]	první stupeň přehříváku
PII	[-]	druhý stupeň přehříváku
$PIII$	[-]	třetí stupeň přehříváku
PIV	[-]	čtvrtý stupeň přehříváku
Pr	[-]	Prandtlovo číslo
p	[m]	horní přepona doplňkových ploch v místě přehříváku III
p	[MPa]	tlak v ohništi
p''	[Pa]	tlak nasycených par ve vzduchu
p_1	[m]	spodní přepona doplňkových ploch
p_2	[m]	horní přepona doplňkových ploch
p_c	[Pa]	tlak okolí
p_{H_2O}	[Pa]	parciální tlak vodní páry ve spalinách
p^{in}	[MPa]	tlak páry nebo vody na vstupu do teplosměnné plochy
p_n	[Pa]	tlak za normálních podmínek
p_{nv}	[MPa]	tlak napájecí vody
p^{out}	[MPa]	tlak páry nebo vody na výstupu do teplosměnné plochy
p_{pp}	[MPa]	tlak výstupní páry
p_{sp}	[MPa]	parciální tlak tříatomových plynů
$p_{stř}^p$	[MPa]	střední tlak páry
$p_{stř}^v$	[MPa]	střední tlak vody
p_w	[MPa]	tlak v bubnu
Q	[kW]	parní výkon
Q_{ci}	[kJ · kg ⁻¹]	výhřevnost uhlíku
Q_i^r	[kJ · kg ⁻¹]	výhřevnost
Q_s	[kJ · kg ⁻¹]	množství tepla odevzdané v ohništi do stěn
$Q_{s,d}$	[kW]	sálavý výkon zachycený přehřívákem
$Q_{s,ddp}$	[kW]	sálavý výkon zachycený doplňkovými plochami
$Q_{s,dp}$	[kW]	sálavý výkon zachycený v místě přehříváku
$Q_{s,dA}$	[kW]	sálavý výkon zachycený přehřívákem IIIA
$Q_{s,dAdp}$	[kW]	sálavý výkon zachycený doplňkovými plochami v místě přehříváku IIIA
$Q_{s,dpA}$	[kW]	sálavý výkon zachycený v místě přehříváku IIIA
$Q_{s,dB}$	[kW]	sálavý výkon zachycený přehřívákem IIIB
$Q_{s,dBdp}$	[kW]	sálavý výkon zachycený doplňkovými plochami v místě přehříváku IIIB

$Q_{s,dpB}$	[kW]	sálavý výkon zachycený v místě přehříváku III B
Q^{spal}	[kW]	výkon spalin
Q_{so}	[kW]	sálavý výkon z ohniště
Q^{tep}	[kW]	výkon teplosměnné plochy z tepelného výpočtu
Q_{dp}^{tep}	[kW]	výkon doplňkové plochy z tepelného výpočtu
Q_v	[kW]	výrobní teplo páry
$Q_{vyp,kom}^{tep}$	[kW]	výkon výparníku ve spalovací komoře z tepelného výpočtu
Q_{vz}	[kJ · kg ⁻¹]	teplo přivedené do kotle se vzduchem
Q_{vzd}	[kJ · kg ⁻¹]	teplo přehřátého přivedeného vzduchu
\bar{q}	[kW · m ⁻²]	střední tepelné zatížení stěn ohniště
q_f	[kW · m ⁻²]	plošné tepelné zatížení ohniště
q_m	[kW · m ⁻²]	hustota tepelného toku do stěn v místě výstupního průřezu
q_o	[kW · m ⁻²]	hustota tepelného toku výstupním průřezem
q_{sv}	[kW · m ⁻²]	hustota tepelného toku procházejícího výstupním průřezem deskového přehříváku
q_{svA}	[kW · m ⁻²]	hustota tepelného toku procházejícího výstupním průřezem přehříváku IIIA
q_{svB}	[kW · m ⁻²]	hustota tepelného toku procházejícího výstupním průřezem přehříváku IIIB
q_v	[kW · m ⁻³]	objemové tepelné zatížení ohniště
R	[m ²]	plocha hořící vrstvy
R_{H_2O}	[Nm ³ · Nm ⁻³]	podíl vodní páry ve spalinách
r_1	[m]	spodní výškový rozdíl výšek doplňkových ploch
r_2	[m]	horní výškový rozdíl výšek doplňkových ploch
r_{H_2O}	[-]	objemová část vody ve spalinách
r_{RO_2}	[-]	objemová část oxidu siřičitého a uhličitého ve spalinách
r_{sp}	[-]	objemová část tříatomových plynů ve spalinách
S	[m ²]	teplosměnná plocha
S_0	[m ²]	projekční povrch prostoru v místě deskového přehříváku
S_1	[m]	příčná rozteč
S_1	[m ²]	vstupní průtočný průřez pro spaliny
S_{1m}	[m ²]	plocha jednoho metru trubky s žebry
S_2	[m]	podélná rozteč
S_2	[m ²]	výstupní průtočný průřez pro spaliny
S_{dp}	[m ²]	obsah doplňkové plochy
S_{dp}^{skut}	[m ²]	skutečný obsah doplňkové plochy
S_h	[m ²]	plocha volných částí trubky se žebry
S^r	[%]	obsah síry v palivu

S_r	[% · kg · MJ ⁻¹]	redukovaný obsah popela
S^{skut}	[m ²]	skutečná plocha teplosměnné plochy
$S_{stř}$	[m ²]	střední průtočný průřez pro spaliny
$S_{ž}$	[m ²]	plocha žeber
\check{S}_A	[m]	šířka desek přehříváku IIIA
\check{S}_B	[m]	šířka desek přehříváku IIIB
$\check{S}_{\check{S}A}$	[m]	šířka desek přehříváku IIIA
$\check{S}_{\check{S}B}$	[m]	šířka desek přehříváku IIIB
$s_{ž}$	[m]	rozteč žeber
\check{s}	[m]	šířka tahu
T_n	[K]	absolutní teplota za normálních podmínek
T_{np}	[K]	absolutní teplota nechlazeného plamene
T_o	[K]	absolutní teplota volného objemu před teplosměnnou plochou
T_{ok}	[K]	absolutní teplota výstupních spalin ze spalovací komory
T_{st}	[K]	absolutní teplota stěny trubky
$T_{stř}^{sp}$	[K]	absolutní střední teplota spalin
$T_{stř}^{vz}$	[K]	absolutní střední teplota vzduchu
T_z	[K]	absolutní teplota zaprášeného povrchu trubek
t	[°C]	teplota
t_{in}	[°C]	vstupní teplota spalin
t^{in}	[°C]	vstupní teplota páry, vody a vzduchu
t_k	[°C]	teplota sytosti páry při parciálním tlaku vodní páry
t_{np}	[°C]	teplota nechlazeného plamene
t_{nv}	[°C]	teplota napájecí vody
t_{out}	[°C]	výstupní teplota spalin
t^{out}	[°C]	výstupní teplota páry, vody a vzduchu
t_p	[°C]	teplota paliva
t_{pp}	[°C]	teplota výstupní páry
t_{pop}	[°C]	teplota popílku
t_{p-s}	[°C]	teplota propadu a škváry
t_{r1}	[°C]	teplota rosného bodu podle první metody
t_{r2}	[°C]	teplota rosného bodu podle druhé metody
$t_{stř}^p$	[°C]	střední teplota páry
$t_{stř}^{sp}$	[°C]	střední teplota spalin
$t_{stř}^v$	[°C]	střední teplota vody
$t_{stř}^{vz}$	[°C]	střední teplota vzduchu
t_z	[°C]	teplota zaprášeného povrchu trubek
$t_{ž}$	[m]	tloušťka žeber
V	[m]	výška trubek

V_0	[m ³]	objem prostoru desek
V_{1A}	[m]	výška desek přehříváku IIIA
V_{2A}	[m]	výška desek přehříváku IIIA
V_{1B}	[m]	výška desek přehříváku IIIB
V_{2B}	[m]	výška desek přehříváku IIIB
V_{H_2O}	[-]	objem vodní páry na 1 Nm ³ suchého vzduchu
V_o	[m ³]	objem ohniště
V_{sp}	[m ³ · s ⁻¹]	objemový průtok spalin
v	[m ³ · kg ⁻¹]	měrný objem
v	[-]	výparník
W_t^r	[%]	obsah vody v palivu
w_p	[m · s ⁻¹]	rychlost páry
w_{sp}	[m · s ⁻¹]	rychlost spalin
w_{spA}	[m · s ⁻¹]	rychlost spalin v místě přehříváku IIIA
w_{spB}	[m · s ⁻¹]	rychlost spalin v místě přehříváku IIIB
w_v	[m · s ⁻¹]	rychlost vody
w_{vz}	[m · s ⁻¹]	rychlost vzduchu
X_p	[%]	procentuální zastoupení popílku
X_{p-s}	[%]	procentuální zastoupení propadu a škváry
x	[-]	úhlový součinitel
x	[-]	poměrné množství sekundárního vzduchu
x	[%]	bilanční odchylka
x_o	[-]	poměrná výška maximální teploty plamene
y_h	[-]	součinitel tepelné nerovnoměrnosti po výšce ohniště
Z_c	[%]	ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích
Z_{co}	[%]	ztráta hořlavinou ve spalinách
Z_f	[%]	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
Z_k	[%]	ztráta fyzickým teplem spalin
Z_n	[%]	nepočitatelná ztráta
Z_{sv}	[%]	ztráta sáláním do okolí
α	[-]	přebytek vzduchu
α_k^p	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany páry
α_k^{sp}	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin
α_{ok}	[-]	přebytek vzduchu za spalovací komorou
α_s	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla sáláním
α_{sp}	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla ze strany spalin
β	[-]	součinitel zohledňující přebytek vzduchu
β	[-]	součinitel potřebný k určení efektivnosti žebra
Δp	[MPa]	tlaková ztráta

Δt	[°C]	teplotní logaritmický spád
Δt	[°C]	teplotní rozdíl mezi stěnou trubky a médiem
Δt_1	[°C]	rozdíl teplot mezi médiem a spalínami
Δt_2	[°C]	rozdíl teplot mezi médiem a spalínami
δ	[-]	součinitel představující podíl tepelného toku výstupním průřezem a tepelného toku do stěn v tomto místě
ε	[m ² ·K·W ⁻¹]	součinitel zanešení
η_k	[%]	tepelná účinnost kotle
η_k^{skut}	[%]	skutečná tepelná účinnost kotle
θ_0	[-]	poměrná teplota spalin
λ	[-]	tepelná vodivost spalin, vody a vzduchu
λ_z	[-]	tepelná vodivost žebra
μ	[g · m ³]	střední hmotová koncentrace popílku
μ	[-]	součinitel rozšíření žebra
ν	[m ² · s ⁻¹]	součinitel kinematické viskozity páry, vzduchu a spalin
ξ	[-]	součinitel zanešení stěn ohniště
ξ	[-]	součinitel využití teplosměnné plochy
σ_1	[-]	poměrná příčná rozteč
σ_2	[-]	poměrná podélná rozteč
σ_2'	[-]	poměrná úhlopříčná rozteč
φ	[-]	relativní vlhkost
φ	[-]	součinitel uchování tepla
φ_{o-sv}	[-]	úhlový součinitel ohniště
φ_σ	[-]	součinitel určující způsob výpočtu opravy na uspořádání svazku
χ_1	[-]	součinitel závislý na druhu paliva
χ_2	[-]	součinitel závislý na druhu spalování
ψ	[-]	součinitel vlivu křížového proudění
ψ	[-]	součinitel tepelné efektivity teplosměnné plochy
$\bar{\psi}$	[-]	střední hodnota tepelné efektivity stěn
ψ_{sv}	[-]	součinitel tepelné efektivity svazku
ψ_z	[-]	součinitel charakterizující nerovnoměrné rozdělení součinitele přestupu tepla po povrchu žebra
ω	[-]	součinitel využití plochy
ω_{H_2O}	[%]	objemový obsah vodní páry ve spalínách
ω_{SO_2}	[%]	objemový obsah oxidu siřičitého ve spalínách
ω_{SO_3}	[%]	objemový obsah oxidu sírového ve spalínách

Seznam příloh

1. Výkresová dokumentace